

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**GILVAN GOMES CORRADI**

**APLICAÇÃO DA SELETIVIDADE LÓGICA EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

**ITAJUBÁ/MG – 2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**GILVAN GOMES CORRADI**

# **APLICAÇÃO DA SELETIVIDADE LÓGICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

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

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência**

**ORIENTAÇÃO: Dr. JOSÉ MARIA DE CARVALHO FILHO**

Itajubá – MG  
Junho/2011



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 **“Aplicação da Seletividade Lógica em Sistemas Elétricos Industriais”**  
Dissertação:

Autor: **Gilvan Gomes Corradi**

### JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	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, 10 de junho de 2011.

Prof. Dr. Ronaldo Rossi  
1º Examinador - UNESP/Guaratinguetá

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira  
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho  
3º Examinador - UNIFEI - (Orientador)

Dedico esta dissertação aos meus pais, pelo exemplo de vida a ser seguido, com dedicação e amor aos filhos, em especial ao meu pai Getúlio Corradi (in memoriam), que infelizmente não pode presenciar este momento vitorioso da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me concedido a graça de possuir a capacidade e sabedoria suficiente para poder suportar novos desafios, orientando-me nos momentos de maior dificuldade ao longo desta jornada.

Aos meus pais, que durante toda a vida valorizaram e se esforçaram para o meu engrandecimento pela trajetória da honestidade, ética, da educação e do conhecimento.

Aos meus queridos filhos, Luana e Lucas, pela compreensão pelos momentos da minha ausência na vida deles, devido à necessidade de grande dedicação aos estudos, assim como o carinho e amor dedicados.

A Samarco Mineração S/A, empresa patrocinadora do mestrado, que disponibilizou de forma incondicional todos os recursos necessários a este empreendimento, assim como a confiança depositada na minha capacidade de realizar tal feito.

Aos colegas de trabalho, que através de novas informações e discussões, contribuíram para o engrandecimento deste trabalho, dando o suporte necessário para atendimento às demandas da rotina de trabalho, durante a minha ausência para dedicação aos estudos do mestrado.

Aos professores do curso de mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, que com sabedoria e persistência, transmitiram importantes conhecimentos para a minha formação.

Em especial ao professor orientador desta dissertação, Professor Doutor José Maria de Carvalho Filho, que com paciência, serenidade e competência, conduziu de forma brilhante a discussão dos trabalhos, orientando-me sempre que necessário no redirecionamento das ações.

Aos amigos do curso de mestrado da UNIFEI, que nos momentos necessários, deram o suporte que facilitaram esta difícil caminhada.

Em particular ao amigo do curso de mestrado da UNIFEI, Engenheiro Ricardo Camargo, empresa Petrobrás, que compartilhou comigo disciplinas e de forma mais próxima pelo companheirismo, fornecendo informações e orientações na etapa final deste trabalho.

Aos Engenheiros Adenilson Santos, da GE Supply, Sérgio de Oliveira Jacobsen e César Guerreiro, da Siemens Ltda, Ricardo Abboud, Rafael Cardoso, Eduardo Zanirato, Roberto Taninaga, da *Schweitzer Engineering Laboratories*, Sérgio Florida e Weberton Eller, da Schneider Electric, que tanto colaboraram nas discussões e realizações de trabalhos.

A Professora Sandra Tedoldi, através da serenidade e conhecimento, forneceu todo o suporte para formatação final desta dissertação.

Aos amigos de uma forma geral que me motivaram durante esta difícil caminhada.

“A inteligência e o caráter das massas são incomparavelmente inferiores à inteligência e ao caráter dos poucos que fazem algo de valor para a comunidade.”

(Albert Einstein)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Zonas de proteção. ....	10
Figura 1.2 – Sistema ilustrativo para definição de seletividade. ....	11
Figura 1.3 – Princípio da seletividade cronométrica. ....	14
Figura 1.4 – Composição de um intervalo de seletividade. ....	15
Figura 1.5 – Sistema radial com seletividade cronométrica. ....	15
Figura 1.6 – Seletividade cronométrica por tempo definido. ....	16
Figura 1.7 – Seletividade cronométrica por tempo inverso. ....	16
Figura 1.8 – Princípio da seletividade amperimétrica. ....	18
Figura 1.9 – Curvas de seletividade amperimétrica. ....	19
Figura 1.10 – Princípio da seletividade lógica. ....	21
Figura 1.11 – Funcionamento da seletividade lógica. ....	21
Figura 1.12 – Detecção da direção da corrente. ....	24
Figura 1.13 – Exemplo de aplicação da proteção direcional. ....	24
Figura 1.14 – Princípio da proteção diferencial. ....	26
Figura 1.16 – Estabilidade por resistência. ....	27
Figura 1.17 – Proteção diferencial percentual. ....	27
Figura 1.18 – Estabilidade por restrição. ....	28
Figura 1.19 – Seletividades amperimétrica + cronométrica. ....	30
Figura 1.20 – Relação gráfica entre as seletividades. ....	30
Figura 1.21 – Seletividade lógica + cronométrica. ....	31
Figura 1.22 – Representação da seletividade lógica + cronométrica. ....	31
Figura 1.23 – Comparação da seletividade mista/cronométrica. ....	32
Figura 1.24 – Seletividade direcional + cronométrica. ....	33
Figura 1.25 – Seletividade lógica + direcional. ....	34
Figura 1.26 – Seletividade diferencial + cronométrica. ....	35
Figura 2.1 – Aplicação da seletividade - sistema fiado. ....	38
Figura 2.2 – Diagrama lógico típico da seletividade lógica no sistema fiado. ....	39
Figura 2.3 – Aplicação de um sistema em rede de comunicação. ....	41
Figura 2.4 – Componentes típicos de uma rede Ethernet. ....	42
Figura 2-5 – Representação da camada OSI para dois nós de rede. ....	46
Figura 2.6 – Formação de um cabo coaxial. ....	47

Figura 2.7 – Adicionando um novo nó na rede com cabo coaxial. ....	48
Figura 2.8 – Cabo de par trançado com quatro pares. ....	48
Figura 2.9 – Rede Ethernet com topologia em estrela. ....	49
Figura 2.10 – Fibra ótica. ....	51
Figura 2.11 – Topologia de uma rede com hubs compartilhados. ....	55
Figura 2.12 – Árvore de falhas para hubs compartilhados. ....	56
Figura 2-13 – Sistema com compartilhamento redundante de hubs. ....	57
Figura 2.14 – Esquema com redundância no nível de comunicação da rede. ....	58
Figura 2.15 – Interação entre os disjuntores 5151A e 5142C. ....	61
Figura 2.16 – Diagrama lógico para as funções seletividade lógica e 50BF. ....	62
Figura 3.1 – Configuração do primeiro teste de avaliação da velocidade das redes. ....	67
Figura 3.2 – Rede de comunicação montada para implementação dos ensaios. ....	73
Figura 3.3 – Representação da arquitetura radial redundante dos IEDs. ....	74
Figura 3.4 – Topologia da rede de comunicação dos <i>switches</i> óticos. ....	75
Figura 3.5 – Demonstração do nível 100% do tráfego da rede para o IED em questão. ....	78
Figura 3.6 – Topologia da rede de comunicação montada para os ensaios. ....	80
Figura 4.1 – Sistema elétrico da Usina 3. ....	94
Figura 4.2 – Configuração geral da subestação da Usina 3. ....	96
Figura 4.3 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B10QD01. ....	96
Figura 4.4 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B10QD02. ....	97
Figura 4-5 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B1QD01. ....	99
Figura 4.6 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B1QD02. ....	99
Figura 4.7 – Configuração do sistema elétrico e faltas analisadas. ....	103
Figura 4.8 – Curvas de atuação tempo-corrente. ....	104
Figura 4.9 – Curvas de atuação tempo-corrente. ....	112
Figura 4.10 – Diagrama detalhado para faltas F9, F10 e F11. ....	113
Figura 4.11 – Curvas de atuação tempo-corrente para falta F9 e F10. ....	114
Figura 4.12 – Diagrama detalhado para faltas F11, F12 e F13. ....	117
Figura 4.13 – Curva de atuação tempo-corrente para falta F11. ....	118

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – APLICAÇÃO DE MÍDIAS E SUAS VELOCIDADES DE COMUNICAÇÃO.....	44
QUADRO 2.2 – VALORES DE INDISPONIBILIDADE DE DISPOSITIVOS DE REDE. ....	53
QUADRO 2.3 – CONFIABILIDADE ENTRE AS TOPOLOGIAS PARA COMUNICAÇÃO RELÉ/RELÉ. ....	60
QUADRO 3.1 – PERFORMANCE DE VELOCIDADE ENTRE OS TIPOS DE COMUNICAÇÃO.....	68
QUADRO 3.2 – RESULTADO DE PERFORMANCE DE VELOCIDADE COM TAXA DE 19200 BPS. ....	69
QUADRO 3.3 - VALORES COMPARATIVOS DE PERFORMANCE ENTRE FABRICANTES DIFERENTES.....	71
QUADRO 3.4 - TEMPO MÉDIO DE COMUNICAÇÃO ENTRE IEDS COM SOMENTE UM SWITCH (EM ESTRELA).....	81
QUADRO 3.5 - TEMPO DE RESPOSTA ENTRE IEDS COM SWITCHES EM ANEL COM TRÁFEGO NORMAL. ....	81
QUADRO 3.6 - TEMPO DE RESPOSTA ENTRE IEDS COM SWITCHES EM ANEL COM CARREGAMENTO DA REDE. ....	82
QUADRO 3.7 - REQUISITOS DE VALORES MÁXIMOS DE TEMPO ESTABELECIDOS PELA IEC 61850. ....	83
QUADRO 3.8 - REGISTRO DE EVENTOS DO RELÉ ASSOCIADO AO DISJUNTOR GERAL. ....	85
QUADRO 3.9 - REGISTRO DE EVENTOS DO DISJUNTOR ALIMENTADOR (CONTATO ELÉTRICO ALTA VELOCIDADE).....	88
QUADRO 3.10 - REGISTRO DE EVENTOS DO DISJUNTOR GERAL COM CONTATO ELÉTRICO DE VELOCIDADE CONVENCIONAL. ....	89
QUADRO 3.11 - REGISTRO DE EVENTOS DO DISJUNTOR GERAL SEM O SINAL DE BLOQUEIO.....	90
QUADRO 3.12 - REGISTRO DE EVENTOS DOS DISJUNTORES DO FABRICANTE B.....	91
QUADRO 4.1 - INTERVALOS CONSIDERADOS PARA SELETIVIDADE CONFORME NORMA. ....	101
QUADRO 4.2 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F1. ....	105
QUADRO 4.3 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F2. ....	106
QUADRO 4.4 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F3. ....	107
QUADRO 4.5 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F4. ....	107
QUADRO 4.6 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F5. ....	108

QUADRO 4.7 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F6. ....	110
QUADRO 4.8 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F7. ....	111
QUADRO 4.9 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F9. ....	113
QUADRO 4.10 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F10. ....	115
QUADRO 4.11 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F11. ....	116
QUADRO 4.12 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F12. ....	117
QUADRO 4.13 - ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA FALTA F13. ....	119
QUADRO 4.14 - RESUMO DA APLICAÇÃO DA SELETIVIDADE LÓGICA. ....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS

A: Ampere

bps: bit por segundo

DNP: Distributed Network Protocol

GOOSE: Generic Object Oriented Substation Event

GPS: Global Positioning System

Hz: Hertz

IEC: International Electrotechnical Commission

IED: Intelligent Electronic Device

IHM: Interface Homem-Máquina

IP: Internet Protocol

kV: quilovolt

Mbit/s: megabit por segundo

ms: milissegundo

MVA: Mega Volt Ampere

OSI: Open Systems Interconnect

RAS: Remedial Action Schemes

RSRP: Robust Serial RAS Protocol

s: segundo

SDCD: Sistema Digital de Controle Distribuído

SER: Sequential Events Recorder

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

TC: transformador de corrente

TP: transformador de potencial

## SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
AGRADECIMENTOS .....	III
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE QUADROS .....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	X
INTRODUÇÃO .....	1
RELEVÂNCIA DO TEMA .....	1
ESTADO DA ARTE .....	2
OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO .....	5
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
1 - SELETIVIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS .....	8
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	8
1.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	9
1.2.1 ZONAS DE PROTEÇÃO .....	9
1.2.2 SENSIBILIDADE .....	10
1.2.3 PROTEÇÃO SELETIVA .....	10
1.2.4 PROTEÇÃO COORDENADA.....	11
1.2.5 PROTEÇÃO MISTA .....	12
1.3 TIPOS DE SELETIVIDADE .....	13
1.3.1 SELETIVIDADE CRONOMÉTRICA .....	13
1.3.2 SELETIVIDADE AMPERIMÉTRICA.....	17
1.3.3 SELETIVIDADE LÓGICA .....	19
1.3.4 SELETIVIDADE POR PROTEÇÃO DIRECIONAL .....	23
1.3.5 SELETIVIDADE POR PROTEÇÃO DIFERENCIAL .....	25
1.3.6 SELETIVIDADES COMBINADAS .....	29
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	35
2 - FORMAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA SELETIVIDADE LÓGICA.....	36
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	36
2.2 IMPLEMENTAÇÃO DA SELETIVIDADE LÓGICA .....	36
2.2.1 INTERLIGAÇÃO POR FIO DE COBRE (SISTEMA FIADO) .....	37
2.2.2 INTERLIGAÇÃO ATRAVÉS DE REDES DE COMUNICAÇÃO.....	40
2.3 REDES DE COMUNICAÇÃO ETHERNET.....	41
2.3.1 COMPONENTES DAS REDES ETHERNET .....	42
2.3.2 MODELO DA CAMADA OSI .....	45

2.3.2.1 CAMADA FÍSICA E DE ENLACE DE DADOS DO MODELO OSI .....	45
2.4 CONFIABILIDADE DAS FORMAS DE IMPLEMENTAÇÃO .....	51
2.4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE TOPOLOGIAS DE REDES ETHERNET .....	54
2.4.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA FIADO.....	59
2.4.3 CONCLUSÕES SOBRE A CONFIABILIDADE DAS TOPOLOGIAS.....	59
2.5 DIAGRAMAS LÓGICOS PARA SELETIVIDADE LÓGICA.....	60
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	63
3 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DA SELETIVIDADE LÓGICA.....	65
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	65
3.2 REFERÊNCIA INTERNACIONAL .....	66
3.2.1 CASO 1: COMUNICAÇÃO RELÉ A RELÉ.....	66
3.2.2 CASO 2: MEIOS DE COMUNICAÇÃO E FABRICANTES DIFERENTES.....	70
3.3 REFERÊNCIA NACIONAL .....	72
3.3.1 ENSAIO DE SELETIVIDADE LÓGICA COM TRÁFEGO DE REDE NORMAL (SEM A UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA IP LOAD) .....	76
3.3.2 ENSAIO DE SELETIVIDADE LÓGICA COM CARREGAMENTO DE 100% DA CAPACIDADE DE TRÁFEGO DA REDE (COM A UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA IP LOAD) .....	77
3.3.3 MENSAGENS GOOSE IEC 61850 E INTEROPERABILIDADE.....	79
3.4 TESTES REALIZADOS.....	83
3.4.1 CASO 1 (FABRICANTE A).....	83
3.4.2 CASO 2 (FABRICANTE B).....	90
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	91
4 ESTUDO DE CASO – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SELETIVIDADES LÓGICA E CONVENCIONAL.....	93
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	93
4.2 ESTUDO DE CASO – DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO .....	93
4.2.1 SISTEMA ELÉTRICO - USINA 3.....	95
4.2.1.1 SUBESTAÇÃO PRINCIPAL - USINA 3.....	95
4.2.1.2 SUBESTAÇÃO DA FILTRAGEM .....	98
4.3 ESTUDO DE SELETIVIDADE – CRITÉRIOS E PREMISSAS .....	99
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA – ESTUDO DE CASO .....	101
4.4.1 PONTO DE FALTA F1 .....	102
4.4.2 PONTO DE FALTA F2 .....	105
4.4.3 PONTO DE FALTA F3 .....	106
4.4.4 PONTO DE FALTA F4 .....	107

4.4.5 PONTO DE FALTA F5 .....	108
4.4.6 PONTO DE FALTA F6 .....	109
4.4.7 PONTO DE FALTA F7 .....	110
4.4.8 PONTO DE FALTA F8 .....	111
4.4.9 PONTO DE FALTA F9 .....	112
4.4.10 PONTO DE FALTA F10 .....	114
4.4.11 PONTO DE FALTA F11 .....	115
4.4.12 PONTO DE FALTA F12 .....	116
4.4.13 PONTO DE FALTA F13 .....	118
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	120
5 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES .....	122
5.1 PONTOS DE CONTINUIDADE PARA FUTURAS PESQUISAS.....	125
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	126



# INTRODUÇÃO

## RELEVÂNCIA DO TEMA

A proteção em sistemas elétricos sempre exigiu alta confiabilidade quando da necessidade da sua intervenção. Embora a atuação do sistema de proteção represente uma condição desfavorável para a continuidade operacional, sua adequada atuação significa menores danos aos equipamentos envolvidos.

Este fato faz com que a engenharia de proteção, representada pelos institutos de pesquisas, em conjunto com os grandes fabricantes, busque uma evolução contínua, amparada pelo desenvolvimento tecnológico tanto de hardware quanto de software.

Num ambiente industrial, foco deste trabalho, a ineficácia de um sistema de proteção resulta em transtornos operacionais e prejuízos financeiros incalculáveis, além do aspecto da segurança pessoal e patrimonial, gerando uma atmosfera de conseqüências negativas para todas as partes envolvidas.

Diante dos desafios propostos, os esforços aplicados para o desenvolvimento da engenharia de proteção nos últimos tempos culminaram em propostas que realmente trazem uma maior eficácia e confiabilidade dos sistemas de proteção, destacando, sobretudo na área industrial, o recurso da seletividade lógica.

A aplicação da seletividade lógica tem como principal objetivo o aumento da eficiência da proteção, destacadamente em sistemas radiais, tradicionais em ambientes industriais, com respeito à redução do tempo da atuação da proteção, minimizando assim o impacto das possíveis faltas nos sistemas elétricos.

A relevância da aplicação da seletividade lógica é cada vez mais destacada à medida que as faltas ocorrem em zonas superiores do sistema elétrico, ou seja, em locais mais próximos da fonte de alimentação, onde naturalmente ocorrem os

maiores níveis de curto-circuito. Além disto, a seletividade lógica cumpre outro papel importante, relacionada a uma maior assertividade da seletividade propriamente dita, diante de alguma deficiência do projeto de proteção com a aplicação da seletividade convencional.

Neste contexto, diante da importância atual da aplicação da seletividade lógica nos sistemas de proteção, este trabalho busca obter respostas relacionadas à confiabilidade e desempenho no tocante aos tempos de resposta das diversas formas de implementação da seletividade lógica.

## **ESTADO DA ARTE**

Anteriormente ao desenvolvimento da seletividade lógica, os projetos de proteção contemplavam somente a seletividade convencional, utilizando-se as seletividades cronométrica, amperimétrica, diferencial e direcional, além da combinação destas.

Inicialmente, a aplicação da seletividade lógica era realizada via sistema fiado, utilizando-se cabo elétrico de cobre comum para interligação dos contatos das entradas e saídas digitais de relés. Até a data atual, encontram-se projetos recentes utilizando esta topologia, em conformidade com a aplicação e/ou cultura do ambiente industrial, além de *upgrade* de instalações sem a substituição dos relés de proteção originais.

Com o avanço da aplicação das redes de comunicação, tornando-se mais conhecidas e confiáveis, a tendência é a utilização desta forma de implementação, fazendo com que os sistemas fiados façam parte do passado.

As redes de comunicação oferecem vantagens em relação ao sistema fiado, destacadamente com relação ao nível de informação e monitoramento para o sistema de controle e supervisão. Além disto, gera uma simplificação da interligação física dos dispositivos de proteção, tornando menos onerosa esta parte do projeto. Porém, este tipo de aplicação exige um conhecimento técnico mais apurado por parte da equipe de engenharia responsável pela supervisão e manutenção do sistema.

Outro ponto que era um complicador para aplicação das redes de comunicação, estava associado aos protocolos de comunicação, exigindo de certa forma uma fidelidade aos fabricantes, devido à impossibilidade na prática da comunicação entre os dispositivos de diferentes fabricantes. Este item foi superado recentemente com a norma IEC 61850 (2004), trazendo a desejada interoperabilidade, possibilitando a comunicação de IEDs de fabricantes diferentes.

Diante destes fatos, a tendência dos sistemas de proteção é a aplicação da seletividade lógica com a utilização das redes de comunicação, em particular com as mensagens GOOSE.

Referente ao desempenho da aplicação da seletividade lógica, as pesquisas bibliográficas realizadas culminaram na consulta de trabalhos, que avaliaram este desempenho relativo à velocidade de resposta dos sinais de bloqueio utilizados na seletividade lógica. Estes trabalhos foram baseados em diferentes topologias de sistemas, avaliando-se também o desempenho de fabricantes distintos.

Em Woodward (2001), Scheer e Dolezilek (2000) e Scheer e Dolezilek (2007), apresentam as primeiras informações a respeito da aplicação das topologias com as redes de comunicação, principalmente em redes Ethernet, bastante evoluídas e representando a tendência atual. São apresentadas informações a respeito dos meios físicos de interligação (mídias), assim como informações sobre conceitos, funções e comportamento em relação às possíveis falhas dos componentes mais usuais das redes.

Em Merlin Gerin (2006), é citada uma aplicação da seletividade lógica através do sistema fiado, através das entradas e saídas discretas dos *IEDs*, demonstrando a topologia de comunicação dos sinais utilizados entre os dispositivos de proteção.

Em COMPERJ (2008), é apresentado o diagrama lógico da aplicação da seletividade lógica em conjunto com a função 50BF (*Breaker Failure*).

Em outro momento, são realizados trabalhos por Botza *et al* (2008) para verificação do desempenho da velocidade dos sinais da seletividade lógica, tanto no sistema

fiado quanto nas redes de comunicação. Outras variações são realizadas por esta referência, buscando confrontar situações que podem ser encontradas nos sistemas industriais.

Neste contexto, Botza *et al* (2008) apresenta resultados comparativos de performance através de aplicações com fabricantes de IEDs diferentes, incluindo também variações dos protocolos de comunicação.

No Brasil, o trabalho citado por Kimura (2008) demonstra a tendência global de se realizar as atualizações tecnológicas de instalações industriais, em que estas passaram por severas modificações do ponto de vista da desativação de sistemas tradicionais, utilizando-se as interligações através do sistema fiado, e realizando-se a substituição dos dispositivos de proteção com redes de comunicação, através da IEC 61850, citando-se as vantagens de supervisão, padronização, comissionamento e *start-up*, além da redução dos custos com a fiação de cobre.

O trabalho realizado por Senger, Reis Filho & Bulgarelli (2005), avalia a performance da aplicação da seletividade lógica, entre outras funções de proteção, quando da utilização das redes de comunicação com mensagens GOOSE IEC 61850. Este trabalho foi motivado pela necessidade de se verificar o desempenho da velocidade e efetividade da seletividade lógica diante da situação real de carregamento da rede de comunicação, utilizando-se para isto um software específico para carregamento da rede.

Os resultados demonstram a priorização das mensagens GOOSE diante das outras informações que trafegam na rede, obtendo-se conclusões positivas do ponto de vista da aplicação da seletividade lógica perante as adversidades impostas.

O trabalho realizado por Souto (2009), semelhante ao trabalho desenvolvido por Senger, Reis Filho & Bulgarelli (2005), busca respostas em relação à eficiência da aplicação da seletividade lógica diante de adversidades impostas à rede de comunicação, porém, utilizando-se *IEDs* de diferentes fabricantes, verificando-se assim a eficácia da interoperabilidade.

Como resultado, observam-se variações significativas de desempenho entre os testes realizados, porém do ponto de vista da proteção elétrica, as diferenças verificadas nos tempos de atuação são irrelevantes.

## **OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO**

O objetivo desta dissertação é realizar um estudo sobre a aplicação da seletividade lógica, diante da importância que esta filosofia disponibiliza para as questões de segurança e desempenho da proteção nos sistemas elétricos, em particular para os sistemas industriais.

Busca-se neste trabalho realizar uma análise comparativa dos ganhos da seletividade lógica perante a aplicação da seletividade convencional.

Neste contexto, definiu-se como objetivos deste trabalho de dissertação os seguintes tópicos:

- Obter maior entendimento e domínio do conceito e aplicação da seletividade lógica nos sistemas de proteção, baseado na consulta à literatura técnica e discussões com a engenharia de fabricantes e integradores de sistemas de proteção;
- Analisar os tipos de seletividade que podem ser aplicados de forma combinada, buscando maior confiabilidade para o sistema de proteção;
- Avaliar a confiabilidade dos dispositivos e topologias aplicadas nas redes de comunicação, como um fator importante na análise de aplicação, em especial para sistemas críticos;
- Analisar o desempenho das redes de comunicação para a aplicação da seletividade lógica perante de níveis diferentes de tráfego de dados;

- Realizar ensaios práticos em laboratório de fabricantes de sistemas de proteção, buscando-se avaliar o desempenho da seletividade lógica, contemplando sistemas tradicionais (sistema fiado), protocolos de comunicação específicos de fabricantes, além da recente aplicação das mensagens GOOSE IEC 61850;
- Realizar uma análise comparativa da aplicação da seletividade lógica diante da seletividade convencional, em particular da seletividade cromométrica, num sistema elétrico industrial real em operação, fornecendo conclusões dos possíveis ganhos e as restrições existentes da aplicação da seletividade lógica, conforme as particularidades do sistema proposto;
- Gerar um documento que pode ser utilizado como referência sobre a aplicação da seletividade lógica em sistemas industriais, o que constitui a principal contribuição deste trabalho.

## **ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A parte inicial deste trabalho intitulada introdução relata sobre o tema principal do assunto abordado, destacando na seqüência a relevância deste tema, dando seqüência na abordagem sobre o estado da arte conforme os trabalhos pesquisados e consultas aos provedores de sistemas de proteção, destacando posteriormente os objetivos e contribuições traçadas que motivaram o trabalho, finalizando com a organização dos capítulos.

No primeiro capítulo foram abordados os principais conceitos relativos aos diferentes tipos de seletividade disponíveis, incluindo os tipos combinados. A seletividade lógica, tema principal deste trabalho, naturalmente é abordada de forma destacada.

O segundo capítulo apresenta as diversas formas de implementação existentes e normalmente utilizadas nos projetos atuais, variando desde a interligação de *IEDs* por fio de cobre até às redes de comunicação, com destaque para a rede Ethernet e seus componentes.

No terceiro capítulo é realizada uma avaliação do desempenho da seletividade lógica no que se refere à velocidade de resposta dos sinais de bloqueio, tomando como base trabalhos publicados tanto em âmbito nacional como internacional, além de testes realizados nos laboratórios de fornecedores de *IEDs*.

Ressalta-se que tal análise de desempenho foi realizada de forma comparativa com o sistema fiado, utilizando protocolos de comunicação específicos de fabricantes, além do protocolo IEC 61850.

No quarto capítulo foi apresentado um estudo de caso, baseado em um sistema de proteção industrial real, com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre a aplicação da seletividade lógica e a seletividade cronométrica.

No último capítulo são apresentadas as principais conclusões extraídas do trabalho, além de sugerir temas para investigação em futuras pesquisas.

## **1 - SELETIVIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo realiza-se uma abordagem geral sobre os conceitos relativos à seletividade da proteção elétrica, com foco em sistemas elétricos industriais, apresentando-se os princípios de funcionamento, as características e aplicações de cada tipo de seletividade atualmente disponível.

Os estudos da seletividade em aplicações industriais objetivam minimizar os desligamentos dos sistemas elétricos, além de proteger a instalação, evitando maiores prejuízos aos processos industriais, visto que uma parada operacional devido a uma falha no sistema de proteção causará perdas substanciais, condicionado ao tempo de restabelecimento do suprimento de energia elétrica, e às especificidades de cada processo produtivo envolvido.

Com este objetivo, existem algumas formas de se aplicar a seletividade, sendo que para cada aplicação busca-se avaliar o melhor tipo de seletividade a ser empregado, ou até mesmo combiná-los, de forma a aumentar a confiabilidade da proteção.

Desta forma, neste capítulo, serão analisadas as vantagens e desvantagens de cada tipo de seletividade, mostrando-se o valor agregado que cada tipo de seletividade adiciona ao sistema de proteção.

Além das seletividades tidas como tradicionais, será apresentado um tipo de seletividade que é mais recente nos estudos de proteção, denominada de seletividade lógica. Esta emprega mecanismos que possibilitam reduzir os tempos de atuação da proteção, apresentando-se como um grande diferencial em relação aos demais tipos de seletividade existentes.

## 1.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

### 1.2.1 ZONAS DE PROTEÇÃO

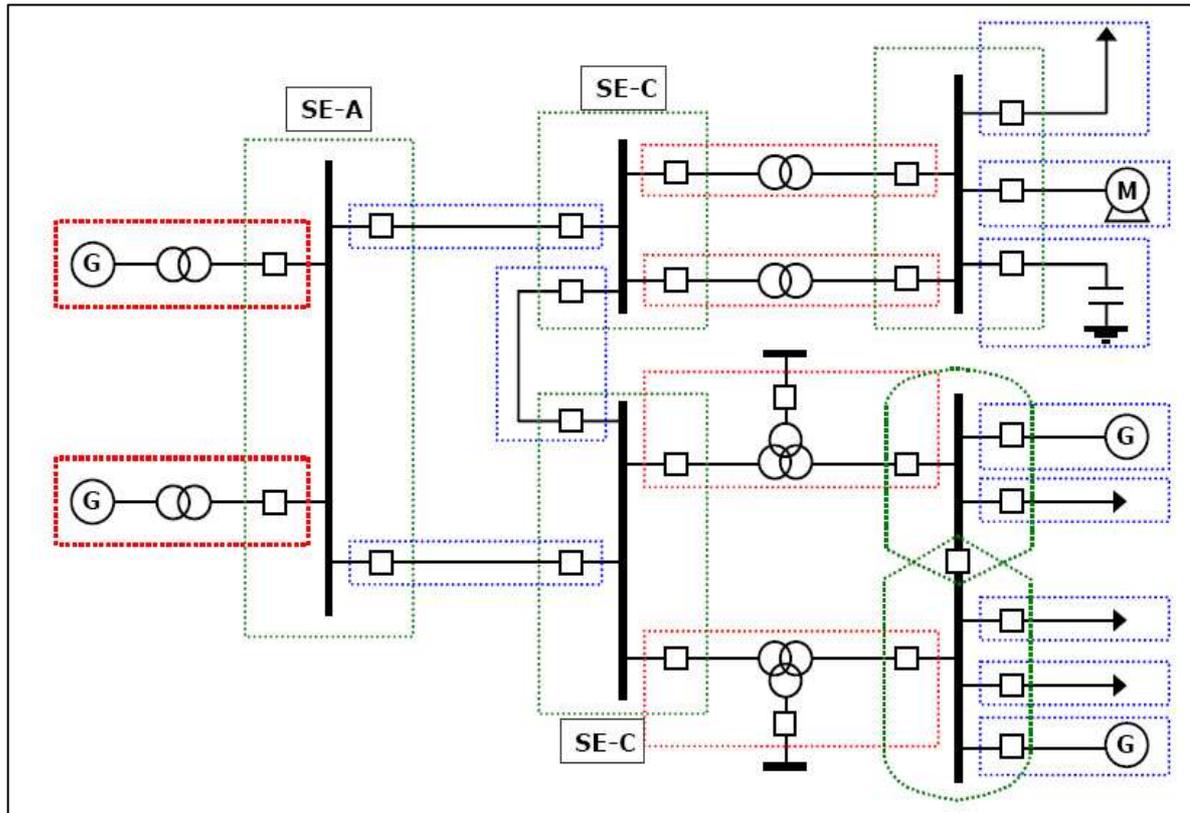
Nos sistemas elétricos há a necessidade de se definir as zonas de proteção, a partir das quais os estudos definem a responsabilidade de atuação dos dispositivos de proteção envolvidos. Desta forma, os dispositivos de proteção são agrupados formando zonas de proteção primária (dispositivo protetor) e de retaguarda (dispositivo protegido).

As zonas de proteção definem as interfaces de atuação dos dispositivos de proteção, buscando assegurar que interrupções causadas por faltas permanentes sejam restritas à menor porção do sistema elétrico num período de tempo mínimo (ROSSI, 2005)

A figura 1.1 ilustra as zonas de proteção de um sistema elétrico, a partir da qual pode-se perceber que estas zonas de proteção são compostas por transformadores, geradores, barramentos, linhas de transmissão, bancos de capacitores, reatores, motores elétricos e dispositivos de proteção (disjuntores, relés, religadores e elos-fusíveis).

Vale destacar que, quando da especificação e definição dos ajustes dos dispositivos de proteção, deverá ser assegurado que nenhuma região do sistema elétrico esteja desprovida de proteção, ou seja, não poderão existir zonas cegas.

Desta forma, busca-se que cada dispositivo de proteção tenha uma área de atuação delimitada pela menor corrente de defeito capaz de sensibilizá-lo.



Fonte: ROSSI, 2005  
 Figura 1.1 – Zonas de proteção.

### 1.2.2 SENSIBILIDADE

Esta característica define a capacidade dos dispositivos de proteção serem sensibilizados, quando da ocorrência de algum evento anormal, pelos mínimos valores de corrente de curto-circuito no final da sua zona de proteção, e simultaneamente ser incapaz de ser sensibilizado pela circulação das máximas correntes de carga.

Esta propriedade deve ser considerada nos estudos de proteção tanto para os dispositivos de proteção de fase quanto de neutro.

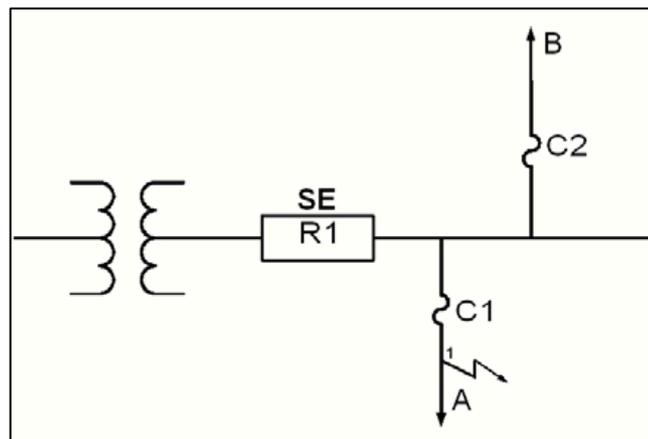
### 1.2.3 PROTEÇÃO SELETIVA

É uma condição desejável obtida através da definição dos ajustes e/ou das curvas características tempo-corrente dos dispositivos de proteção, que faz com que numa situação de ocorrência de alguma falta, somente atue o dispositivo de proteção mais próximo do ponto de ocorrência da falta, isolando assim o trecho defeituoso, mesmo

que este evento ocorra na interseção entre duas zonas de proteção. (CEMIG, 1994)

Esta condição é essencial para que, quando da ocorrência de qualquer falta, a atuação do dispositivo de proteção isole o menor trecho possível do sistema elétrico, propiciando também a localização mais ágil do ponto defeituoso (aspecto de manutenção), além de reduzir transtornos e prejuízos.

A figura 1.2 ilustra esta situação em que a ocorrência de falta no ponto 1 fará com que somente o dispositivo de proteção C1 atue primeiro, isolando o menor trecho possível, no caso em questão o consumidor A, não ocorrendo a atuação da proteção de retaguarda (dispositivo protegido).



Fonte: CEMIG, 1994

Figura 1.2 – Sistema ilustrativo para definição de seletividade.

#### 1.2.4 PROTEÇÃO COORDENADA

Este tipo de proteção é aquele projetado para eliminar nas primeiras atuações dos dispositivos de proteção (normalmente religadores) as faltas transitórias, sendo que caso a situação de defeito persista, deverá atuar o dispositivo de proteção mais próximo do ponto de defeito (proteção seletiva).

Desta forma, pode-se afirmar que a proteção seletiva é um caso particular da proteção coordenada, sendo esta última mais abrangente do que a anterior.

Esta característica é vantajosa em certas situações, destacadamente nos sistemas de distribuição em relação às aplicações industriais, pois neste caso existem condições de se diferenciar os tipos de faltas temporárias das faltas permanentes.

Portanto, supondo a mesma falta anterior ocorrida no ponto 1 conforme a figura 1.2, utilizando-se o esquema da proteção coordenada, o dispositivo de proteção R1 situado na subestação elétrica utilizará das suas curvas rápidas de ajuste para realizar as primeiras atuações, evitando que o fusível C1 se rompa nas primeiras sensibilizações, sendo que caso a falta seja temporária, os consumidores A e B sofrerão interrupções temporárias, e caso a situação de falta persista, o fusível C1 romper-se-á, interrompendo somente o consumidor A, caracterizando-se assim como uma falta permanente. Nesta situação, será necessária uma ação de reparo no ponto 1 do sistema. (CEMIG, 1994).

### **1.2.5 PROTEÇÃO MISTA**

Existe ainda a alternativa de se estabelecer a combinação dos dois tipos de proteção relatados anteriormente, situação que no sistema elétrico poder-se-á ter trechos com a proteção coordenada, que já engloba a proteção seletiva, e outros trechos que somente é interessante a aplicação da proteção seletiva, por particularidades dos consumidores em questão.

A aplicação da proteção mista pode ser obtida com a utilização de religadores ao longo de um circuito de distribuição (religadores de poste).

Vale ressaltar que esta característica impõe que em algumas partes do circuito as interrupções serão de longa duração, enquanto que em outros trechos serão de curta-duração.

Este tipo de filosofia valoriza a continuidade e qualidade de fornecimento aos consumidores especiais, podendo-se exemplificar com os hospitais.

### 1.3 TIPOS DE SELETIVIDADE

Como já apresentado, a seletividade tem como objetivo isolar o mais rapidamente possível a parte do circuito elétrico afetada por uma falta e, somente esta, deixando energizadas as demais partes do sistema elétrico.

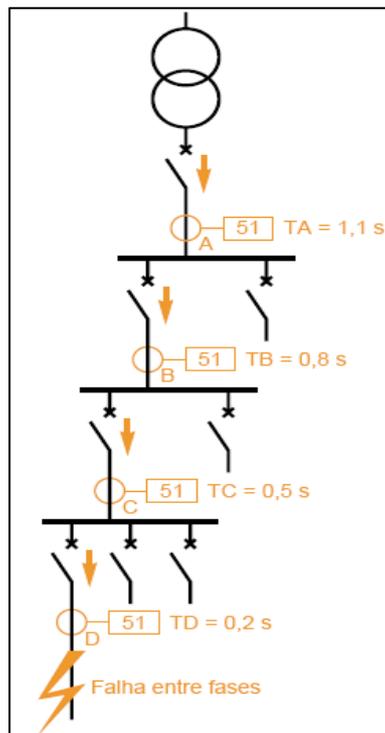
Com este objetivo, foram desenvolvidos pela engenharia de proteção diversos tipos de seletividade, destacando-se:

- Seletividade cronométrica;
- Seletividade amperimétrica;
- Seletividade lógica;
- Seletividade direcional;
- Seletividade diferencial;
- Seletividade combinada.

#### 1.3.1 SELETIVIDADE CRONOMÉTRICA

Este tipo de filosofia consiste em definir temporizações ao longo do circuito para as diferentes proteções de sobre-corrente existentes no sistema, retardando intencionalmente a atuação de cada proteção. Ressalta-se que estas temporizações serão cada vez mais longas à medida que determinado relé de proteção esteja localizado mais próximo da fonte de alimentação em relação ao ponto de falta. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008).

Esta situação pode ser visualizada pela figura 1.3, em que a falta mostrada é percebida por todas as proteções A, B, C e D. A proteção D, considerando os ajustes propostos, fechará os seus contatos mais rapidamente do que as outras proteções de retaguarda, por estar mais próxima ao ponto da falta. Assim, com a atuação da proteção D, a corrente de falta desaparecerá, e as outras proteções A, B e C serão dessensibilizadas.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.3 – Princípio da seletividade cronométrica.

O intervalo de tempo  $\Delta T$ , que corresponde à diferença de temporização entre duas proteções sucessivas (montante e jusante), representa a característica principal da seletividade cronométrica.

O intervalo de seletividade é obtido pela equação (1):

$$\Delta T \geq T_c + t_r + 2dT + m \quad (1)$$

Onde:

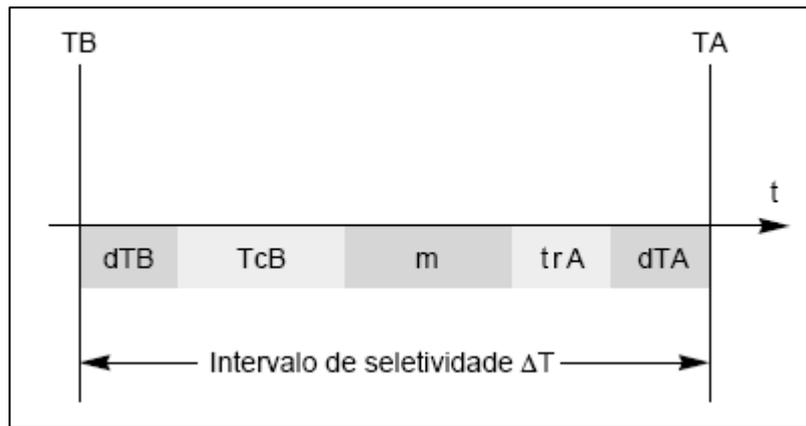
**T<sub>c</sub>**: tempo de interrupção do dispositivo de proteção a jusante, considerando o tempo de resposta do dispositivo na abertura e o tempo de arco;

**dT**: tolerâncias de temporização nas curvas de atuação dos dispositivos de proteção envolvidos;

**t<sub>r</sub>**: tempo de avanço do dispositivo de proteção a montante;

**m**: margem de segurança.

A figura 1.4 ilustra graficamente o conceito apresentado, considerando a seletividade entre os dispositivos A e B da figura 1.3.

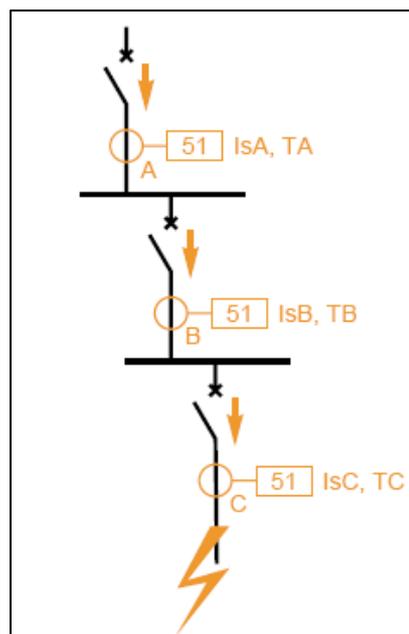


Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.4 – Composição de um intervalo de seletividade.

Normalmente, este tipo de seletividade é aplicado em sistemas radiais na indústria, em que se estabelece um sequenciamento de operação das proteções, podendo-se definir temporizações adequadas visando garantir a confiabilidade deste princípio. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008)

Na seqüência são ilustrados dois tipos de curva de atuação tempo-corrente, tradicionalmente utilizados na aplicação da seletividade cronométrica, tomando-se como base o diagrama unifilar apresentado na figura 1.5.



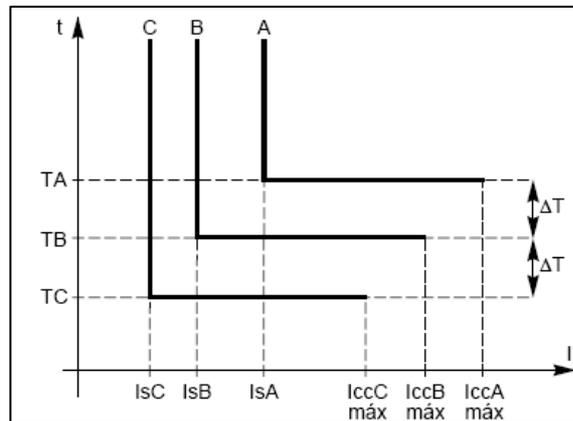
Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.5 – Sistema radial com seletividade cronométrica.

- Curvas Tempo Definido

Para este caso específico, deverão ser obedecidas algumas condições mostradas na figura 1.6, onde  $I_{sA} > I_{sB} > I_{sC}$  e  $T_A > T_B > T_C$ .

Tipicamente o intervalo de seletividade  $\Delta T$  adotado é de 300 ms.



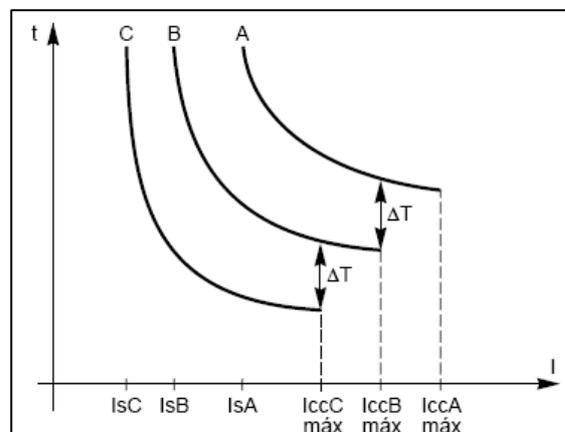
Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.6 – Seletividade cronométrica por tempo definido.

- Curvas Tempo Inverso

Neste caso, se os relés forem ajustados de acordo com as correntes nominais ( $I_n$ ) do sistema em cada ponto da instalação, as seguintes condições deverão ser obedecidas:  $I_{sA} > I_{sB} > I_{sC}$ , onde  $I_{sA} = I_{nA}$ ,  $I_{sB} = I_{nB}$  e  $I_{sC} = I_{nC}$ . (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008)

A figura 1.7 ilustra esta aplicação, onde se observa que as curvas dos dispositivos de proteção não podem ter pontos de intersecção.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.7 – Seletividade cronométrica por tempo inverso.

Ressalta-se que a seletividade cronométrica tem como diferencial competitivo a simplicidade da sua implantação, não dependendo de outros recursos tecnológicos dos dispositivos de proteção. A parametrização adequada dos relés oferece segurança para atuação da proteção, visto que caso alguma proteção a jusante venha a falhar, a proteção a montante atuará automaticamente no tempo  $\Delta T$  ms mais tarde.

Em contrapartida, num sistema radial, em situações que se tenha uma falta num ponto próximo à fonte de alimentação, o dispositivo de proteção correspondente atuará num tempo normalmente muito longo.

Este fato é prejudicial para o sistema, em função de custos adicionais que se deve prever na especificação e dimensionamento dos equipamentos, devido ao longo tempo de exposição destes equipamentos às condições de falta.

### **1.3.2 SELETIVIDADE AMPERIMÉTRICA**

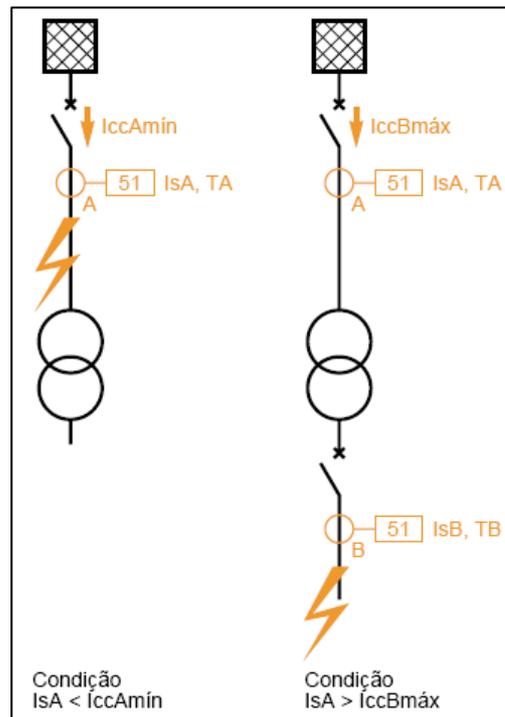
Em função das impedâncias existentes ao longo do sistema elétrico, durante um curto-circuito, estas impedâncias provocam uma redução da corrente de defeito à medida que o ponto de falta distancia-se da fonte de alimentação e vice-versa. Este fato viabiliza a aplicação de um tipo de seletividade que se baseia neste comportamento, denominada seletividade amperimétrica.

Para que este princípio seja aplicado, uma proteção de sobrecorrente é instalada em cada seção do sistema (zona de proteção), sendo que o seu ajuste deve ser inferior à corrente de curto-circuito mínima na zona de proteção monitorada, e ao mesmo tempo ser superior à corrente de curto-circuito máxima da zona de proteção a jusante (fora da área monitorada).

Na prática, este tipo de seletividade é vantajosamente aplicado em casos em que se tenha um transformador de potência separando as zonas monitoradas através dos seus enrolamentos primário e secundário, pois neste caso o estudo para definição dos ajustes torna-se mais simples e o custo de implantação menor.

Pode-se ilustrar esta aplicação através da figura 1.8 em que se utiliza um transformador entre as duas seções monitoradas, o primário e o secundário do transformador.

Neste caso, a corrente de ajuste  $I_{sA}$  deve obedecer à condição  $I_{ccBm\acute{a}x} < I_{sA} < I_{ccAm\acute{i}n}$  para atendimento ao princípio da seletividade amperimétrica (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008).



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.8 – Princípio da seletividade amperimétrica.

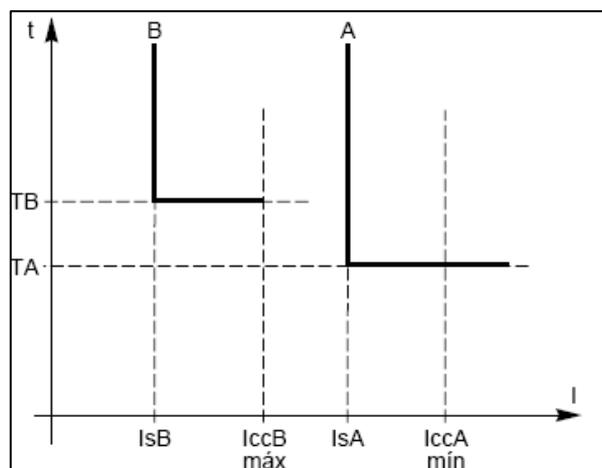
É importante ressaltar que, pelo princípio da seletividade amperimétrica, os ajustes de tempo (temporizações) são independentes de uma seção para outra, podendo, por exemplo, o ajuste de tempo da proteção a montante (TA) ser menor do que o ajuste de tempo da proteção a jusante (TB).

Um dos inconvenientes deste tipo de seletividade é que não há uma relação (interdependência) entre a proteção a montante e a jusante, pois caso haja uma falha da proteção a jusante, não existe uma sistemática que estabeleça que a proteção a montante deverá ser acionada, deixando o aspecto de segurança de certa forma vulnerável.

Outro fato que inviabiliza a sua utilização é a dificuldade de definição dos ajustes das proteções entre as seções vizinhas (montante e jusante), pois em alguns casos, não há uma variação significativa na corrente de curto-circuito à medida que o ponto de falta muda de posição.

Esta situação é bastante comum em sistemas de média tensão industriais, exceto nos casos que exista um transformador de potência separando as seções vizinhas. Este item torna-se num limitador de utilização desta filosofia, tornando-se mais fácil a sua aplicação em sistemas de baixa tensão.

Tomando como base a figura 1.8 e utilizando como critério prático  $1,25I_{ccBm\acute{a}x} < I_{sA} < 0,8I_{ccAm\acute{i}n}$ , a experiência tem mostrado que a seletividade amperimétrica entre as proteções A e B é garantida (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008). A figura 1.9 ilustra esta situação.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.9 – Curvas de seletividade amperimétrica.

### 1.3.3 SELETIVIDADE LÓGICA

Esta filosofia de seletividade foi desenvolvida por apresentar algumas soluções para as deficiências encontradas na seletividade tradicional (cronométrica), visto que através da seletividade lógica, evita-se os longos tempos de atuação das proteções mais próximas à fonte de alimentação em relação ao ponto de falta, assim como se define prioritariamente o dispositivo de proteção que deverá atuar em função da

localização do ponto de falta. É uma filosofia desenvolvida mais recentemente em função dos recursos tecnológicos disponibilizados pela eletrônica digital.

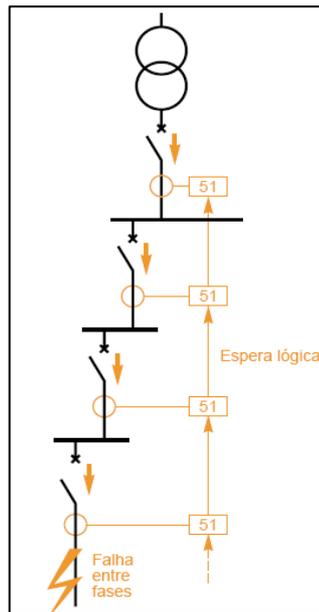
O funcionamento da seletividade lógica dá-se através da troca de informações (dados lógicos) entre as proteções sucessivas num sistema de rede radial, informações estas que farão com que os dispositivos de proteção obedeçam aos comandos de bloqueio das proteções a jusante para as proteções a montante, sempre em relação ao ponto de falta do sistema. Desta forma, este comando de bloqueio somente ocorre para os dispositivos de proteção que estejam a montante do ponto de falta, ficando no primeiro momento o dispositivo de proteção que se localiza mais próximo do ponto da falta responsável por realizar a atuação para isolamento da mesma. Os dispositivos de proteção localizados a jusante do ponto da falta não serão sensibilizados pela corrente de curto-circuito, desta maneira não sendo bloqueados. Com este procedimento, consegue-se definir claramente o relé que deverá atuar em função da falta no sistema. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008)

Deve ficar claro que o bloqueio lógico somente ocorrerá nas funções instantâneas de *trip* do dispositivo de proteção a montante, sendo que caso o valor de *pickup* deste dispositivo de proteção seja atingido, o mesmo enviará outro sinal de bloqueio para o próximo dispositivo de proteção a montante na cadeia de seletividade.

A figura 1.10 ilustra o princípio de funcionamento citado.

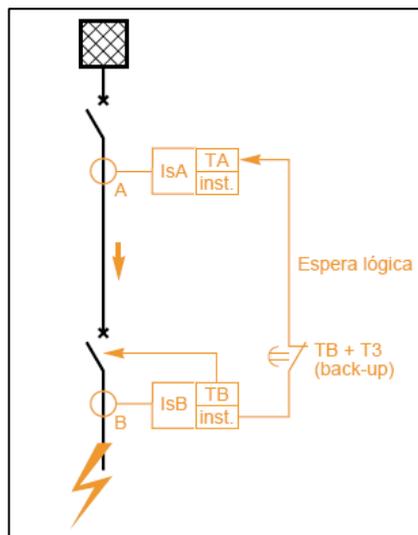
Pelo princípio da seletividade lógica, cada proteção solicitada por uma falta no sistema atua da seguinte forma:

- Envia um comando lógico de bloqueio para o relé de proteção a montante;
- Envia um comando de *trip* para o disjuntor correspondente, exceto que este já tenha recebido um comando de bloqueio do relé a jusante;
- Além disto, normalmente é utilizada a função temporizada como recurso de *backup* para garantir maior segurança ao sistema, ou seja, caso a seletividade lógica venha a falhar, a função temporizada (função 51) opera como *backup*.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
 Figura 1.10 – Princípio da seletividade lógica.

O funcionamento do bloqueio lógico é ilustrado mais detalhadamente pela figura 1.11. Por esta figura, na ocorrência de uma falta a jusante da proteção em B, a proteção em B bloqueará a proteção em A, sendo que somente a proteção em B provocará o comando de *trip* no disjuntor após decorrido o tempo  $T_B$ .



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
 Figura 1.11 – Funcionamento da seletividade lógica.

Neste caso a duração do comando de bloqueio da proteção em A fica limitado a  $T_B + T_3$ , devendo este tempo  $T_3$  ser igual ou maior que o tempo de abertura e eliminação do arco do disjuntor da proteção em B. Na prática define-se este tempo

T3 entre 100 e 200 ms. Caso o disjuntor da proteção em B não opere por falha, o disjuntor da proteção em A entrará em *trip* com  $TB + T3$  de duração, sendo que caso a falta ocorra entre as proteções em A e B, o disjuntor da proteção em A desligará com o tempo  $TA$ . (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008)

Uma das vantagens da aplicação da seletividade lógica é a independência do tempo de atuação (*trip*) da proteção em relação ao ponto de falta, pois mesmo com o sistema de proteção em cascata (sistema radial), ter-se-á sempre o mesmo tempo de atuação.

Desta forma, a condição desvantajosa que a seletividade tradicional (cronométrica) apresenta, correspondendo ao elevado tempo de atuação para defeitos próximos da fonte de alimentação, é contornada com a seletividade lógica.

Ressalta-se que em algumas aplicações ainda utiliza-se de uma condição de *back-up* como retaguarda da seletividade lógica, aplicando-se normalmente a seletividade temporizada (cronométrica). Acredita-se que esta situação deva-se ainda ao relativo baixo conhecimento pelo público cliente, ainda carente de informações sobre ensaios, testes e confiabilidade destes esquemas de proteção.

Como a seletividade lógica requer a transmissão de dados entre os dispositivos de proteção para se realizar os comandos de bloqueio, é necessária a instalação de uma infra-estrutura, como exemplo, a fiação para realizar esta comunicação. Esta condição torna-se mais difícil quando a seletividade lógica deve ser implantada entre dispositivos distantes (por exemplo entre subestações elétricas), que traz maior restrição à realização da infra-estrutura necessária. Nestes casos, pode-se aplicar as chamadas seletividades combinadas que serão abordadas mais adiante neste documento.

Nestes casos, a seletividade lógica é aplicada entre os dispositivos de proteção da mesma subestação elétrica e a seletividade cronométrica entre as subestações. Esta condição é considerada como uma desvantagem da aplicação da seletividade lógica.

A seletividade lógica é mais comumente encontrada em sistemas industriais radiais de média tensão, não existindo nenhuma restrição na sua aplicação em sistemas de baixa tensão.

### 1.3.4 SELETIVIDADE POR PROTEÇÃO DIRECIONAL

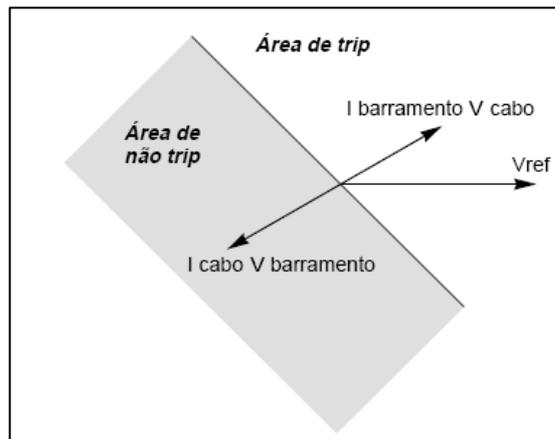
Este tipo de seletividade foi desenvolvido para aplicações em que se alimenta o ponto de falta com pelo menos duas fontes de alimentação através de um sistema fechado em paralelo. Neste caso, a busca pela seletividade procura isolar o ponto de falta o mais rápido possível, ou seja, sem que a outra fonte seja afetada com a desenergização desnecessária e prejudicial à continuidade do fornecimento da energia elétrica.

Para atendimento ao princípio desta seletividade, é necessário utilizar-se de uma proteção sensível ao sentido do fluxo de corrente, para que o sistema possa perceber a retroalimentação no sentido do ponto de defeito e eliminá-la com a velocidade necessária.

Desta forma, os dispositivos de proteção (relés) atuarão ou não em função do sentido da sobre-corrente provocada pela falta.

Para que o sistema de proteção consiga identificar a direção do fluxo da sobre-corrente, é utilizado como referência um vetor de tensão, em que no momento da sobre-corrente, é verificada a defasagem desta corrente com a referência de tensão, fazendo com que a proteção direcional cumpra com o seu papel. Desta maneira, o relé de proteção receberá tanto sinal de corrente quanto de tensão elétrica. A figura 1.12 demonstra o ponto de referência da tensão em relação ao sentido do fluxo de corrente elétrica.

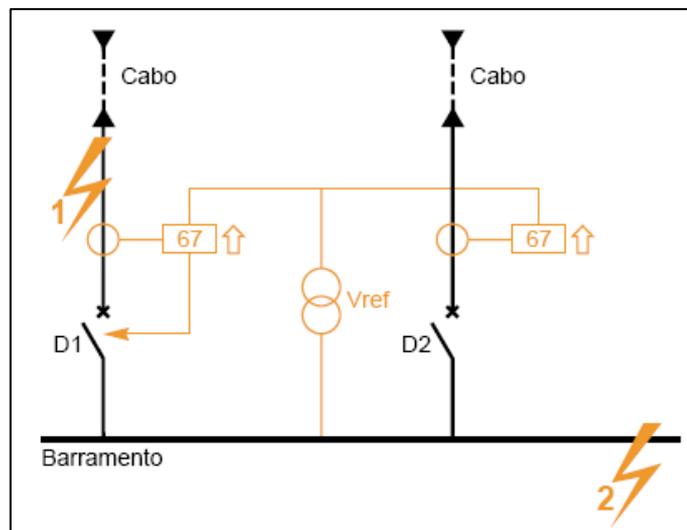
A definição da região de atuação da proteção direcional (*trip*) será realizada de acordo com o conhecimento do funcionamento do sistema, sendo que em determinada situação a proteção direcional será solicitada a atuar. A figura 1.12 também ilustra a definição das regiões de *trip* e não *trip*, sempre observando o vetor de referência de tensão.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.12 – Detecção da direção da corrente.

Numa situação real pode-se definir o funcionamento da proteção para atendimento ao princípio da seletividade direcional conforme mostra a figura 1.13. Nesta figura, os dispositivos de proteção D1 e D2 são equipados com as funções de proteção direcional. Caso a corrente elétrica flua do barramento para o cabo elétrico de alimentação, a proteção direcional será ativada.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.13 – Exemplo de aplicação da proteção direcional.

No caso da falta no ponto 1 conforme ilustrado, somente a função de proteção direcional do dispositivo D1 deverá ser ativada, sendo que a proteção direcional do dispositivo D2 não deverá reconhecer esta falta, em função da sua direção de detecção de corrente elétrica. Desta forma, a proteção direcional de D1 isolará uma das extremidades de alimentação do barramento.

Diferentemente, caso a falta ocorra no ponto 2, nenhum dos dispositivos de proteção D1 e D2 deverá atuar pela função de proteção direcional devido ao sentido de fluxo da corrente. Neste caso, outras funções de proteção deverão ser previstas para proteção do barramento. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008)

Este tipo de proteção para atendimento ao objetivo da seletividade é de emprego simples e comumente aplicado nos casos de alimentação envolvendo circuitos em paralelo. Além disto, pode ser também aplicado em casos de sistemas em malha fechada.

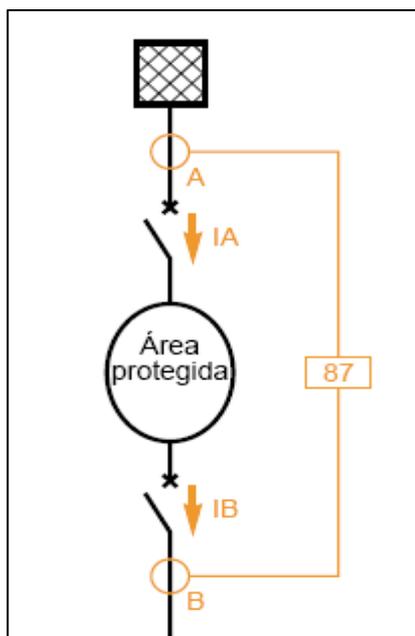
Um inconveniente na sua aplicação é a necessidade da utilização de transformadores de potencial (TP) para fornecer uma referência de fase para detecção da direção da corrente elétrica.

### **1.3.5 SELETIVIDADE POR PROTEÇÃO DIFERENCIAL**

A característica que define este tipo de proteção é o monitoramento da corrente nas duas extremidades da região do sistema sob monitoração, realizando uma comparação tanto de amplitude quanto de ângulo de fase das correntes de entrada e saída da região sob controle (zona de proteção).

Portanto, qualquer diferença entre estas correntes é indicativo da presença de alguma falta na região monitorada, sendo que para qualquer evento fora desta região, esta proteção não deve atuar. Desta maneira, a proteção diferencial possui na sua essência a característica da seletividade, ou seja, esta proteção é seletiva por natureza.

Neste caso, conforme mostrado pela figura 1.14, o *trip* instantâneo é provocado quando  $I_A - I_B \neq 0$ .



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.14 – Princípio da proteção diferencial.

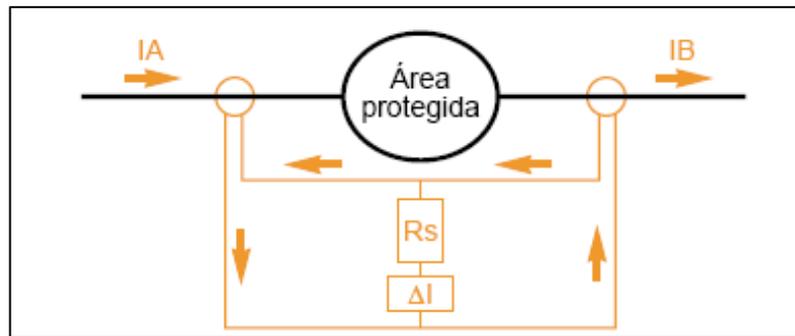
Para que seja possível o funcionamento adequado da proteção diferencial, é necessária a utilização de transformadores de corrente (TCs) dedicados e especificados para este fim, de tal forma que esta proteção torne-se insensível à ocorrência de distúrbios elétricos fora da área protegida.

A chamada estabilidade da proteção diferencial é garantida quando a mesma for capaz de permanecer insensível quando não ocorrer falha interna na zona protegida, mesmo nas circunstâncias em que uma corrente diferencial for detectada. Estas situações podem ocorrer nas seguintes condições:

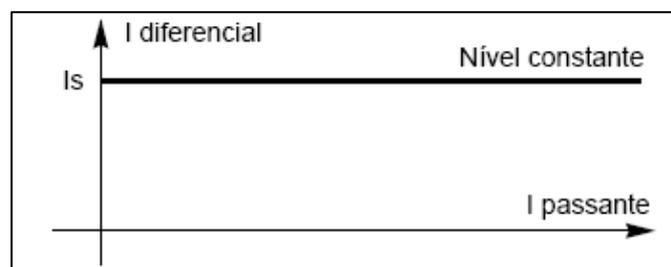
- Corrente de magnetização de transformador;
- Corrente capacitiva da linha;
- Corrente de erro devido à saturação dos transformadores de corrente.

Com base na literatura técnica, sabe-se que a estabilização da proteção diferencial é obtida a partir de dois princípios (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008):

- Proteção diferencial de alta impedância: ocorre quando o relé é conectado em série com uma resistência de estabilização  $R_s$  no circuito diferencial conforme demonstrado nas figuras 1.15 e 1.16, respectivamente.

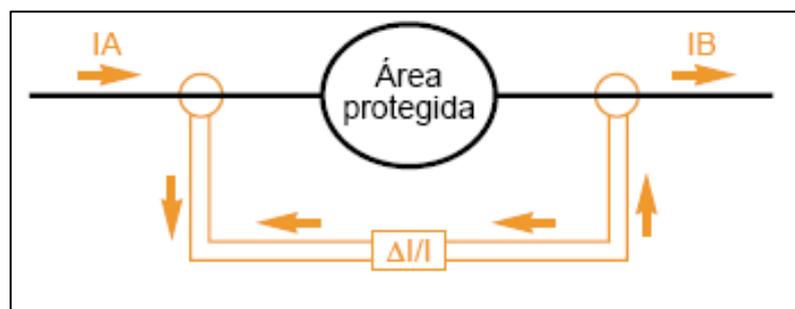


Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
 Figura 1.15 – Proteção diferencial de alta impedância.

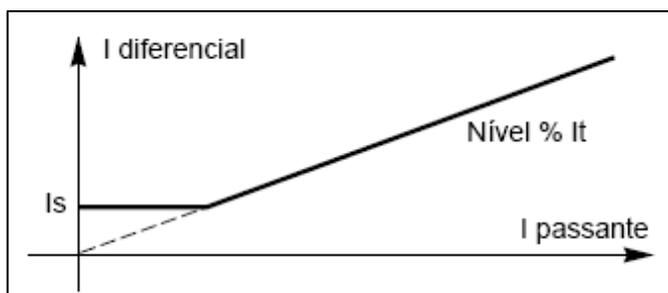


Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
 Figura 1.16 – Estabilidade por resistência.

- Proteção diferencial percentual: neste modo o relé é conectado de maneira independente aos circuitos das correntes IA e IB, sendo que a diferença das correntes  $I_A - I_B$  é definida na proteção e a obtenção da estabilidade da proteção é através de uma restrição relativa ao valor da corrente passante, conforme pode ser visto nas figuras 1.17 e 1.18.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
 Figura 1.17 – Proteção diferencial percentual.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
 Figura 1.18 – Estabilidade por restrição.

Com relação aos aspectos particulares de definição da utilização de cada tipo, ressalta-se na seqüência as suas vantagens e desvantagens::

- Proteção diferencial de alta impedância
  - Os transformadores de corrente (TCs) a montante e a jusante devem ter correntes nominais primárias e secundárias idênticas;
  - O cálculo da resistência externa é realizado para não disparar por uma falha externa por um TC saturado e também para que o TC possa alimentar o relé;
  - O relé é relativamente simples, mas requer a utilização da resistência de estabilização  $R_s$ .
  
- Proteção diferencial percentual: deve ser realizada uma avaliação da adaptação ao tipo de equipamento a ser protegido, como por exemplo, o transformador. Neste caso, o relé é relativamente mais complicado, mas a sua utilização é mais simples.

Um dos pontos positivos para a utilização da proteção diferencial é que esta é sensível às correntes de falta que são inferiores às correntes nominais dos equipamentos protegidos. Outro ponto forte é que como esta proteção é intrinsecamente seletiva, a sua atuação pode ocorrer instantaneamente. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008)

Por outro lado, os complicadores para utilização desta proteção dizem respeito ao custo da instalação, que neste caso é elevado, exigindo uma quantidade de

dispositivos específicos para tal aplicação, além da necessidade de se prever uma função de proteção de *backup* de sobre-corrente para complementar a proteção elétrica da região protegida.

A proteção diferencial é destacadamente utilizada para proteção de equipamentos prioritários do sistema elétrico, normalmente sendo os maiores equipamentos elétricos da instalação, como transformadores, geradores, grandes motores, linhas de transmissão e barramentos.

### 1.3.6 SELETIVIDADES COMBINADAS

Uma seletividade combinada é aplicada quando se deseja uma otimização do sistema de proteção da instalação, em função de deficiências das seletividades simples e/ou quando é necessário aumentar a confiabilidade do sistema de proteção, devido à importância dos equipamentos envolvidos e/ou priorização da continuidade de suprimento da energia elétrica.

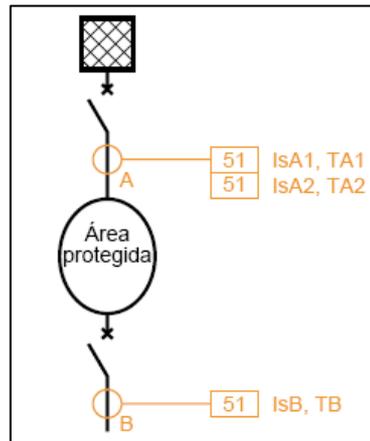
Neste contexto, existem diversos exemplos de aplicação prática utilizando alguns tipos de seletividade combinada:

- **Seletividade Amperimétrica + Cronométrica**

Nesta aplicação são utilizadas as duas seletividades já comentadas anteriormente. As figuras 1.19 e 1.20 ilustram através do esquema e gráfico esta combinação. Assim tem-se a seguinte configuração da seletividade:

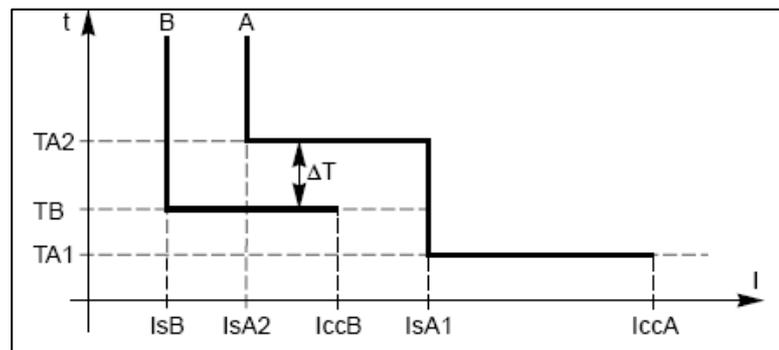
- Seletividade amperimétrica entre as funções de proteção A1 e B;
- Seletividade cronométrica entre as funções de proteção A2 e B.

Desta forma consegue-se, neste exemplo, uma seletividade completa com a proteção A garantindo a retaguarda da proteção B.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.19 – Seletividades amperimétrica + cronométrica.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.20 – Relação gráfica entre as seletividades.

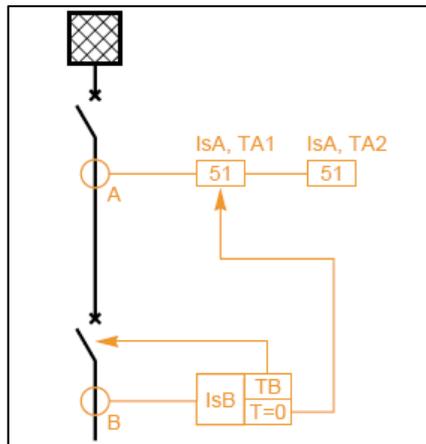
- **Seletividade Lógica + Cronométrica (*backup*)**

As figuras 1.21 e 1.22 demonstram o esquema combinado envolvendo a seletividade lógica e cronométrica.

Para esta aplicação, utiliza-se a seletividade cronométrica como retaguarda para uma possível falha da seletividade lógica. Neste caso tem-se a seguinte configuração da seletividade:

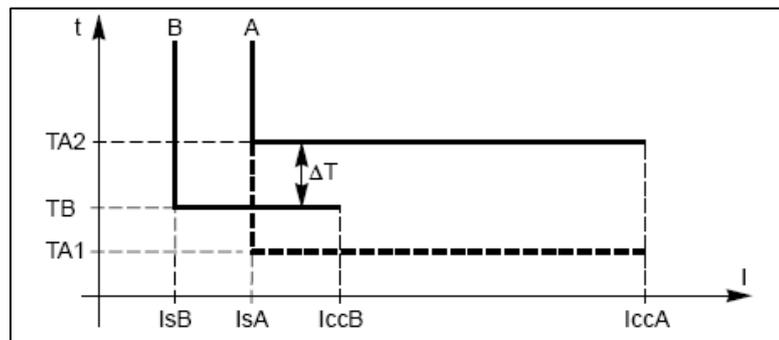
- Seletividade lógica entre as funções de proteção A1 e B;
- Seletividade cronométrica entre as funções de proteção A2 e B;

Para este caso, a proteção A2 garante a retaguarda (*backup*) da proteção B caso a proteção A1 venha a falhar.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.21 – Seletividade lógica + cronométrica.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

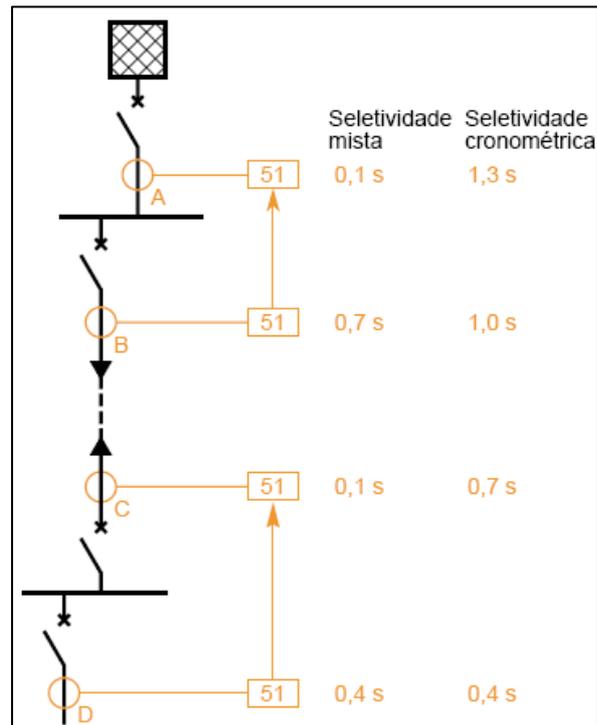
Figura 1.22 – Representação da seletividade lógica + cronométrica.

### • Seletividade Mista (Lógica + Cronométrica)

Neste tipo de seletividade busca-se aplicar as seletividades lógica e cronométrica envolvendo subestações distantes, alternando-se a aplicação das duas filosofias. A configuração para este exemplo de topologia é apresentada na figura 1.23, onde observa-se:

- Seletividade lógica nas subestações (A e B em uma subestação e C e D em outra subestação);
- Seletividade cronométrica entre duas subestações (B e C, com  $TB = TC + \Delta T$ ).

Assim não é necessária a transmissão de dados entre subestações distantes, que é uma desvantagem da seletividade lógica, e conforme se pode observar na figura 1.23, ainda há uma redução substancial na temporização do desligamento em relação à seletividade cronométrica. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2008)



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.23 – Comparação da seletividade mista/cronométrica.

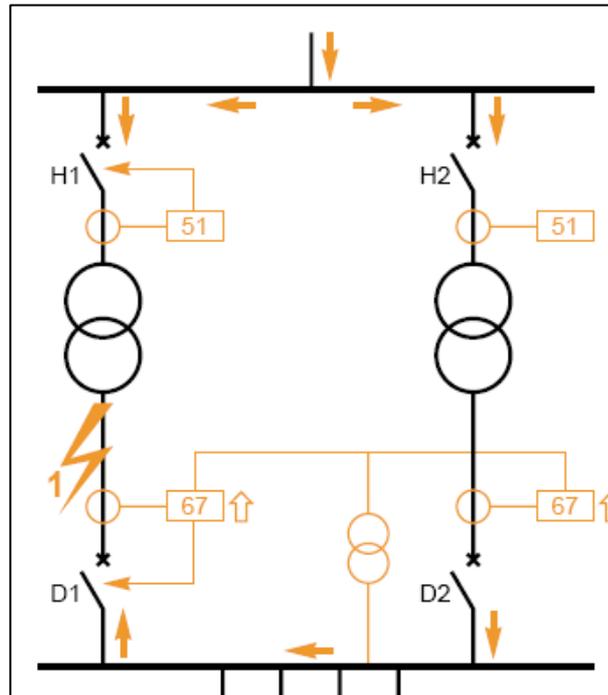
- **Seletividade Cronométrica + Direcional**

Nos casos em que se têm barramentos e/ou linhas de transmissão alimentadas em paralelo pela mesma fonte de alimentação, exige-se a aplicação da proteção direcional para isolamento de umas das extremidades em caso de ocorrência de falta no sistema, conforme já descrito anteriormente.

Utilizando-se a combinação das seletividades cronométrica e direcional, obtém-se o isolamento do trecho defeituoso, primeiramente pela proteção direcional, e finalmente com a proteção de sobre-corrente de *backup* (seletividade cronométrica).

Neste exemplo de aplicação da seletividade combinada (direcional + cronométrica), conforme mostrada pela figura 1.24, as proteções D1 e D2 são equipadas com proteções direcionais com curta temporização, e as proteções H1 e H2 são equipadas com proteções de sobre-corrente temporizadas. Exemplificando, em caso de falta no ponto 1, somente as proteções em D1, no caso a função direcional, e as proteções H1 e H2 serão sensibilizadas. A proteção em D2 não reconhece a falta no ponto 1 devido à direção da corrente.

Imediatamente após a ocorrência da falta, a proteção em D1 (direcional) atua, dessensibilizando por consequência, a proteção em H2 e instantes após a proteção em H1 comanda abertura do disjuntor correspondente. Desta forma, o trecho em falha H1-D1 é isolado do sistema.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
Figura 1.24 – Seletividade direcional + cronométrica.

- **Seletividade Lógica + Direcional**

Este tipo de aplicação é utilizado quando se tem o acoplamento de dois barramentos e também para os sistemas em malha fechada.

Neste caso o disparo dos comandos de bloqueio por parte da seletividade lógica é definido pela orientação dos fluxos de corrente da falta (direcional).

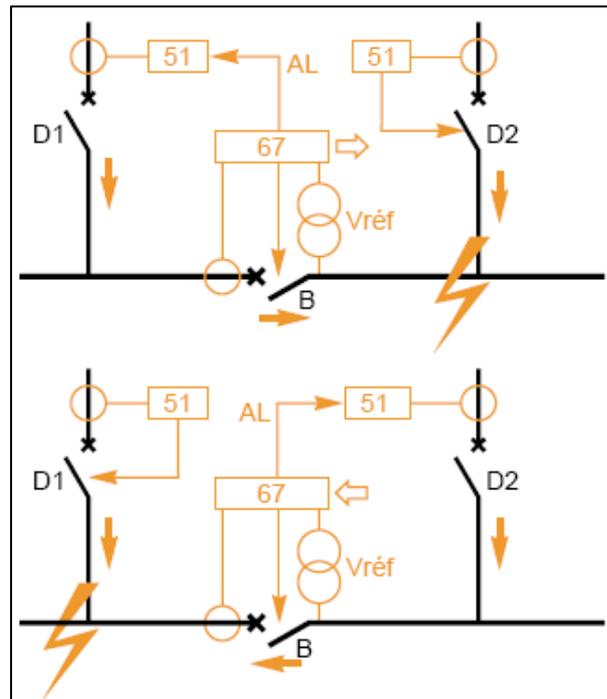
Esta aplicação pode ser vista através da figura 1.25, podendo-se assim detalhar a atuação do exemplo proposto:

- **Falha no lado da proteção em D2:**

São abertos os disjuntores B e D2, sendo D2 sensibilizada por uma sobrecorrente temporizada e a proteção B fazendo seletividade pela proteção direcional. A proteção em D1 conjugada com a proteção B (direcional) será bloqueada por comando lógico (seletividade lógica).

– **Falha no lado da proteção em D1:**

É realizada a abertura dos disjuntores via proteção em D1 (sobre-corrente temporizada) e em B (direcional). O disjuntor em D2 será bloqueado pela seletividade lógica via proteção direcional em B.



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008  
 Figura 1.25 – Seletividade lógica + direcional.

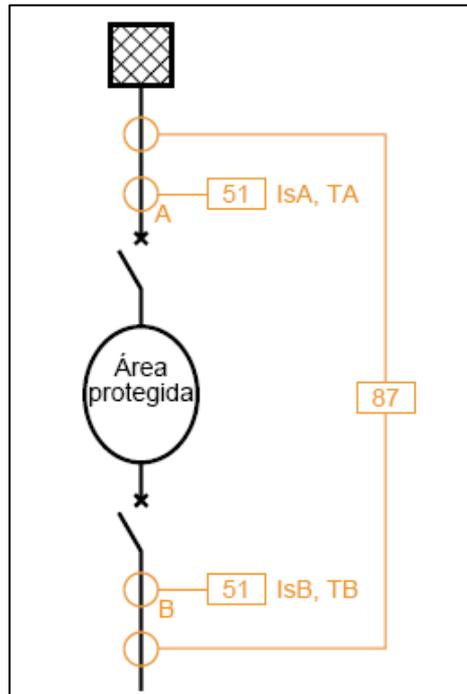
• **Seletividade Diferencial + Cronométrica**

Esta combinação é utilizada para uma aplicação específica de proteção de retaguarda (*backup*) da seletividade diferencial através da seletividade cronométrica, usando a função de sobre-corrente temporizada.

Através da figura 1.26 pode-se ilustrar esta aplicação. Neste caso verifica-se o seguinte esquema de seletividade:

- Uma proteção diferencial instantânea para proteção do transformador;
- Uma proteção de sobre-corrente de fase ou terra em A como *backup* da proteção diferencial;
- Uma proteção de sobre-corrente em B para proteger a região situada a jusante;

- Uma seletividade cronométrica entre as proteções em A e B, sendo  $T_A = T_B + \Delta T$ .



Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC, 2008

Figura 1.26 – Seletividade diferencial + cronométrica.

## 1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados os principais fundamentos do sistema de proteção no quesito seletividade, apresentando-se de uma forma didática, os principais conceitos necessários para o bom entendimento do assunto.

Nos capítulos subseqüentes, o foco do trabalho será dedicado essencialmente à seletividade lógica.

## **2 - FORMAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA SELETIVIDADE LÓGICA**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Considerando que o foco deste trabalho é a avaliação da aplicação da seletividade lógica, serão abordadas neste capítulo as suas principais formas de implementação, apresentando-se as diversas opções existentes atualmente, levando-se em consideração os recursos disponíveis associados ao hardware, topologias possíveis e recursos de lógicas operacionais.

Portanto, o objetivo deste capítulo é fornecer subsídios para a boa compreensão dos futuros capítulos, onde será feita uma análise comparativa, de forma qualitativa, da aplicação entre a seletividade convencional e a seletividade lógica.

Serão discutidos os meios físicos de interligação dos relés de proteção, conhecidos atualmente por *IEDs* (*Intelligent Electronic Devices*), pela sua maior abrangência de funções, passando pela utilização do tradicional fio de cobre (sistema fiado), através dos contatos elétricos secos, disponíveis nas entradas e saídas digitais dos relés de proteção, chegando finalmente às redes de comunicação.

Na parte referente à implementação das redes de comunicação entre os *IEDs*, serão apresentadas as formas de interligação possíveis (topologias) e os dispositivos dedicados para a sua operacionalidade.

### **2.2 IMPLEMENTAÇÃO DA SELETIVIDADE LÓGICA**

Quando são discutidas as formas de implementação da seletividade lógica, esta análise pode ser direcionada tanto para a implementação relacionada aos meios físicos disponíveis quanto aos modelos lógicos, tratados neste caso pelas lógicas booleanas, utilizadas pelos fornecedores. No caso dos modelos lógicos, particulares de cada fabricante, a abordagem será simplificada por se tratar de assunto específico de desenvolvimento de engenharia de cada fabricante. Entretanto, observa-se pelas pesquisas que há algo em comum entre os fornecedores, pois

especificamente na aplicação da seletividade lógica, não há variações significativas a serem implementadas que possam gerar ganhos expressivos no seu desempenho.

Portanto, a abordagem neste tópico será direcionada aos meios físicos de interligação, desde o tradicional fio de cobre às redes de comunicação, comentando-se sobre as suas particularidades, chegando-se aos tipos de topologias de interligação dos dispositivos de proteção e de rede.

### **2.2.1 INTERLIGAÇÃO POR FIO DE COBRE (SISTEMA FIADO)**

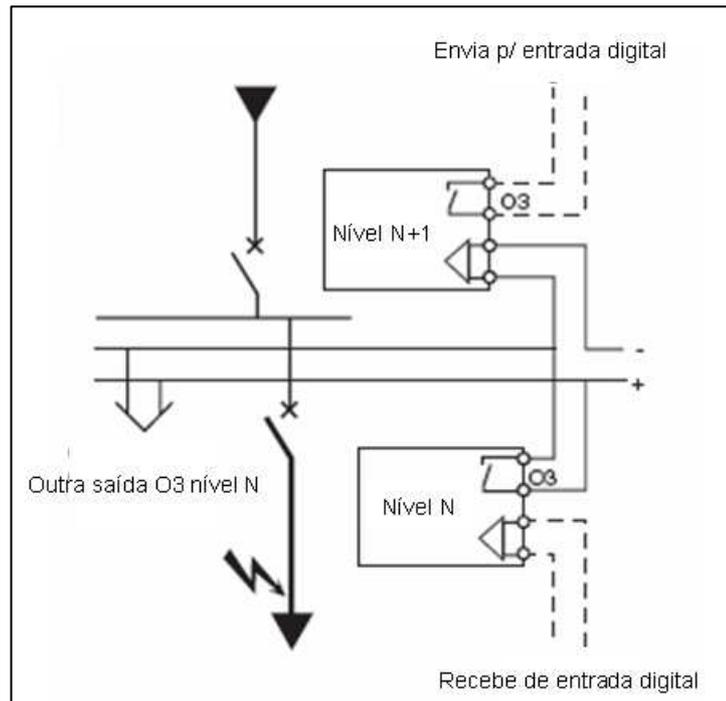
Este é o meio físico mais tradicional utilizado para interligação dos dispositivos de proteção, sendo a primeira forma que foi utilizada para a aplicação da seletividade lógica.

Embora apresente a simplicidade típica dos circuitos de interligação de dispositivos via fio de cobre, além de um menor custo de aquisição de equipamentos (*IEDs* e dispositivos de rede), este sistema é muito limitado quanto ao aspecto do monitoramento e supervisão de falhas.

A limitação de monitoramento e supervisão diz respeito ao desconhecimento e/ou falta de informações/alarmes de alguma falha oculta inserida no sistema, onde pode-se citar: problemas de interrupção e/ou conexões elétricas do circuito de interligação; falha nos contatos elétricos ativados pelas entradas e saídas digitais.

No tocante ao aspecto de esforço de engenharia, na implantação de novos projetos, a configuração utilizando fio de cobre exige uma maior demanda por parte dos engenheiros de proteção, do ponto de vista da quantidade de interligações para aplicação da seletividade lógica, por se tratar neste caso de pontos individuais de entradas e saídas digitais. Conseqüentemente, esta forma de aplicação da seletividade lógica também exige maior volume de cabos elétricos de interligação.

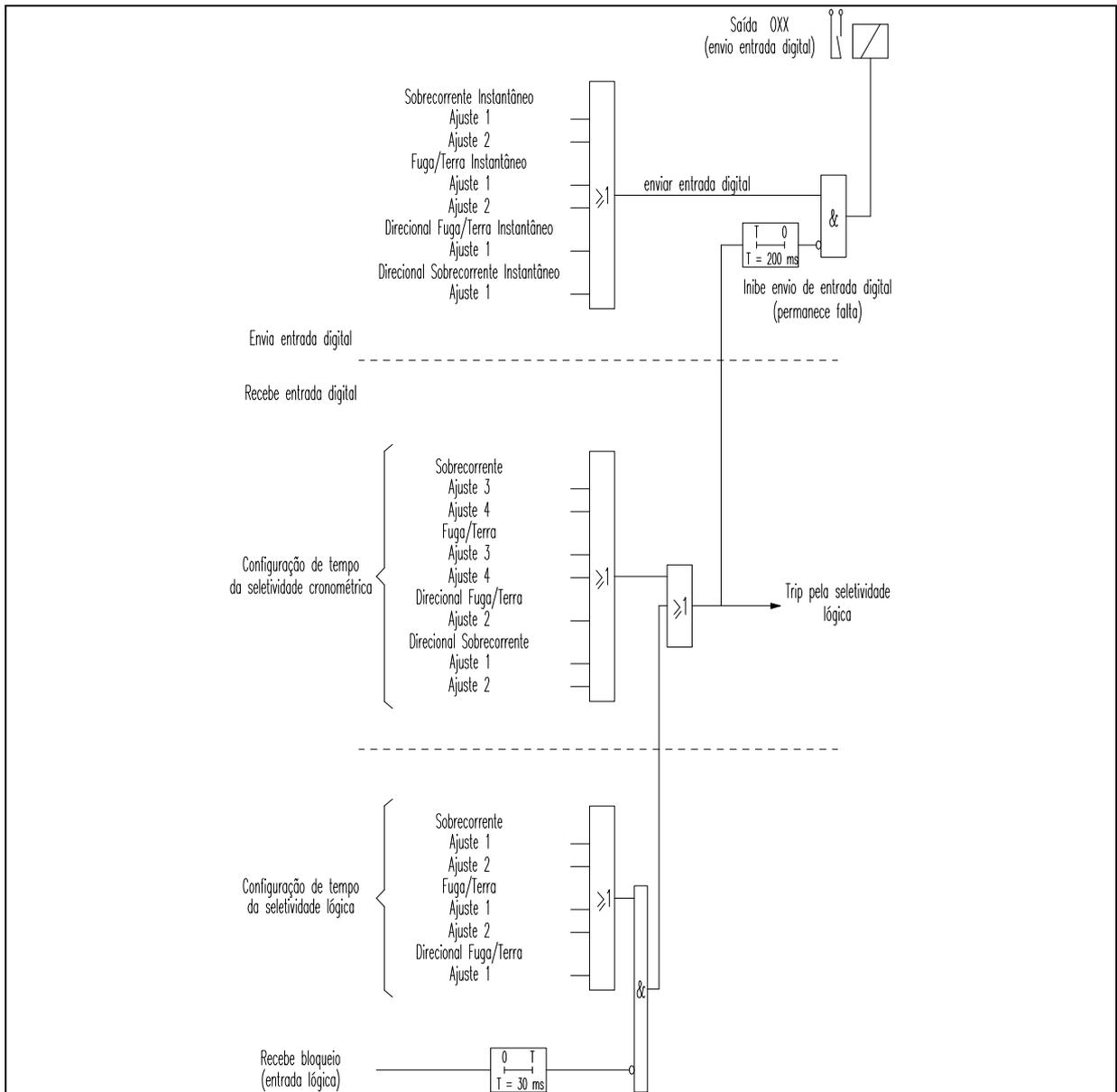
A figura 2.1 exemplifica a aplicação da seletividade lógica através do sistema fiado, onde pode-se observar o comando de bloqueio do disjuntor a montante sendo realizado pelo contato seco do relé a jusante, por meio da saída O3 do IED (MERIN GERIN, 2006).



Fonte: MERLIN GERIN, 2006

Figura 2.1 – Aplicação da seletividade - sistema fiado.

A figura 2.2 mostra uma aplicação típica da seletividade lógica com o sistema fiado (via contato elétrico). Observa-se pelo diagrama de blocos a recepção do sinal de bloqueio da seletividade lógica a ser confirmada para uma duração de 30 ms, sendo processado internamente nos blocos lógicos do *IED*. O processamento da lógica irá definir conforme pode ser visto a liberação do sinal de bloqueio deste *IED* para o nível à montante, sendo feita esta comunicação através do contato seco da saída O3 do *IED* conforme mostrado na figura 2.1. (MERLIN GERIN, 2006).



Fonte: MERLIN GERIN, 2006

Figura 2.2 – Diagrama lógico típico da seletividade lógica no sistema fiado.

Do ponto de vista prático, a implementação da seletividade lógica através do sistema fiado, utilizando-se as saídas e entradas digitais dos relés de proteção, necessita-se da interligação do contato de cada relé de proteção individualmente, ou seja, do relé a jusante para o relé a montante. Desta forma, não se deve utilizar multiplicadores de contatos do relé de proteção mais a jusante para os relés de proteção a montante, devido à vulnerabilidade que se imputará ao sistema, visto que na falha do relé mais a jusante, provocará uma falha geral na seletividade lógica.

## 2.2.2 INTERLIGAÇÃO ATRAVÉS DE REDES DE COMUNICAÇÃO

Através da engenharia de software, foram desenvolvidos protocolos de comunicação que possibilitam a interação de dispositivos através das redes de comunicação. Portanto, através destas redes, é possível estabelecer a aplicação da seletividade lógica, além de outras funções relativas ao sistema de proteção.

Na área de redes de comunicação, existem basicamente duas formas de interação dos dispositivos, quais sejam:

- Através de transmissão serial;
- Através de transmissão paralela.

A transmissão serial é o processo de transmissão de dados que é realizado bit a bit de uma mensagem, de forma seqüencial, daí o seu nome, enquanto a transmissão paralela possui a vantagem de transmitir mais dados (bits) simultaneamente, porém de forma mais onerosa e com maior dificuldade técnica.

Entretanto, para a aplicação em proteção elétrica, é utilizada a transmissão serial, por se apresentar mais simples de ser implementada, pois a transmissão paralela exige maior controle de sincronismo na transmissão dos dados, além de maior custo com cabos de comunicação.

Seguem listados abaixo alguns padrões utilizados na aplicação da transmissão serial:

- Padrão RS-232 (baixa velocidade, implementada em portas seriais);
- Padrão RS-485;
- Padrão USB - *Universal Serial Bus* (velocidade moderada);
- Padrão *FireWire* (alta velocidade);
- Padrão Ethernet (tecnologia de interconexão para redes locais - LANs).

Na indústria, os padrões mais utilizados são o RS-232, RS-485, USB e a Ethernet, sendo que a utilização das redes de comunicação via Ethernet está cada vez mais em destaque, em função da popularização associada à sua utilização em escritórios e residências, devido ao seu baixo custo e facilidade de interação através do uso

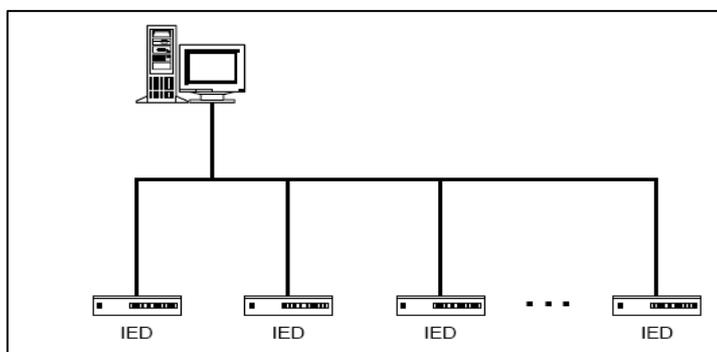
mundial da internet. Assim, dentro deste cenário, os especialistas cada vez mais estão desenvolvendo os seus projetos para utilização das redes Ethernet em ambientes industriais, incluindo na aplicação da automação das subestações e de concessionárias de energia elétrica (WOODWARD, 2001).

Deve-se ressaltar que a rede Ethernet não foi criada para aplicação em automação de subestações elétricas, entretanto, devido ao seu grande emprego em outros campos, definiu-se pela sua utilização apesar de existir algumas limitações.

A figura 2.3 ilustra a aplicação de uma instalação utilizando uma topologia de rede de comunicação para um sistema de proteção.

Alguns meios físicos de interligação dos dispositivos são utilizados para aplicação das topologias em redes de comunicação, destacando-se:

- Cabo coaxial;
- Cabo de par trançado;
- Cabo de fibra ótica.



Fonte: WOODWARD, 2001

Figura 2.3 – Aplicação de um sistema em rede de comunicação.

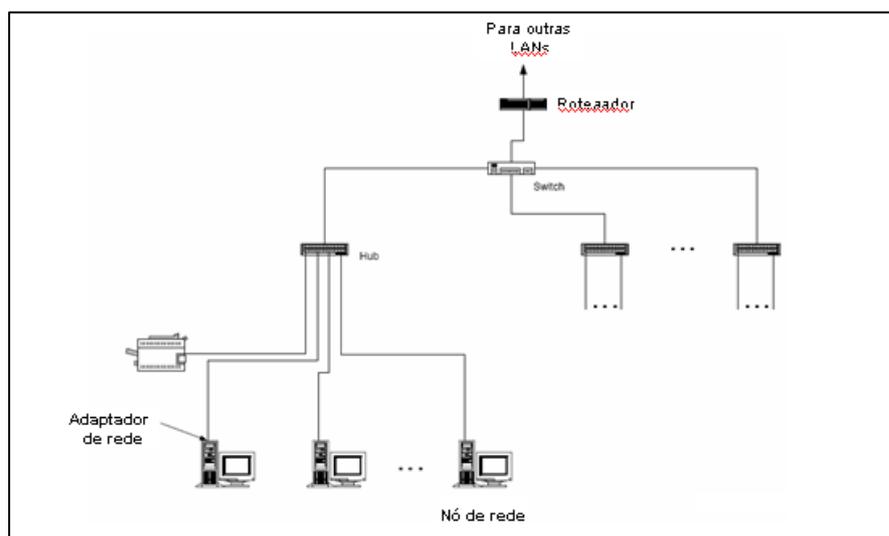
## 2.3 REDES DE COMUNICAÇÃO ETHERNET

Com o objetivo de se obter um melhor entendimento da aplicação das redes de comunicação em sistemas elétricos, será feita uma abordagem dedicada à aplicação das redes Ethernet na automação de subestações, detalhando-se sobre os meios físicos e performance das topologias disponíveis.

### 2.3.1 COMPONENTES DAS REDES ETHERNET

Na composição de uma rede de comunicação Ethernet existem dispositivos que interagem com os elementos principais da instalação (*IEDs*) para oferecer maior eficiência e confiabilidade ao sistema.

Apresenta-se na figura 2.4 uma topologia típica para uma rede Ethernet com seus componentes (WOODWARD, 2001)



Fonte: WOODWARD, 2001

Figura 2.4 – Componentes típicos de uma rede Ethernet.

Na sequência, serão fornecidos alguns conceitos de dispositivos utilizados nas redes:

- **Nó de Rede**

É um dispositivo de rede qualquer responsável pelo processamento inteligente de dados ou geração de dados (*IED*, roteador ou adaptador de rede). Segundo a sua aplicação, estes nós podem ser classificados como mestres ou escravos, clientes ou servidores e dispositivos.

- **Adaptador de Rede**

Todo dispositivo de rede deve possuir um mecanismo de interface física com a rede Ethernet, sendo que esta interface tipicamente é denominada de adaptador ou cartão de interface da rede. Mesmo que esta interface já esteja inserida no

dispositivo de rede, é necessária a sua existência para possibilitar sua interação na rede.

- **HUB**

Dispositivo que atua como cabo tronco numa rede semelhante com cabo coaxial, repetindo todos os dados provenientes da rede para o restante dos nós, operando na camada física no modelo de rede OSI, sendo que um *hub* pode se comunicar com outro *hub*, chave ou roteador.

O *hub* é considerado uma forma fácil e barata de comunicar vários dispositivos em uma rede Ethernet, sendo que uma desvantagem é que este dispositivo é considerado passivo, ou seja, caso algum dispositivo da rede envie dados errados de forma contínua, o *hub* repetirá estes dados para todos os nós da rede.

Uma vantagem do *hub* é que ele é considerado menos complexo do que os outros dispositivos com funções semelhantes, sendo mais confiável.

- **Chave (switch)**

Dispositivo multiplexador inteligente que monitora os dados recebidos em uma porta determinando a sua disposição, operando na camada de enlace de dados (*Data Link*) do modelo de rede OSI.

A chave possui uma vantagem em relação ao *hub*, pois caso exista algum problema num pacote de dados (incompleto ou indecifrável), a chave ignora este pacote e não o retransmite para a rede. No caso de um pacote de dados intacto, a chave retransmite estes dados para a rede, baseada no dado de endereçamento incluso no pacote e os endereços correspondentes de cada porta da chave.

Operando da forma descrita, a chave reduz bastante o risco de colisão de mensagens na rede, fazendo com que o funcionamento da rede se torne mais eficiente e determinístico.

Apesar de sua maior complexidade, a chave apresenta-se menos confiável do que os *hubs*, entretanto o melhor desempenho da rede compensa esta deficiência.

- **Roteador**

Dispositivo multiplexador inteligente utilizado para conectar duas redes. Este dispositivo opera na camada de Rede (*Network*) do modelo de rede OSI.

O roteador tem como característica ignorar o tráfego de dados intra-segmento e direcionar o tráfego inter-segmento para o segmento apropriado.

Caso programados, poderão atuar como dispositivos de segurança de rede (barreira *firewall*), evitando acessos não autorizados.

- **Servidor**

Dispositivo responsável pela coleta e criação de uma base de dados da rede da subestação elétrica, coletando e armazenando os dados dos dispositivos da rede, sendo acessadas estas informações via uma interface homem-máquina (IHM). Este dispositivo opera na camada de Aplicação (*Application*) do modelo de rede OSI.

- **Mídia**

Grande parte das redes Ethernet utiliza atualmente as seguintes mídias (SCHEER & DOLEZILEK, 2007):

- Base T: conexões de par trançado de cobre
- Base F: cabos de fibra ótica

O Quadro 2.1 ilustra a especificação de algumas formas de mídias e as velocidades de comunicação disponíveis atualmente.

Especificação	Velocidade	Mídia	Padrão
10/100 BASE-T	10 ou 100Mbps	Par trançado de cabo de cobre CAT-5	IEEE 802.3u
100 BASE-FX	100Mbps	Fibra ótica com onda de 1300 nm	IEEE 802.3u
1000 BASE-T	1Gbps	Par trançado de cabo de cobre CAT-5, CAT5e ou CAT6	IEEE 802.3ab
1000 BASE-SX	1Gbps	Fibra ótica multimodo com onda de 850 nm	IEEE 802.3z
1000 BASE-LX	1Gbps	Fibra ótica monomodo com onda de 1270 a 1355 nm	IEEE 802.3z

Fonte: SCHEER & DOLEZILEK, 2007

**QUADRO 2.1 – Aplicação de mídias e suas velocidades de comunicação.**

### 2.3.2 MODELO DA CAMADA OSI

Para uma boa compreensão da forma como os dados são processados na rede Ethernet, foi criado um modelo denominado Modelo de Sete Camadas ou *Open Systems Interconnect* (OSI) pela *International Standards Organization*. Este modelo faz a representação tanto do hardware (conexão física) quanto do software (transição das informações) no processamento dos dados pela rede Ethernet, demonstrando como é realizada a ligação de um nó individual (dispositivo de rede), sendo que cada camada executa tarefas de acordo com funções específicas (WOODWARD, 2001).

Visando melhor compreensão deste mecanismo, a figura 2.5 mostra uma representação da camada OSI com a interligação entre dois nós (dispositivos) de rede.

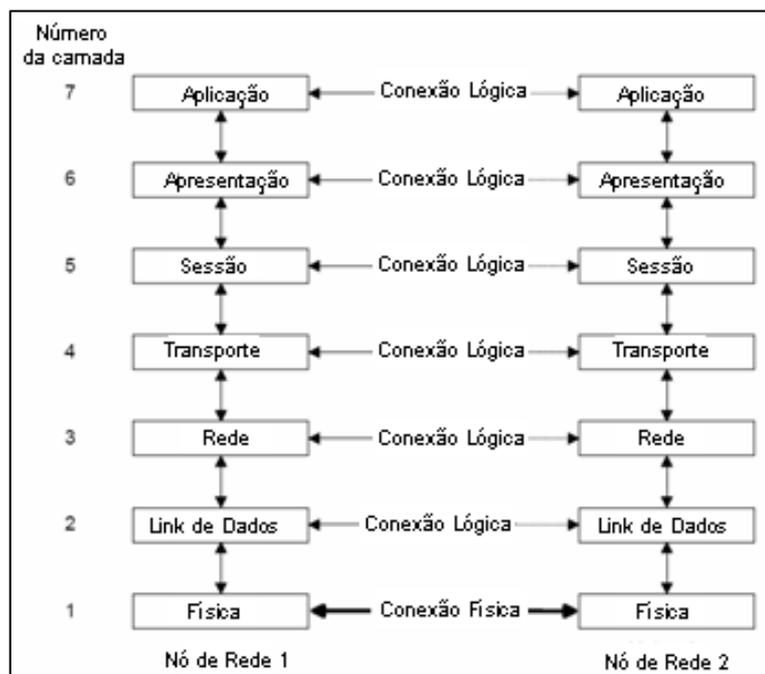
Quando da transmissão de uma informação de um nó para outro nó, por exemplo, do nó 1 para o nó 2 (IED1 para IED2), os dados são inseridos pela camada responsável por determinada função, partindo-se da camada superior (camada 7) até a camada inferior (camada 1) do nó 1. Esta última camada é o meio físico responsável pela entrega da informação ao nó 2. Observa-se que no nó 2 ocorre o fluxo contrário, com cada camada retirando o seu dado correspondente até chegar à camada superior, sendo assim disponibilizado para aplicação ao usuário.

Atualmente os padrões da rede Ethernet são regidos pela norma 802/3 do IEEE, sendo as redes Ethernet definidas pelas duas últimas camadas do modelo OSI: a camada física (*Physical*) e de enlace de dados (*Data Link*) (WOODWARD, 2001).

#### 2.3.2.1 Camada Física e de Enlace de Dados do Modelo OSI

Existe um identificador para as camadas físicas e de enlace de dados, e de acordo com a aplicação e necessidade, a rede Ethernet pode variar a sua velocidade de transmissão, sendo tipicamente utilizadas as velocidades de transmissão de dados de 10 e 100 Mbps. Ainda quanto ao meio físico, pode-se utilizar tanto o cabo de par trançado quanto cabo de fibra ótica, além do cabo coaxial. Assim, este identificador

define a rede Ethernet como sendo como exemplo 10BASE-T e 100BASE-TX, definindo redes de 10 e 100 Mbps, respectivamente, e utilizando cabo de par trançado. Atualmente é mais frequente a utilização dos cabos de fibra ótica, como exemplo com a identificação de 10BASE-FL e 100BASE-FX (WOODWARD, 2001).



Fonte: WOODWARD, 2001

Figura 2-5 – Representação da camada OSI para dois nós de rede.

Para aplicações em geral da rede Ethernet, as velocidades de 10 e 100 Mbps são as mais utilizadas, sendo que já existem aplicações com velocidades na casa dos gigabits por segundo.

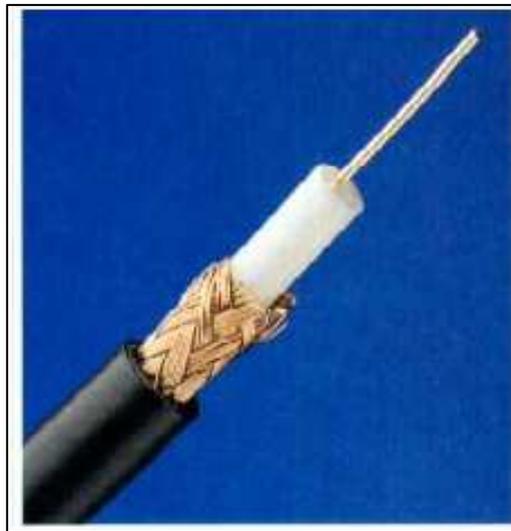
Na seqüência será comentado mais detalhadamente sobre os meios físicos (camada inferior) utilizados nas redes Ethernet.

- **Cabo Coaxial**

A rede Ethernet original foi colocada em operação utilizando-se cabo coaxial com uma velocidade de transmissão de 2,94 Mbps. Na época, com a deficiência da tecnologia de fabricação deste tipo de cabo, foi utilizado um cabo pesado e de grande seção. Com o desenvolvimento da tecnologia, possibilitou-se a redução nas dimensões do cabo, e conseqüentemente menor custo e maior viabilidade.

Este tipo de cabo é composto por diversas camadas concêntricas de condutores e isolantes conforme figura 2.6, justificando o nome coaxial, sendo a sua velocidade máxima de transmissão de 10Mbps.

As redes com a utilização de cabo coaxial são as verdadeiras redes conhecidas como multiponto, com o cabo tronco conectando cada nó ao nó seguinte da rede, sendo que cada nó da rede acessa o cabo tronco principal via um dispositivo de derivação.



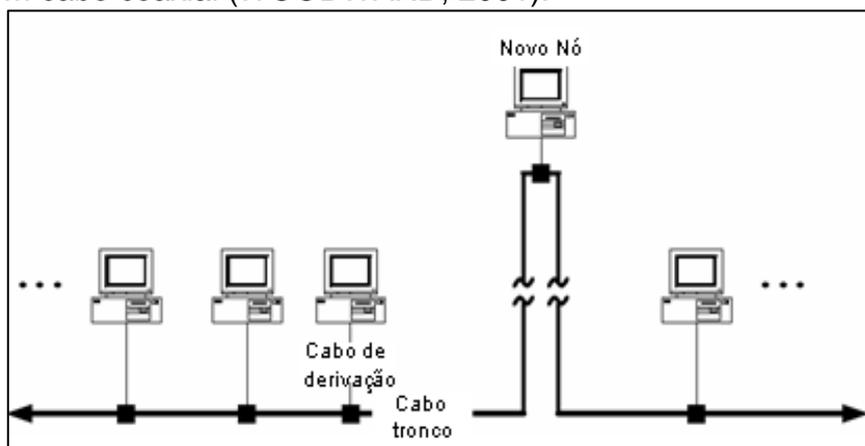
Fonte: MORIMOTO, 2008

Figura 2.6 – Formação de um cabo coaxial.

As redes com cabo coaxial apresentam destacadamente duas grandes desvantagens na sua utilização. Primeiramente, caso haja um dano e/ou falha em alguma seção do cabo, os sistemas de cabo multiponto podem entrar em falha.

Em segundo lugar, caso seja necessária a inclusão de novos nós na rede com cabo coaxial, este procedimento apresenta um custo considerável e de certa dificuldade.

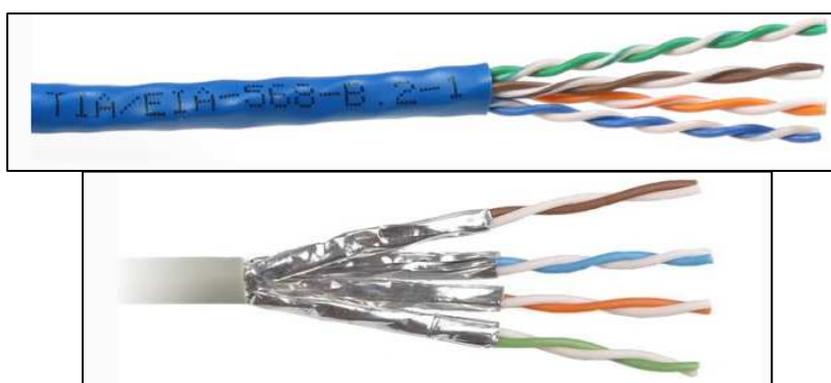
Diante destas considerações, o cabo coaxial não está mais sendo considerado nos projetos atuais. A figura 2.7 ilustra a dificuldade de inclusão de novo nó de rede em sistemas com cabo coaxial (WOODWARD, 2001).



Fonte: WOODWARD, 2001  
Figura 2.7 – Adicionando um novo nó na rede com cabo coaxial.

- **Cabo de Par Trançado**

Também conhecido do inglês como *twisted pair*, consiste num feixe de dois fios que são entrelaçados conforme figura 2.8, reduzindo assim o efeito das interferências eletromagnéticas de fontes externas e interferências mútuas entre cabos próximos. A quantidade de giros (voltas) por metro de comprimento do cabo de par trançado, faz parte da especificação deste cabo e impacta na redução dos ruídos.



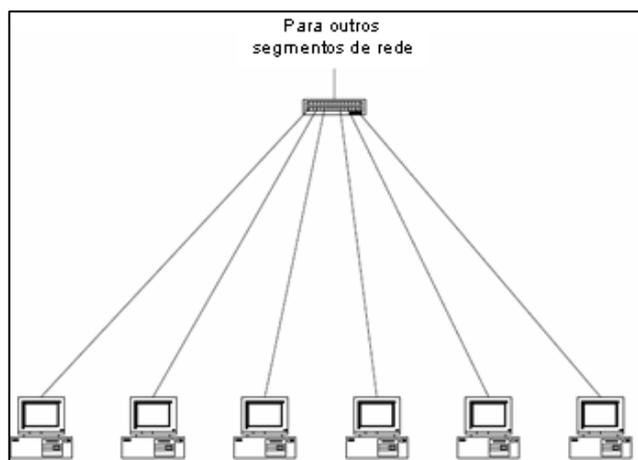
Fonte: MORIMOTO, 2008  
Figura 2.8 – Cabo de par trançado com quatro pares.

Este sistema, comumente utilizado para as linhas telefônicas, já traz um diferencial em relação aos sistemas com cabo coaxial. Os sistemas de telefonia já operavam bem antes da utilização de redes de comunicação para outras aplicações, incluindo a automação de subestações elétricas. Assim sendo, quando da possibilidade da utilização deste sistema para esta aplicação, já houve uma maior facilidade por ser uma tecnologia de domínio público (WOODWARD, 2001).

As redes Ethernet com cabo de par trançado utilizam a configuração em estrela, em que os nós da rede são conectados a um nó central. Este nó central (hub) é semelhante à atuação do cabo tronco com cabo coaxial. O hub tem como tarefa a recepção da conexão de todos os nós periféricos da rede, formando uma rede única.

Posteriormente, foram desenvolvidos outros dispositivos para melhorar a performance da rede.

A figura 2.9 ilustra a configuração da topologia de rede em estrela, característica de uma rede com cabo de par trançado.



Fonte: WOODWARD, 2001

Figura 2.9 – Rede Ethernet com topologia em estrela.

Os cabos de par trançado são classificados em categorias segundo a normalização, sendo que estas categorias são caracterizadas pela capacidade de perdas e outros fatores como as frequências de operação necessárias para atendimento às redes digitais de alta velocidade.

Foram desenvolvidas nove categorias para este tipo de cabo, sendo que atualmente somente são recomendadas três categorias (CAT3; CAT5e; CAT6) segundo a EIA (*Electronic Industries Alliance*) e a TIA (*Telecommunications Industries Association*). Nesta classificação normalizada, a categoria CAT3 vigora como a categoria inferior que suporta o cabo tipo 10BASE-T, sendo a categoria CAT5e a utilizada para aplicação em velocidades de 1 Gbps e aplicada em rede de telefonia digital. A máxima velocidade de transmissão alcançada com cabo de par trançado é com a utilização do cabo de categoria CAT 6e, conseguindo-se 10Gbps (WOODWARD, 2001).

Estas mesmas normas permitem a utilização de cabo de par trançado sem blindagem, conhecidos como cabo UTP (*Unshielded Twisted Pair*), que são os cabos tipicamente utilizados na rede telefônica. Estes cabos podem ser aplicados normalmente num ambiente comercial e residencial para a telefonia, entretanto, não

são indicados para aplicação em redes de comunicação em ambiente industrial, como em subestações e concessionárias de energia elétrica, onde a exigência é maior com relação às interferências eletromagnéticas.

Para estes casos, devem ser tomadas algumas ações de bloqueio, e principalmente serem utilizados cabos com uma blindagem específica, chamados de cabos de par trançado tipo STP (*Shielded Twisted Pair*). Este tipo de cabo é que realmente deve ser aplicado numa instalação industrial e em concessionária de energia elétrica, tendo em vista o rigor exigido pela instalação e a criticidade da aplicação (WOODWARD, 2001).

- **Cabo de Fibra Ótica**

Filamento de vidro ou de materiais poliméricos (plástico) capaz de transmitir ondas eletromagnéticas (luz), sendo as mais utilizadas ondas de gama infravermelha. As fibras feitas de vidro são as mais indicadas tecnicamente por absorverem menos as ondas eletromagnéticas. A figura 2.10 ilustra um conjunto de fibra ótica.

Este tipo de tecnologia de cabo de transmissão de dados é o mais eficiente do ponto de vista de imunidade às interferências de rádio frequência (RFI), cada vez mais presentes num ambiente industrial e de concessionária de energia elétrica. Este fato passa a ser primordial nestes tipos de aplicação, principalmente quando a confiabilidade da comunicação é o fator preponderante.

Outro fator diferencial da fibra ótica é que esta pode ser empregada em instalações externas à sala de controle, por apresentar uma característica dielétrica segura, não se tendo riscos de danificar equipamentos situados nos extremos da rede de comunicação por algum tipo de contato físico com potencial elétrico.

A aplicação da fibra ótica é semelhante ao do cabo de par trançado, onde uma fibra é utilizada para transmitir um sinal e a segunda fibra para receber outro sinal, sendo que o sistema de fibra ótica exige igualmente um nó central ou *hub*, combinando os segmentos de cabos de fibra ótica para formar uma rede lógica.



Fonte: MORIMOTO, 2008  
Figura 2.10 – Fibra ótica.

As velocidades de transmissão com a fibra ótica atualmente podem chegar até 10 Gbps.

Deve-se ressaltar que com relação ao aspecto custo, o sistema de fibra ótica é mais oneroso do que o sistema com cabo de par trançado, tanto com relação aos cabos quanto aos dispositivos de rede, como hubs, adaptadores de rede e outros dispositivos. Entretanto, devem ser considerados os custos exigidos em ações de blindagem e instalação do cabo de par trançado. Somente após esta avaliação, pode-se concluir a respeito do custo, sendo que em algumas aplicações, o custo com cabo de par trançado pode suplantando o custo com sistema de fibra ótica. Porém, em aplicações onde a confiabilidade é essencial e a proteção de equipamentos críticos é importante, o possível custo adicional do sistema de fibra ótica é compensador.

## **2.4 CONFIABILIDADE DAS FORMAS DE IMPLEMENTAÇÃO**

Um dos critérios de comparação do desempenho das formas de implementação de um sistema de proteção é a confiabilidade oferecida pelo mesmo visando a continuidade do serviço.

Para o caso específico de implementação através de redes Ethernet, além deste fator comparativo, existem outros que irão definir a topologia e a seleção de recursos tecnológicos para um determinado sistema. Abaixo são citados alguns destes fatores:

- Taxas efetivas de transmissão de dados;
- Custo de aquisição, instalação e comissionamento dos equipamentos;
- Facilidade e custo de manutenção e de expansão;
- Flexibilidade para uso do *IED* desejado sem limitações por questões da rede;
- Facilidade e custo de incorporação de dispositivos ao se inserir uma rede nas instalações já existentes.

Pode-se observar que estes fatores não são totalmente independentes, visto que, como exemplo, o custo de manutenção tem uma relação de dependência com o fator confiabilidade.

Visando melhor compreensão sobre a confiabilidade das redes de comunicação, serão abordados na seqüência alguns conceitos relativos a este assunto (SCHEER & DOLEZILEK, 2007).

- **MTTR** : Tempo médio para detectar e reparar uma falha no sistema.
- **MTTF**: Tempo médio para ocorrência de uma falha.
- **MTBF**: Tempo médio entre falhas, sendo definido pela soma dos tempos MTTR e MTTF. No caso dos dispositivos de redes de comunicação, o fator MTTF é bem maior do que o MTTR, sendo neste caso considerado o MTTF igual aproximadamente ao MTBF.
- **Indisponibilidade**: É a probabilidade de que um dispositivo não esteja disponível para executar as tarefas vitais para operação de uma rede. É calculada pela relação direta entre o MTTR e o MTBF.

Para avaliação da confiabilidade dos sistemas, através das informações das indisponibilidades individuais dos dispositivos, seja na forma de rede de comunicação ou sistema fiado, é utilizado o recurso da árvore de falhas para se calcular a indisponibilidade de um sistema.

Para isto, utilizam-se portas OU (*OR*) para somar as indisponibilidades de quaisquer dos dispositivos que possa provocar a falha do sistema, e também as portas E

(AND) para realizar o produto das indisponibilidades dos dispositivos quando todas as falhas necessitam ocorrer simultaneamente para que o sistema venha a falhar.

Os fabricantes de dispositivos informam em seus catálogos dados médios de MTBF e indisponibilidade segundo o Quadro 2.2 (SCHEER & DOLEZILEK, 2007; WOODWARD, 2001).

Observa-se que os valores de indisponibilidade dos dispositivos são bastante pequenos, oferecendo uma confiabilidade relativamente alta para os sistemas. Neste quadro são apresentados valores comparativos de desempenho dos dispositivos utilizados em aplicações industriais e comerciais.

Componente	MTBF (anos)	Indisponibilidade (x10 <sup>-6</sup> )
Interface de Rede do IED	20	274
Relé de Proteção/Hardware do IED	100	55
Switch Ethernet Industrial Dupla Fonte	106	52
Switch Ethernet Industrial	57	96
Roteador Ethernet Industrial	40	137
Roteador Ethernet Comercial	9,5	577
Roteador Ethernet Comercial Dupla Fonte	35	156
Switch Ethernet Comercial	11,5	477
Hub Ethernet	119	46
Servidor Industrial	14	391
Servidor Comercial	4	1370

Fonte: SCHEER & DOLEZILEK, 2007; WOODWARD, 2001

**QUADRO 2.2 – Valores de indisponibilidade de dispositivos de rede.**

Para esta análise, buscou-se como referência uma instalação real de uma subestação elétrica de 138/69 kV composta dos seguintes equipamentos:

- 29 disjuntores;
- 84 relés de proteção;
- 84 interfaces Ethernet aplicados aos relés de proteção;
- 02 processadores de comunicação com portas EIA-232 serial para Ethernet contendo 23 dispositivos de supervisão de equipamentos sem recurso para Ethernet (identificado como GW no diagrama da figura 2.11);
- 01 servidor baseado em computador industrial como IHM e para outros clientes de dados;
- 01 roteador para conexão da LAN da subestação a uma rede do sistema (WAN).

Esta instalação é composta por sistema principal e de retaguarda referente aos relés de proteção.

Particularmente, nesta análise, não foi considerada a influência de alguns itens como as baterias da subestação, os transformadores de instrumentação e erros de escavação dos cabos de fibra ótica, por serem comuns em todas as topologias de rede. Da mesma forma, não foi considerado o impacto de falhas no software, pelo mesmo motivo citado anteriormente e também devido à dificuldade de se quantificar este tipo de falha.

Diante destas considerações, a seguir serão avaliadas as topologias de redes de comunicação e sistema fiado (SCHEER & DOLEZILEK, 2000; SCHEER & MOXLEY, 2005).

#### **2.4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE TOPOLOGIAS DE REDES ETHERNET**

Este tópico visa fornecer informações das topologias apresentadas com relação à sua confiabilidade quando se necessita realizar uma comunicação direta entre os relés de proteção através de redes Ethernet. É o caso típico da aplicação da seletividade lógica, pois através da comunicação entre os relés de proteção que são enviados os bloqueios lógicos para a execução da seletividade.

Na impossibilidade de se realizar a comunicação entre relés de proteção, concluí-se que haverá falha na seletividade lógica por deficiências nos componentes da topologia em questão.

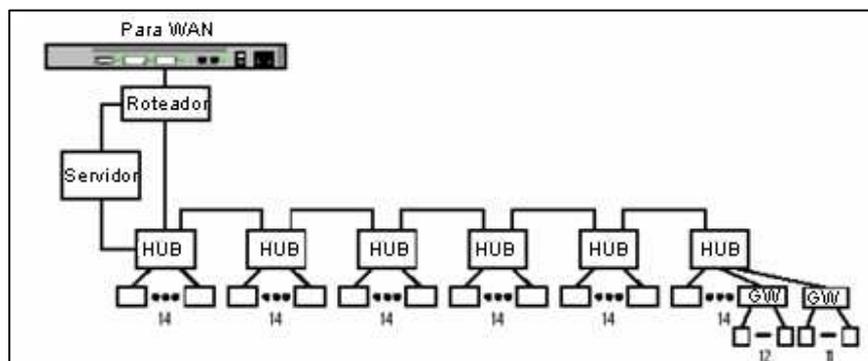
O evento superior na análise de uma árvore de falha para este caso é a impossibilidade de comunicar dados de proteção relé com relé, considerando os componentes e conexões que podem falhar dentro dos links Ethernet no trajeto de comunicação entre os relés de proteção. Também devem ser considerados todos os segmentos possíveis que definem o trajeto de comunicação entre os dois relés.

- **LAN de HUB Compartilhado**

A topologia de uma rede LAN de subestação Ethernet utilizando Hubs compartilhados pode ser vista na figura 2.11 (SCHEER & DOLEZILEK, 2000).

Os *IEDs* são representados pelas caixas vazias (sem texto) e as caixas identificadas com GW representam as portas para os *IEDs* de supervisão dos equipamentos da subestação.

Para esta topologia, a avaliação dos sistemas de proteção principal e de retaguarda, inclui dois relés de proteção quaisquer com as suas interfaces Ethernet, sendo que as falhas referentes a estas interfaces com os dois relés de proteção resultam numa indisponibilidade de  $658 \times 10^{-6}$ , igualmente para o sistema principal e de retaguarda, sendo a indisponibilidade combinada neste caso de  $0,433 \times 10^{-6}$ .



Fonte: SCHEER E DOLEZILEK, 2000

Figura 2.11 – Topologia de uma rede com hubs compartilhados.

Considerando a influência dos 6 hubs com indisponibilidade de  $46 \times 10^{-6}$  cada e 86 falhas de transmissão com indisponibilidade de  $11 \times 10^{-6}$  cada, gerando uma indisponibilidade global de  $1222 \times 10^{-6}$ . Assim, para esta topologia, consegue-se uma disponibilidade de 99,8778% ( $1 - 1222 \times 10^{-6}$ ).

A parcela referente à falha de transmissão diz respeito a uma possível tempestade de dados que poderá ocorrer com a utilização de hubs no sistema.

A figura 2.12 ilustra esta situação através do diagrama de árvore de falha, sendo que vale para os casos seguintes o mesmo tipo de raciocínio para o cálculo das disponibilidades por topologia.

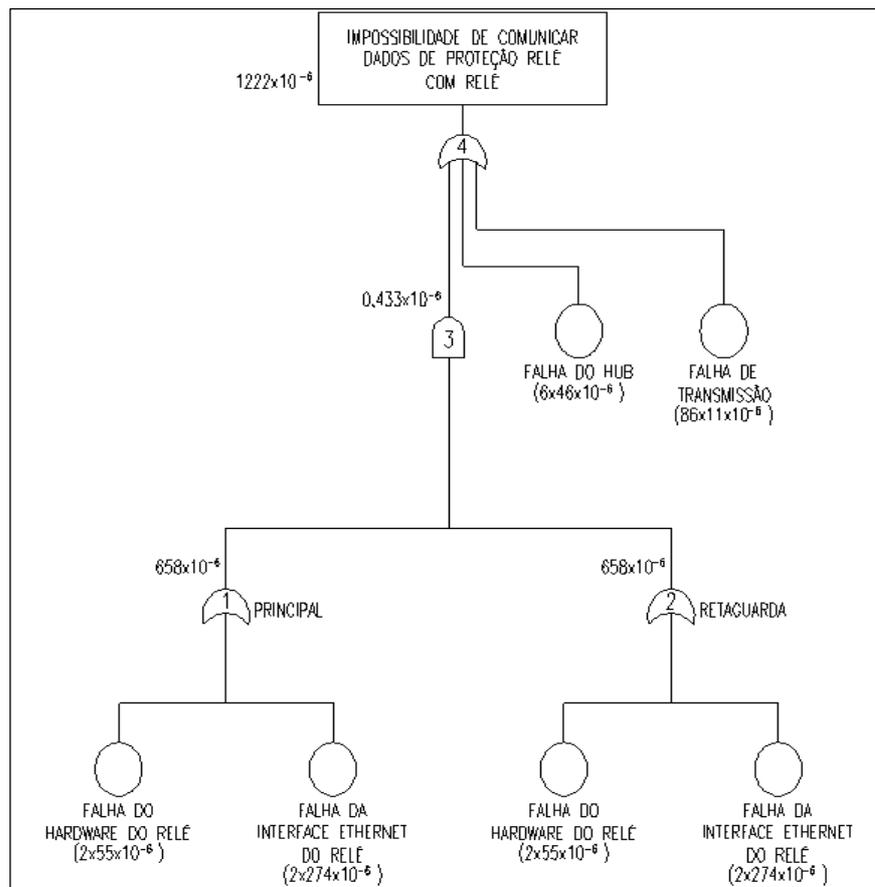


Figura 2.12 – Árvore de falhas para hubs compartilhados.

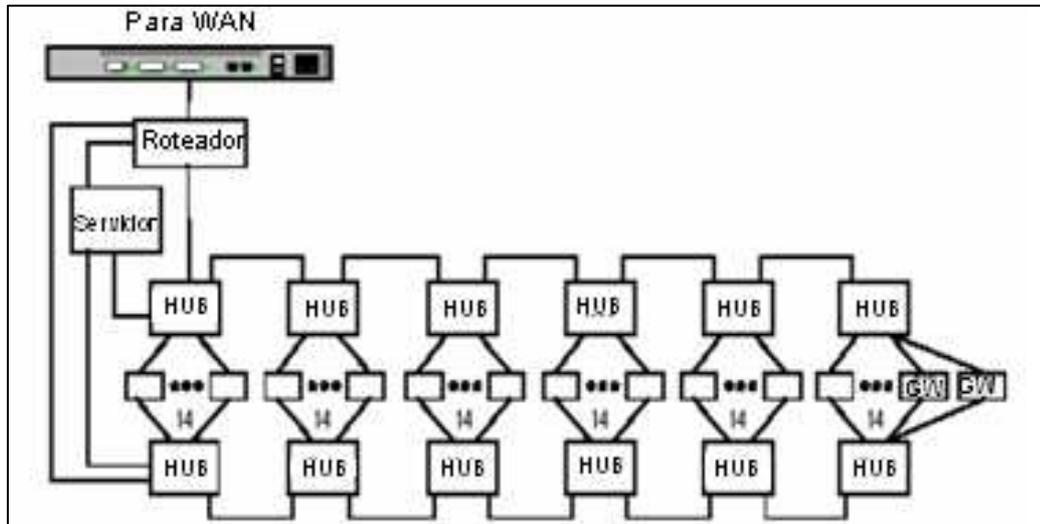
- **LAN Chaveada**

Com a mesma topologia apresentada na figura 2.11, apenas os hubs sendo substituídos pelas chaves, os sistemas de proteção principal e de retaguarda incluem os dois relés de proteção e suas interfaces Ethernet, tendo-se uma indisponibilidade separada de  $680 \times 10^{-6}$ , e combinada de  $0,462 \times 10^{-6}$ . Considerando-se as indisponibilidades das 6 chaves, resulta numa indisponibilidade global de  $2862 \times 10^{-6}$ , tendo-se neste sistema uma disponibilidade de 99,7138%. Observa-se que embora este sistema não tenha a influência da parcela por falha de transmissão, ainda assim apresenta uma confiabilidade menor do que o sistema por hubs compartilhados, isto devido ao impacto da disponibilidade menor das chaves em relação aos hubs (SCHEER & DOLEZILEK, 2000).

- **LAN de Hub Compartilhado Redundante**

Buscando-se uma maneira de se incrementar a confiabilidade de uma rede, estruturou-se esta topologia através da redundância dos hubs. Desta forma, serão

necessárias duas falhas para que não se consiga atingir o objetivo de comunicar dois relés de proteção quaisquer. A figura 2.13 detalha esta topologia (SCHEER & DOLEZILEK, 2000).



Fonte: SCHEER & DOLEZILEK, 2000

Figura 2-13 – Sistema com compartilhamento redundante de hubs.

Neste caso, os itens de impacto da disponibilidade para comunicação entre os relés de proteção dos sistemas de proteção principal e de retaguarda são dois relés de proteção, representados pela indisponibilidade de  $2 \times 55 \times 10^{-6}$ , e pelas falhas de transmissão das suas interfaces Ethernet, representada pela indisponibilidade de  $2 \times 73 \times 10^{-6}$ , resultando numa indisponibilidade combinada do sistema de proteção de  $0,430 \times 10^{-6}$ .

A formação das redes primária e de retaguarda é de 6 hubs para cada uma ( $6 \times 46 \times 10^{-6}$ ) e com falhas de transmissão para 86 IEDs ( $0,9999 \times 86 \times 11 \times 10^{-6}$ ), resultando numa indisponibilidade de  $1222 \times 10^{-6}$ , sendo que a indisponibilidade combinada das redes principal e de retaguarda é de  $1,49 \times 10^{-6}$ .

Este sistema consegue oferecer uma indisponibilidade total combinada de  $1,92 \times 10^{-6}$ , correspondente a uma disponibilidade global de 99,9998%.

- **LAN de Chave Compartilhada Redundante**

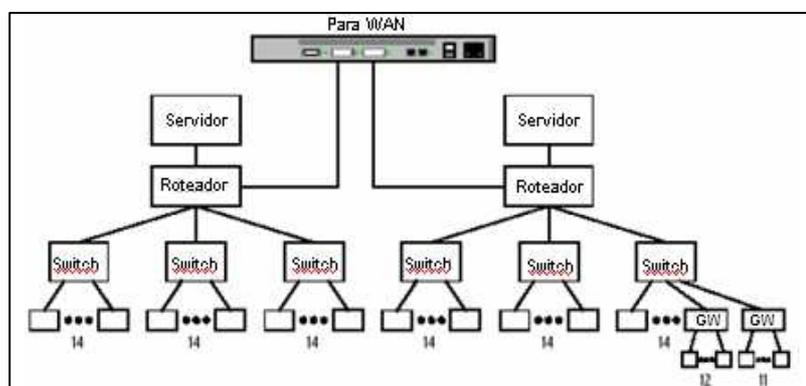
Esta topologia é semelhante ao caso anterior, apenas os hubs sendo substituídos pelas chaves, ou seja, a topologia é semelhante à apresentada na figura 2.13.

Os sistemas de proteção principal e de retaguarda possuem cada um dois relés de proteção ( $2 \times 55 \times 10^{-6}$ ) e as suas interfaces Ethernet ( $2 \times 285 \times 10^{-6}$ ), gerando uma indisponibilidade de  $680 \times 10^{-6}$ , obtendo-se uma indisponibilidade combinada do sistema de proteção de  $0,462 \times 10^{-6}$ .

A rede principal e de retaguarda possui cada uma 6 chaves ( $6 \times 477 \times 10^{-6}$ ), resultando numa indisponibilidade combinada de  $8,19 \times 10^{-6}$ . Para este caso obtém-se uma indisponibilidade combinada total de  $8,65 \times 10^{-6}$ , representando uma disponibilidade de 99,9991% (SCHEER & DOLEZILEK, 2000).

- **Servidores, Roteadores e LAN Chaveada Redundantes**

No aspecto do projeto de engenharia da rede, pode-se realizar redundância na parte referente à rede de comunicação, através de redundância do servidor e roteador conforme mostrado na figura 2.14. Observa-se uma redundância no nível de comunicação da rede através dos roteadores e servidores, com a existência de redes tipo principal e secundária de comunicação (SCHEER & DOLEZILEK, 2000).



Fonte: SCHEER & DOLEZILEK, 2000.

Figura 2.14 – Esquema com redundância no nível de comunicação da rede.

Os itens de impacto na disponibilidade para a comunicação relé a relé para os sistemas de proteção principal e de retaguarda são os dois relés ( $2 \times 55 \times 10^{-6}$ ) e as suas interfaces Ethernet ( $2 \times 285 \times 10^{-6}$ ), duas chaves ( $2 \times 477 \times 10^{-6}$ ) e um roteador ( $577 \times 10^{-6}$ ), resultando numa indisponibilidade individual de  $2211 \times 10^{-6}$ , e uma indisponibilidade combinada dos sistemas principal e de retaguarda de  $4,89 \times 10^{-6}$ , representando uma disponibilidade global deste sistema de 99,9995%.

- **Conexão Direta Relé com Relé via Rede**

Para o caso da comunicação direta entre dois relés de proteção, o sistema principal e de retaguarda incluem dois relés de proteção ( $2 \times 55 \times 10^{-6}$ ) e duas interfaces de fibra ótica dedicada ( $2 \times 10 \times 10^{-6}$ ), gerando uma indisponibilidade para cada sistema de  $130 \times 10^{-6}$ , resultando numa indisponibilidade combinada dos sistemas principal e de retaguarda de  $0,0169 \times 10^{-6}$ .

Portanto o sistema com conexão direta entre dois relés de proteção resulta numa disponibilidade de 99,9999%.

#### **2.4.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA FIADO**

Neste caso, será considerada a possibilidade da ocorrência de falha de comunicação entre dois relés de proteção interligados via fio de cobre.

Devem ser consideradas as falhas referentes ao hardware do relé de proteção ( $2 \times 55 \times 10^{-6}$ ), tanto para o sistema principal quanto para o de retaguarda, assim como possível falha da conexão do fio de cobre entre estes relés.

Segundo a referência SCHEER & MOXLEY, 2005, o valor de indisponibilidade para esta falha da conexão elétrica é definida em  $200 \times 10^{-6}$ , sendo multiplicado por 2 em função das duas extremidades de conexão entre os dois relés de proteção (contato seco).

Assim, calcula-se uma indisponibilidade de  $510 \times 10^{-6}$  para o sistema principal, culminando com o sistema de retaguarda uma indisponibilidade total de  $0,26 \times 10^{-6}$ , representando uma disponibilidade global de 99,9999%.

#### **2.4.3 CONCLUSÕES SOBRE A CONFIABILIDADE DAS TOPOLOGIAS**

Realizando-se uma avaliação rápida das informações contidas no Quadro 2.3 (SCHEER & DOLEZILEK, 2000), no primeiro momento poder-se-ia ter a impressão que um sistema composto por hubs forneceria uma disponibilidade menor em relação a outro sistema formado por chaves, visto a vulnerabilidade que o sistema com hubs possui em relação ao fenômeno chamado tempestade de dados. Porém,

este fato não ocorre em função da menor disponibilidade das chaves frente aos hubs, devido à sua maior complexidade.

Com relação ao evento superior na análise de uma árvore de falha denominado “impossibilidade de comunicar dados de proteção relé com relé”, verifica-se que o sistema em rede que apresenta a maior confiabilidade é o composto por hubs compartilhados e redundantes.

A comunicação direta relé a relé apresenta a maior confiabilidade possível dentro das opções avaliadas, igualmente para interligação com fibra ótica e sistema fiado.

Rede	Disponibilidade %	Previsão de Nº de Horas Anuais Fora de Serviço
Chaves	99,7138	25
Hubs Compartilhados	99,8778	10,7
Chaves Redundantes	99,9991	0,07
Servidores, Roteadores, Chaves Redundantes	99,9995	0,04
Hubs Compartilhados Redundantes	99,9998	0,01
Direta	99,9999	0,00014
Sistema Fiado	99,9999	0,00014

Fonte: SCHEER & DOLEZILEK, 2000

**QUADRO 2.3 – Confiabilidade entre as topologias para comunicação relé/relé.**

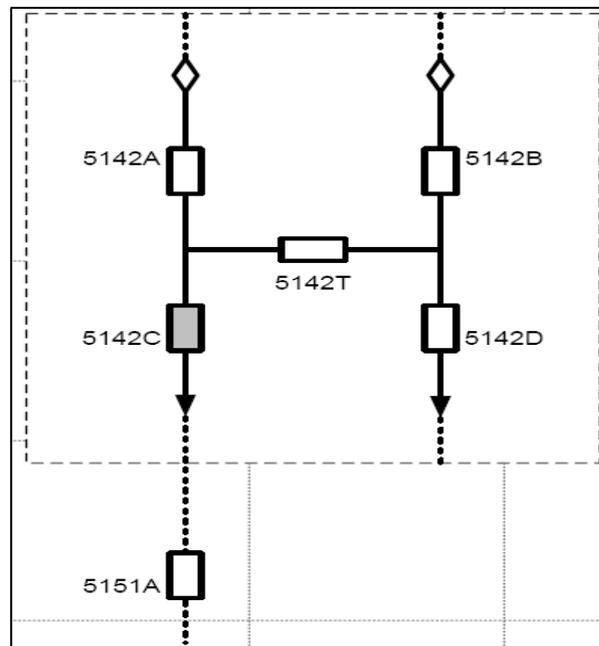
## 2.5 DIAGRAMAS LÓGICOS PARA SELETIVIDADE LÓGICA

Internamente aos *IEDs*, o processamento dos sinais para implantação da seletividade lógica é realizado através da lógica booleana.

Os diagramas lógicos visando à aplicação da seletividade lógica são de maneira geral flexíveis, estando a sua configuração condicionada à aplicação em si juntamente com a característica específica da engenharia de cada fabricante. Não existe uma topologia única ou padrão para se formar os diagramas lógicos, sendo de cada fabricante as especificidades, e caso existam, não trarão diferenciais no sentido de se obter melhorias de desempenho na implementação.

De forma ilustrativa, a figura 2.15 apresenta um diagrama constituído de cinco disjuntores da subestação 5142 e apenas um disjuntor da subestação 5151. Será avaliada a configuração da lógica de controle do disjuntor 5142C através do seu *IED*

associado, contemplando tanto a seletividade lógica quanto a função 50BF (falha do disjuntor) programada na lógica booleana inserida no *IED* de proteção do disjuntor 5142C em relação ao disjuntor 5151A (COMPERJ, 2008).

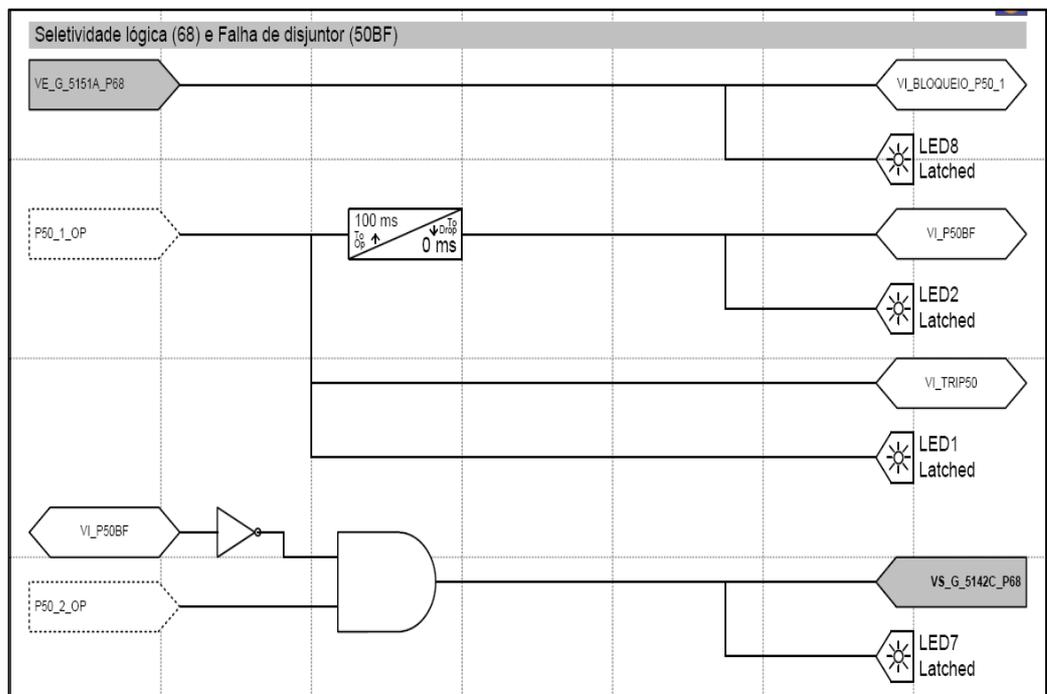


Fonte: COMPERJ, 2008.

Figura 2.15 – Interação entre os disjuntores 5151A e 5142C.

A função falha do disjuntor (ANSI 50BF) é aplicada no sentido de verificar uma falha na abertura do disjuntor quando do comando de *trip* pelo seu *IED* correspondente. Esta função busca reduzir o tempo de extinção da falta nesta condição, atuando de certa forma como uma função de *back up* da seletividade lógica.

Na figura 2.16 é mostrado o diagrama lógico correspondente (COMPERJ, 2008).



Fonte: COMPERJ, 2008  
Figura 2.16 – Diagrama lógico para as funções seletividade lógica e 50BF.

Para implementação da seletividade lógica e falha do disjuntor, são utilizados dois elementos de proteção de sobrecorrente do *IED* do disjuntor 5142C.

O primeiro elemento, denominado P50\_1, ajustado com atraso de 50 ms, é o responsável pela liberação do sinal de trip do disjuntor 5142C na ocorrência de uma falta. Já o segundo elemento (P50\_2), ajustado sem atraso, é o responsável por gerar o sinal de bloqueio do *IED* à montante.

Desta forma, a função de proteção P50\_1 é a que efetivamente atua como função de sobrecorrente, sendo a saída de operação desta função denominada de P50\_1\_OP conforme figura 2.16.

Na ocorrência de uma falta, percebida pelos elementos de proteção P50\_1 e P50\_2, e caso o *IED* do disjuntor 5142C não receba o sinal de bloqueio do *IED* à jusante, representado pela variável de entrada VE\_G\_5151A\_P68, gerando a variável interna VI\_BLOQUEIO\_P50\_1, o *IED* do disjuntor 5142C enviará comando de *trip* via a variável interna VI\_TRIP50 com o atraso de tempo configurado em 50 ms. Este tempo é o suficiente para processamento do sinal de bloqueio da seletividade lógica por parte do *IED*.

Simultaneamente, o elemento de proteção P50\_2 percebendo a ocorrência da falta, tendo a sua saída de operação denominada P50\_2\_OP, não ocorrendo ainda falha do disjuntor 5142C, envia o sinal de bloqueio para os *IEDs* dos disjuntores à montante (5142A e 5142T), representado pela variável de saída VS\_G\_5142C\_P68. Caso não ocorra a abertura do disjuntor 5142C, o temporizador contará conforme configurado um tempo de 100 ms para ativar a função falha do disjuntor, representada pela variável interna VI\_P50BF, que fará o desbloqueio dos *IEDs* à montante conforme a lógica apresentada.

Desta forma, é feita a demonstração de um diagrama lógico para aplicação da seletividade lógica e também da função 50BF, ressaltando que este é apenas um modelo de diagrama, existindo toda a flexibilidade à disposição dos usuários para esta implementação.

## **2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram apresentadas as formas disponíveis de implementação para aplicação da seletividade lógica.

Também foram apresentadas as mídias existentes de interligação dos *IEDs*, sendo a configuração via cabo elétrico de cobre (sistema fiado) a mais tradicional, utilizando-se as entradas e saídas digitais dos *IEDs*. Esta configuração é a mais confiável do ponto de vista da disponibilidade do sistema, visto que envolve somente os *IEDs* propriamente ditos.

Adicionalmente, foi apresentada uma descrição das principais redes de comunicação aplicadas à proteção e automação de subestações.

Foram apresentadas diversas topologias utilizando redes de comunicação, sendo que algumas contêm esquemas de redundâncias, que faz com que a confiabilidade do sistema seja ampliada. Obviamente a cada nível de redundância, existe um custo envolvido para sua implementação.

Finalmente, destaca-se que dentre as diversas opções de topologias existentes, a rede Ethernet é a que representa a maior tendência de aplicação na engenharia de proteção.

### 3 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DA SELETIVIDADE LÓGICA

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo deste capítulo é analisar o desempenho da seletividade lógica com relação à sua funcionalidade e velocidade da transmissão dos sinais de bloqueio que ocorre entre os *IEDs*.

Esta análise é realizada com base em algumas formas possíveis de implementação da seletividade lógica conforme visto no capítulo anterior, realizando-se uma análise comparativa entre as velocidades obtidas de transmissão de bloqueio.

Para atingir o objetivo estabelecido, serão apresentados resultados de trabalhos disponíveis na literatura técnica, com o intuito de demonstrar o desempenho de velocidade das diversas formas de implementação, desde o sistema fiado (entradas e saídas digitais dos relés de proteção) às redes de comunicação, com as mídias disponíveis de interligação entre os dispositivos de rede.

Vale ressaltar que uma grande preocupação na atualidade é a verificação do desempenho das redes de comunicação através das mensagens GOOSE com a aplicação da IEC 61850, em função ainda de ser uma forma de implementação recente em redes, tornando-se uma forte tendência atual da área de proteção. A funcionalidade e aplicação da IEC 61850 estão sendo intensamente debatidas pelos profissionais da área de proteção, por provocar uma mudança radical na interação entre os dispositivos dos próprios fabricantes e entre fabricantes diferentes (interoperabilidade).

Com o objetivo de complementar os resultados obtidos da literatura técnica, também foram realizados testes e simulações juntamente com dois fabricantes de *IEDs* que atuam no Brasil.

## 3.2 REFERÊNCIA INTERNACIONAL

Para este item serão abordados os resultados obtidos da referência (BOTZA *et al*, 2008), com o objetivo de analisar a velocidade de alguns meios físicos de comunicação, a saber:

- **Sistema fiado (via contato físico)**

Neste caso são utilizadas as entradas e saídas digitais dos relés de proteção através dos seus contatos físicos (secos) disponíveis, interligados por meio de fio de cobre comum.

- **Protocolo de comunicação serial**

São utilizadas as portas disponíveis de comunicação serial nos relés de proteção, sendo interligadas por cabo de par trançado ou fibra ótica.

- **Protocolo de comunicação Ethernet (mensagens GOOSE)**

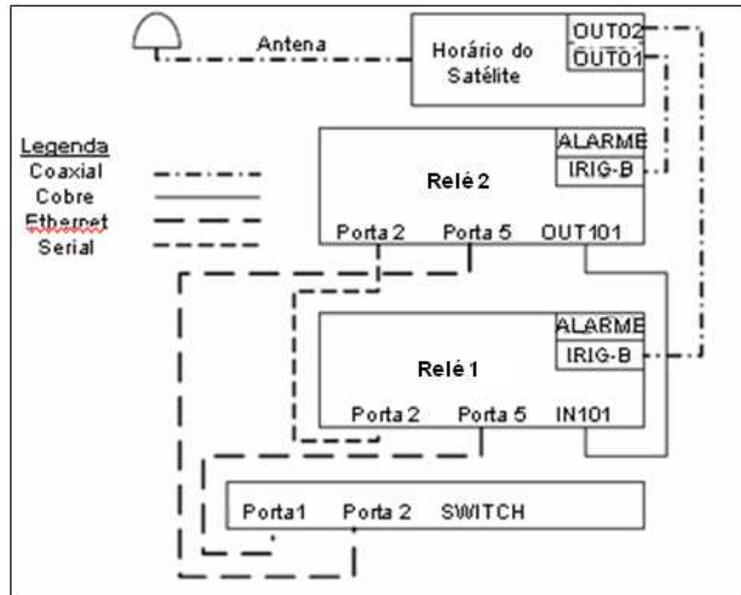
As portas Ethernet dos relés de proteção, através das suas interfaces Ethernet internas aos IEDs, disponibilizam as interligações necessárias para comunicação utilizando-se as mensagens GOOSE IEC 61850.

Na sequência serão apresentados os casos analisados para verificação das velocidades de resposta de cada sistema em particular.

### 3.2.1 Caso 1: Comunicação Relé a Relé

Para a realização dos testes foi configurada uma rede composta de 2 relés de proteção, um sistema de sincronismo de tempo entre os dispositivos de rede utilizando o protocolo IRIG-B e o sistema GPS para aferição da hora exata dos dispositivos de rede, e pequenas variações em cada cenário analisado em subestações conforme será visto na sequência. Além disto, em função da precisão de tempo necessária para os testes envolvidos, foi utilizado para registro e apresentação dos tempos o registrador seqüencial de eventos dos próprios *IEDs*, que possuem uma precisão em milissegundos.

Conforme já citado, são analisados três casos de comunicação entre os relés de proteção (direta com fio de cobre; comunicação serial; mensagens GOOSE IEC 61850) conforme mostrado na figura 3.1.



Fonte: BOTZA *et al*, 2008

Figura 3.1 – Configuração do primeiro teste de avaliação da velocidade das redes.

O Quadro 3.1 apresenta os resultados de tempo relativo a cada tipo de comunicação avaliado (BOTZA *et al*, 2008).

Neste quadro, o termo da primeira coluna “Tempo de Referência LATCH10” representa os instantes de tempo que foram iniciados (setados) cada amostragem da temporização para verificação da velocidade de resposta de cada tipo de comunicação.

O termo “Tempo de Recepção RMB1A” representa a parcela correspondente à entrada da comunicação serial dos relés de proteção, informando o tempo gasto em cada teste realizado pela comunicação serial, ou seja, o tempo correspondente para a mensagem serial sair da porta 2 do relé 1 e chegar à porta 2 do relé 2.

A parte referente ao contato físico, através de fio de cobre, é representada pelo termo constante na tabela “Tempo de Recepção IN101”, informando o tempo necessário para chegar a informação na entrada do relé de proteção 2 sendo este sinal proveniente da saída ‘OUT101’.

O termo referente à comunicação Ethernet com mensagem GOOSE IEC 61850 está representado na tabela por “Tempo de Recepção CCIN001”, informando o tempo gasto por este tipo de mensagem, cujo trajeto é chegando ao outro extremo, na porta 5 do relé de proteção 2.

A última linha deste quadro representa os tempos médios alcançados pelas três formas de comunicação.

Utilizando uma taxa de transferência de dados de 38400 bps, a comunicação serial e a comunicação com mensagens GOOSE IEC 61850 obtiveram as mesmas velocidades de transmissão de dados (em torno de 4 ms), enquanto a configuração direta com contato seco com fio de cobre foi a mais lenta (cerca de 8 ms). Para verificação da influência da taxa de transferência de dados neste mesmo teste, foi utilizada a taxa de 19200 bps, tendo-se como resultado as informações contidas no quadro 3.2.

Comparação de Performance						
Velocidade (38400 BPS)				Diferença de Tempo		
Tempo de Referência LATCH10	Tempo de Recepção RMB1A	Tempo de Recepção IN101	Tempo de Recepção CCIN001	RMB1A	IN101	CCIN001
25,637	25,641	25,645	25,641	0,004	0,008	0,004
54,291	54,295	54,300	54,295	0,004	0,009	0,004
47,291	47,295	47,300	47,295	0,004	0,009	0,004
4,393	4,395	4,402	4,395	0,002	0,009	0,002
38,545	38,552	38,554	38,550	0,007	0,009	0,005
23,720	23,725	23,729	23,724	0,005	0,009	0,004
54,795	54,800	54,804	54,799	0,005	0,009	0,004
22,497	22,500	22,501	22,504	0,003	0,004	0,007
54,297	54,300	54,306	54,300	0,003	0,009	0,003
29,074	29,081	29,078	29,081	0,007	0,004	0,007
8,775	8,779	8,783	8,779	0,004	0,008	0,004
43,200	43,204	43,208	43,204	0,004	0,008	0,004
11,827	11,831	11,835	11,831	0,004	0,008	0,004
39,227	39,231	39,235	39,231	0,004	0,008	0,004
10,152	10,156	10,160	10,157	0,004	0,008	0,005
39,729	39,733	39,737	39,733	0,004	0,008	0,004
10,004	10,008	10,012	10,010	0,004	0,008	0,006
38,254	38,258	38,262	38,260	0,004	0,008	0,006
12,306	12,308	12,315	12,312	0,002	0,009	0,006
2,931	2,933	2,940	2,937	0,002	0,009	0,006
<b>Tempo Médio (segundos)</b>				<b>0,004</b>	<b>0,00805</b>	<b>0,00465</b>

Fonte: BOTZA *et al*, 2008

**QUADRO 3.1 – Performance de velocidade entre os tipos de comunicação.**

Pode-se observar como era esperado que a comunicação serial é influenciada pela taxa de transferência de dados, ficando em média 2 ms mais lenta com relação às mensagens GOOSE, de acordo com as informações do caso anterior com 38400 bps. Observa-se que não há influência para as outras duas formas de comunicação, destacando-se a vantagem da utilização da comunicação baseada na Ethernet.

Através dos testes realizados anteriormente, verifica-se que tanto a comunicação serial como com a comunicação via mensagens GOOSE, os sistemas apresentam-se mais rápidos que via contato seco através de fio de cobre (sistema fiado).

Comparação de Performance						
Velocidade (19200 BPS)				Diferença de Tempo		
Tempo de Referência LATCH10	Tempo de Recepção RMB1A	Tempo de Recepção IN101	Tempo de Recepção CCIN001	RMB1A	IN101	CCIN001
35,905	35,911	35,913	35,909	0,006	0,008	0,004
11,432	11,438	11,440	11,436	0,006	0,008	0,004
45,732	45,738	45,740	45,736	0,006	0,008	0,004
14,457	14,461	14,465	14,461	0,004	0,008	0,004
50,459	50,465	50,467	50,463	0,006	0,008	0,004
21,259	21,265	21,267	21,263	0,006	0,008	0,004
49,134	49,142	49,142	49,138	0,008	0,008	0,004
10,686	10,690	10,695	10,690	0,004	0,009	0,004
40,613	40,620	40,622	40,618	0,007	0,009	0,005
10,013	10,020	10,022	10,018	0,007	0,009	0,005
<b>Tempo Médio (segundos)</b>				<b>0,006</b>	<b>0,0083</b>	<b>0,0042</b>

Fonte: BOTZA *et al*, 2008

**QUADRO 3.2 – Resultado de performance de velocidade com taxa de 19200 bps.**

Conforme visto no capítulo anterior, tratando-se da confiabilidade da comunicação, observa-se neste caso que a interligação de IEDs via contato seco com fio de cobre é ainda a que se apresenta mais confiável (disponibilidade de 99,9999%).

Observa-se que, pelas informações obtidas dos ensaios realizados, a velocidade de transmissão de dados entre os relés de proteção, tanto a comunicação via mensagem GOOSE quanto via comunicação serial se equivalem. Observa-se também que a taxa de transmissão de dados influencia de forma relativa o sistema

de comunicação serial, porém não sendo de grande impacto as diferenças de tempo apresentadas.

No primeiro momento, analisando-se esta rede, tende-se a esperar que o sistema formado por contato seco (entrada IN101 e saída OUT101) para comunicação entre os dois relés interligados por simples fio de cobre deveria apresentar o menor tempo. Porém, pelos testes realizados, pode-se verificar que esta tendência não ocorre. Desta forma, conclui-se que o tempo de detecção de mudança de estado do circuito físico (contato seco) é maior que o tempo de processamento dos dispositivos de rede.

### **3.2.2 Caso 2: Meios de Comunicação e Fabricantes Diferentes**

Este item apresenta uma análise comparativa entre os meios de comunicação serial e Ethernet, além disso, comparando performance de velocidade entre *IEDs* de fabricantes diferentes.

Este trabalho (BOTZA *et al*, 2008) foi realizado dentro de um ambiente de subestação de concessionária de energia quando da oportunidade de avaliação de melhorias e re-projeto do seu sistema de comunicação na rede de proteção elétrica.

Desenvolvido pela equipe de engenharia em conjunto com os fabricantes de *IEDs* e sistemas de proteção na concessionária de energia elétrica Southern Califórnia Edison (SCE) nos Estados Unidos, este trabalho buscou identificar em detalhes a capacidade de fornecimento dos fabricantes em relação aos aspectos técnicos associados à performance de operação, como exemplo à capacidade de comunicação entre *IEDs* de fabricantes diferentes através da comunicação GOOSE IEC 61850, caracterizada pela norma como sendo a interoperabilidade. Entretanto, o principal objetivo foi verificar a eficácia da utilização das mensagens GOOSE definidas pela IEC 61850, já que o sistema atual de automação da SCE baseava-se na comunicação serial.

Para o foco deste trabalho de dissertação, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios entre *IEDs* de fabricantes e tipos de comunicação diferentes, serial e mensagens GOOSE Ethernet, conforme Quadro 3.3 (BOTZA *et al*, 2008).

Os resultados são apresentados em duas situações diferentes, considerando as colunas do quadro denominadas “IED para IED” e “Cenário com 3 IEDs” representando, respectivamente, o cenário com comunicação entre dois e três *IEDs* quaisquer.

Nas linhas deste quadro são apresentadas situações com a utilização das mensagens GOOSE IEC 61850 e com comunicação serial (RSRP), variando-se os resultados conforme mudança dos fabricantes. Nesta avaliação foram considerados os testes para dois fabricantes.

Fabricante	IED para IED	Cenário com 3 IEDs
Fabricante A com Protocolo GOOSE via Ethernet LAN	4 ms	13,3 ms
Fabricante A com Protocolo GOOSE via Ethernet para WAN	9 ms	22,9 ms
Fabricante B com Protocolo GOOSE via Ethernet LAN	14,3 ms	37,4 ms
Fabricante B com Protocolo GOOSE via Ethernet para WAN	18,3 ms	45,4 ms
Fabricante A com RSRP via Ethernet LAN	14,6 ms	42,1ms
Fabricante A com RSRP via Ethernet para WAN	22,6 ms	50,1 ms
Fabricante A com RSRP via serial LAN	5,2 ms	14,7 ms
Fabricante A com RSRP via serial para WAN	9,2 ms	22,7 ms

Fonte: BOTZA *et al*, 2008.

**QUADRO 3.3 - Valores comparativos de performance entre fabricantes diferentes.**

Concluí-se pelos resultados apresentados que existe uma variação considerável na performance dos tempos alcançados entre estes dois fabricantes quando da utilização do protocolo Ethernet com mensagens GOOSE. Neste caso o *IED* do fabricante A é mais veloz que o do fabricante B em ambas as formas de comunicação.

Os outros resultados apresentados neste quadro dizem respeito às variações no caso do fabricante A com relação aos meios de comunicação utilizados. Para este ensaio o fabricante A utiliza a configuração do sistema serial através de meios diferentes de comunicação, Ethernet e serial, ficando evidente que a melhor performance ocorre para a comunicação serial.

Vale ressaltar que existem outros trabalhos publicados com o objetivo de avaliar a velocidade de uma rede de comunicação com *IEDs*, considerando diferentes tipos de carregamento da rede de comunicação, ou seja, com ou sem saturação, conforme itens subsequentes.

### 3.3 REFERÊNCIA NACIONAL

Este trabalho (SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005) foi realizado por um grande fabricante de *IEDs* e uma universidade no Brasil, patrocinado por um cliente potencial de utilização dos sistemas de proteção.

Com o intuito de confirmar a performance das mensagens GOOSE e também da interoperabilidade entre *IEDs* de fabricantes diferentes, o cliente solicitou a um renomado fabricante de *IEDs* em conjunto com uma universidade brasileira, uma bateria de ensaios em laboratório, realizando simulações de algumas funções de proteção e de manobras elétricas típicas, utilizando um ambiente em rede de comunicação com mensagens GOOSE IEC 61850.

Neste trabalho são discutidos ensaios aplicados à função de proteção de seletividade lógica (função 68), sendo verificado o desempenho da rede de comunicação Ethernet conforme o seu nível de carregamento de dados, analisando-se a degradação do tempo de resposta à medida que se incrementa ou decrementa este nível de carregamento.

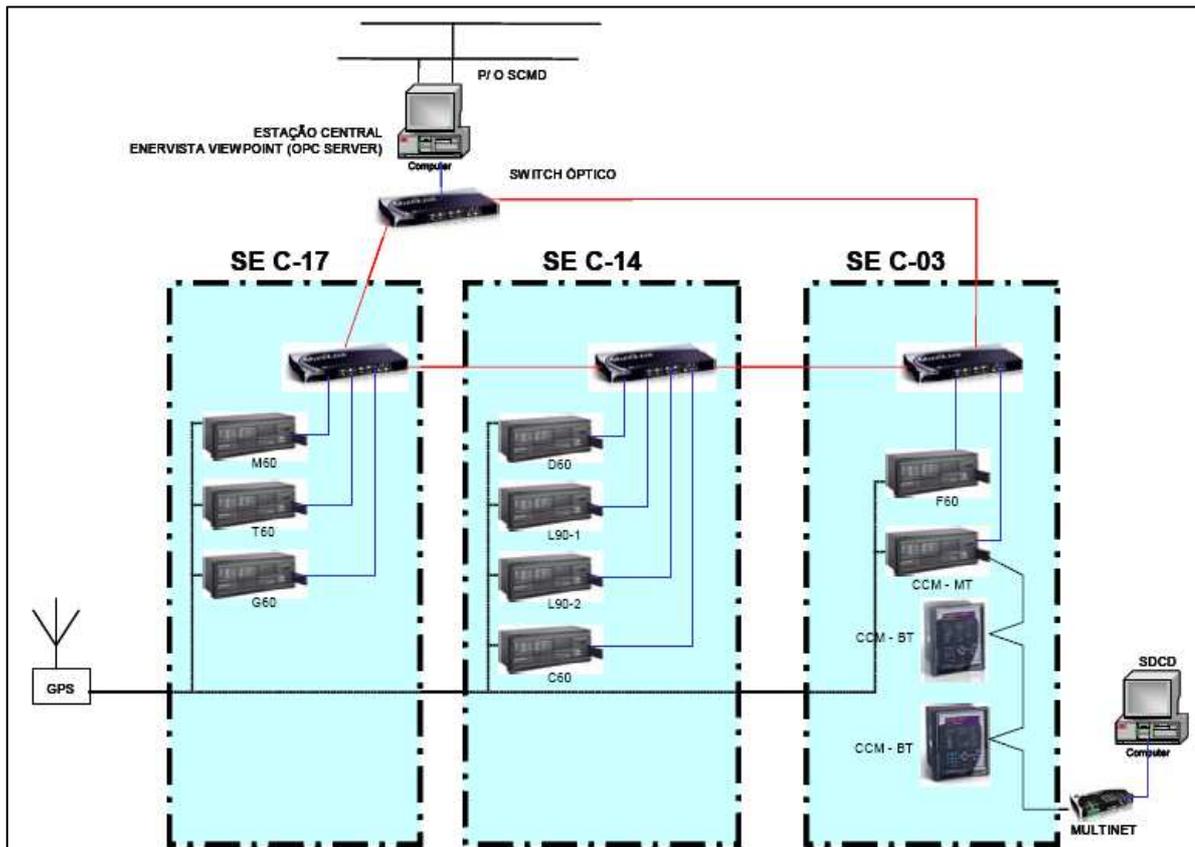
A estrutura do sistema de automação montada no laboratório de proteção teve como objetivo representar a estrutura real das subestações elétricas do cliente, sendo considerada uma subestação de entrada e mais duas subestações de distribuição derivadas da subestação de entrada.

A figura 3.2 ilustra o sistema de automação utilizado (SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005).

Neste sistema foram contempladas três redes de comunicação *Ethernet*, sendo a primeira rede fazendo a interligação dos *switches* óticos com a função de estabelecer a rede de automação e proteção do sistema. A segunda rede com a função de fornecer o recurso de sincronismo entre os *IEDs* do sistema (GPS/IRIG-B), e a última rede de comunicação interligando-se ao sistema SDCD de processo

da instalação fabril para fornecimento de informações de operação dos motores elétricos.

Na figura 3.2 cada conjunto separado de *IEDs* e dispositivos de rede representam uma subestação elétrica (SE C-17; SE C-14; SE C-03).

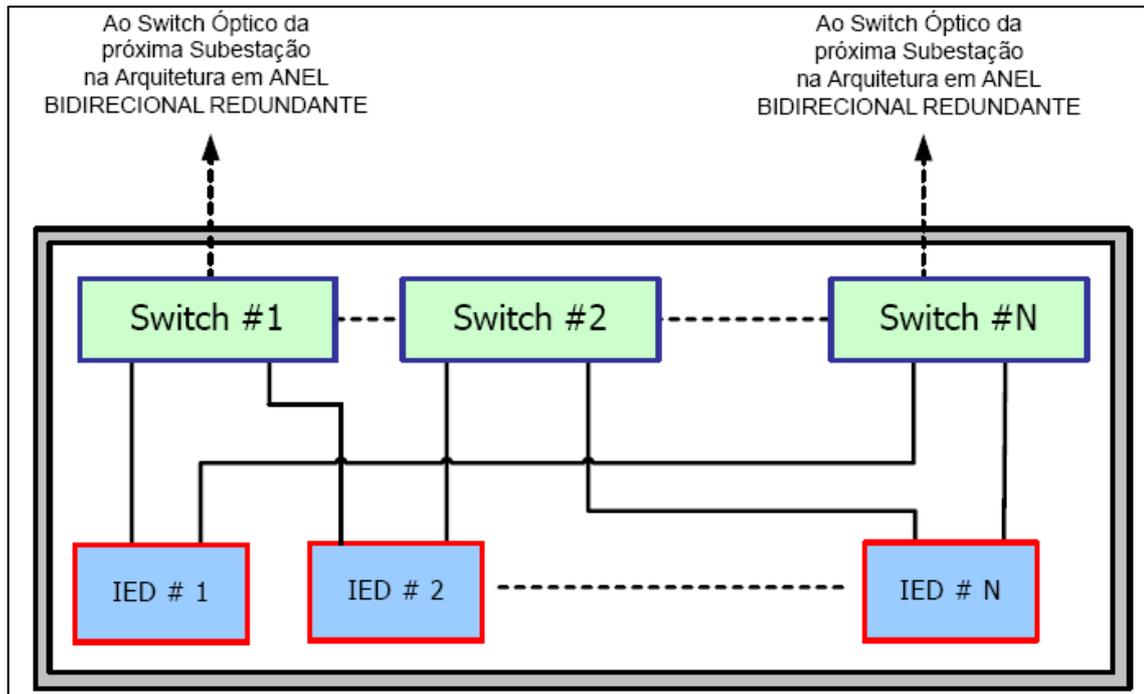


Fonte: SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005).

Figura 3.2 – Rede de comunicação montada para implementação dos ensaios.

Buscando-se adequar de forma mais fiel possível os ensaios de laboratório com as condições do sistema real, os *IEDs* de proteção de transformadores, alimentadores de painéis (*feeders*), disjuntores de entrada de painéis e de interligação de barras devem possuir duas portas *Ethernet* com protocolo IEC 61850, permitindo assim a interligação em formato radial a *switches* diferentes através de fibra ótica dos *IEDs* da instalação, formando uma redundância no sistema conforme mostrada na figura 3.3.

Esta figura representa a interligação dos dispositivos (*IEDs* e de rede) de uma subestação, sendo esta interligada aos *switches* das outras subestações para complementação da comunicação da rede de automação.



Fonte: SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005).

Figura 3.3 – Representação da arquitetura radial redundante dos IEDs.

Em função da redundância das portas dos *IEDs*, em caso de problema em um dos segmentos de rede (fibra ótica), o outro segmento (porta Ethernet) assume a comunicação, sendo gerada uma mensagem de alarme para o sistema de automação.

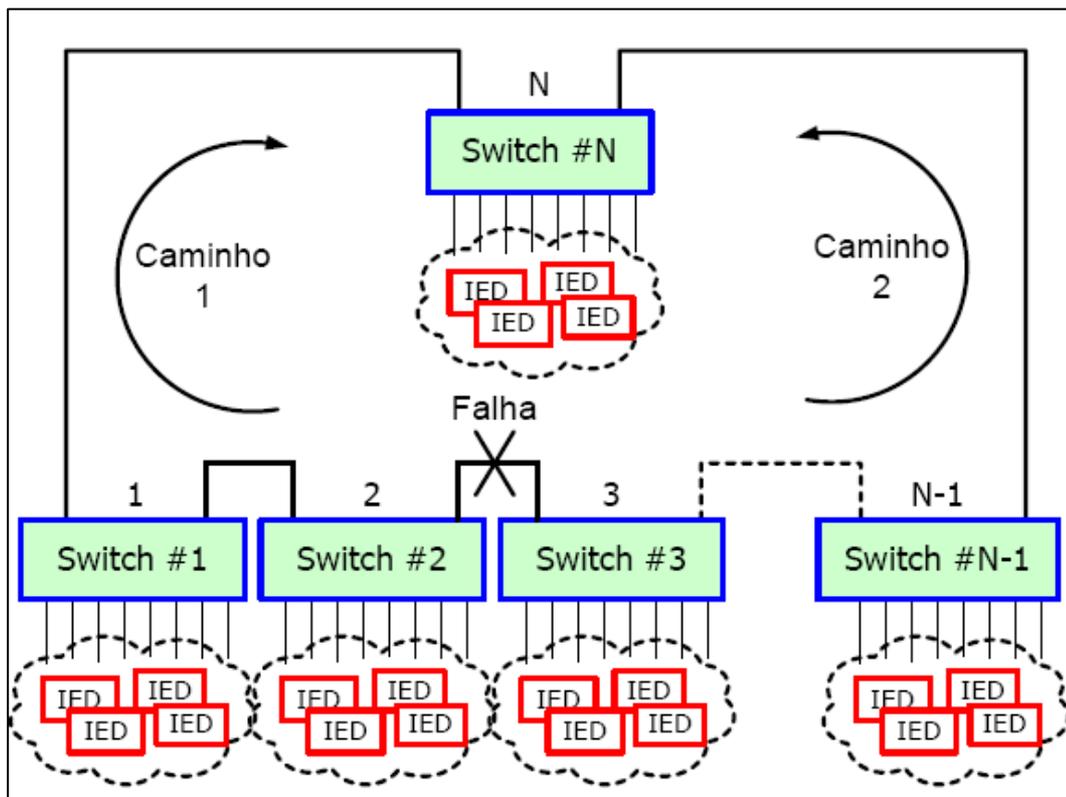
A configuração montada para a interligação dos switches óticos de cada subestação e entre subestações foi em anel (*ring*), fornecendo maior flexibilidade e segurança para a rede, sendo que em caso de problema em algum switch e/ou dano em algum segmento de fibra ótica de interligação entre eles, esta situação demandará uma reconfiguração dos *switches* da instalação, fazendo com que se mantenha a comunicação.

Esta reconfiguração conforme norma IEC 61850 exigirá um atraso de tempo no momento do problema de até 5 milissegundos por *switch* envolvido na rede (SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005).

A interligação dos diversos switches existentes na subestação, inclusive entre as subestações, é mostrada na figura 3.4.

Conforme comentado inicialmente, um dos objetivos dos testes realizados é a verificação do desempenho das mensagens GOOSE IEC61850 numa rede com nível de carregamento de dados considerável, analisando-se o nível de prioridade destas mensagens.

Para este propósito, foi utilizado o software chamado IP LOAD, que gera uma grande quantidade de pacotes de dados na rede, permitindo ao usuário a definição do tamanho e velocidade de transmissão de um pacote de dados a ser enviado. A quantidade máxima de pacotes enviados por segundo também pode ser definida, e o programa tentará manter o nível de tráfego, até o limite máximo permitido.



Fonte: SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005).

Figura 3.4 – Topologia da rede de comunicação dos *switches* óticos.

Para clareza da efetividade da priorização das mensagens GOOSE, foram realizados diversos ensaios envolvendo situações da atuação de funções de proteção assim como de funções de manobras típicas em sistemas elétricos na

condição de rede carregada, sendo que para o caso discutido foi considerado nível de carregamento de 100% do tráfego da rede.

Para a simulação da corrente de curto-circuito no sistema, foi utilizada uma caixa de calibração de relés de proteção, que injetou uma corrente acima da corrente de *pickup* programada nas entradas de corrente dos *IEDs*, que foram interligados em série, para a sensibilização dos mesmos simultaneamente para a função de proteção contra curto-circuito.

A seguir são feitas as análises dos ensaios realizados considerando para a aplicação da seletividade lógica as duas condições de tráfego da rede de comunicação.

### **3.3.1 Ensaio de Seletividade Lógica com Tráfego de Rede Normal (sem a utilização do programa IP LOAD)**

Para este ensaio, a lógica de seletividade lógica foi implementada em quatro *IEDs* interligados em série, sendo aplicada a seletividade lógica na função de sobre-corrente instantânea tanto para curto-circuito entre fases quanto para fase-terra, aplicando-se um tempo de seletividade adequado para o processamento das informações por parte dos *IEDs* envolvidos, enquanto a função de sobre-corrente temporizada foi ajustada como uma proteção de retaguarda para o disjuntor a jusante.

Em cada programação do *IED* foram utilizados dois elementos de sobre-corrente, sendo o primeiro elemento programado sem nenhum atraso de tempo (instantâneo), pois este elemento foi definido como responsável para liberação do sinal de bloqueio do *IED* a jusante para o *IED* a montante. Foi estabelecido para o segundo elemento de sobre-corrente um tempo de 50 ms, sendo considerado este tempo suficiente para o processamento dos *IEDs* e dispositivos de rede envolvidos conforme topologia já comentada.

Caso o *IED* seja sensibilizado por uma corrente elétrica acima do seu valor estabelecido de *pick-up*, e caso o mesmo não tenha sido bloqueado por outro *IED*, este enviará o sinal de *trip* para o disjuntor correspondente.

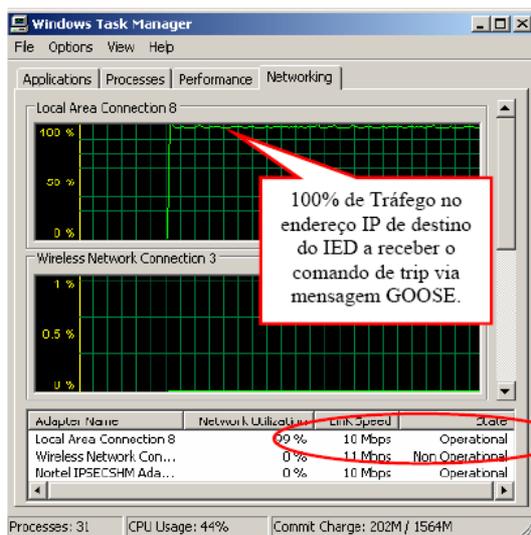
Todos os quatro *IEDs* configurados para este ensaio foram interligados em série com a caixa de calibração de relés, logo todos são sensibilizados simultaneamente assim que a corrente elétrica é injetada no circuito acima do valor de *pick-up*, mas somente o *IED* mais a jusante realizou a atuação de *trip* do disjuntor. Esta atuação de *trip* do disjuntor ou atuação do *IED* foi configurada para desligar a caixa de calibração de relés, simulando a extinção da corrente de curto-circuito.

Para o ensaio de seletividade lógica entre o *IED* do disjuntor de saída de um painel 13,8 kV e o *IED* do disjuntor de entrada deste mesmo painel, com tráfego normal na rede, sem aplicação do programa IP LOAD, o sistema apresentou um tempo para envio do sinal de bloqueio para o *IED* a montante de 3,1 ms.

### **3.3.2 Ensaio de Seletividade Lógica com Carregamento de 100% da Capacidade de Tráfego da Rede (com a utilização do programa IP LOAD)**

Configurado para envio contínuo de 4000 pacotes (*frames*) por segundo de 200 bytes cada *frame*, o programa IP LOAD foi aplicado para gerar um tráfego intenso de dados no IED que receberá o sinal de bloqueio da seletividade lógica do IED a jusante (disjuntor de saída do painel).

Com a emissão de pacotes de dados pelo IP LOAD, totalizando 6,4 Mbit/s (correspondendo a 4000 pacotes/segundo x 200 bytes x 8 bit/byte), em uma rede Ethernet de 10 Mbit/s, sendo os *switches* configurados no formato *Full Duplex*, dividindo pela metade a sua capacidade de banda de tráfego entre mensagens recebidas e enviadas, atinge-se assim a capacidade de 100% do tráfego de dados do IP do *IED* conforme a figura 3.5 (SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005).



Fonte: SENGER;REIS FILHO;BULGARELLI, 2005.

Figura 3.5 – Demonstração do nível 100% do tráfego da rede para o IED em questão.

Para o ensaio de seletividade lógica entre o *IED* do disjuntor de saída e o IED do disjuntor de entrada do painel 13,8 kV da SE C-14, com um nível de carregamento do tráfego de 100% na rede, registrou-se um atraso de tempo para o envio do sinal de bloqueio da seletividade lógica de 0,90 ms, comparativamente à condição de envio deste mesmo sinal com o tráfego normal na rede, totalizando 4,0 ms.

Este resultado é bastante significativo do ponto de vista da eficácia da priorização da mensagem GOOSE da IEC 61850, pois o impacto no tempo de resposta não foi tão representativo para o sistema de proteção em função do nível de carregamento em que a rede de comunicação foi exigida. Importante destacar que esta situação de nível de carregamento da rede de comunicação não corresponde à rotina de operação das redes para este tipo de aplicação.

Portanto, concluí-se que a degradação dos tempos de resposta nas duas situações analisadas, com tráfego normal de dados na rede e com a rede com nível de carregamento de 100% do tráfego, apresentou-se bem insignificante, garantindo o desempenho adequado das mensagens prioritárias GOOSE IEC 61850, diante de outros dados fluindo na rede de comunicação.

A seguir será apresentada outra situação de testes de bancada, demonstrando o desempenho das redes de comunicação com mensagens GOOSE IEC 61850,

porém utilizando *IEDs* de fabricantes diferentes, propiciando a verificação da performance da função interoperabilidade conforme definida na IEC 61850, além do desempenho da velocidade da transmissão de dados entre *IEDs* e entre *IEDs* e sistema SCADA (supervisório).

Para estes ensaios, conforme realizado no caso anterior, foram feitas simulações com o carregamento da rede de comunicação através do software IP LOAD.

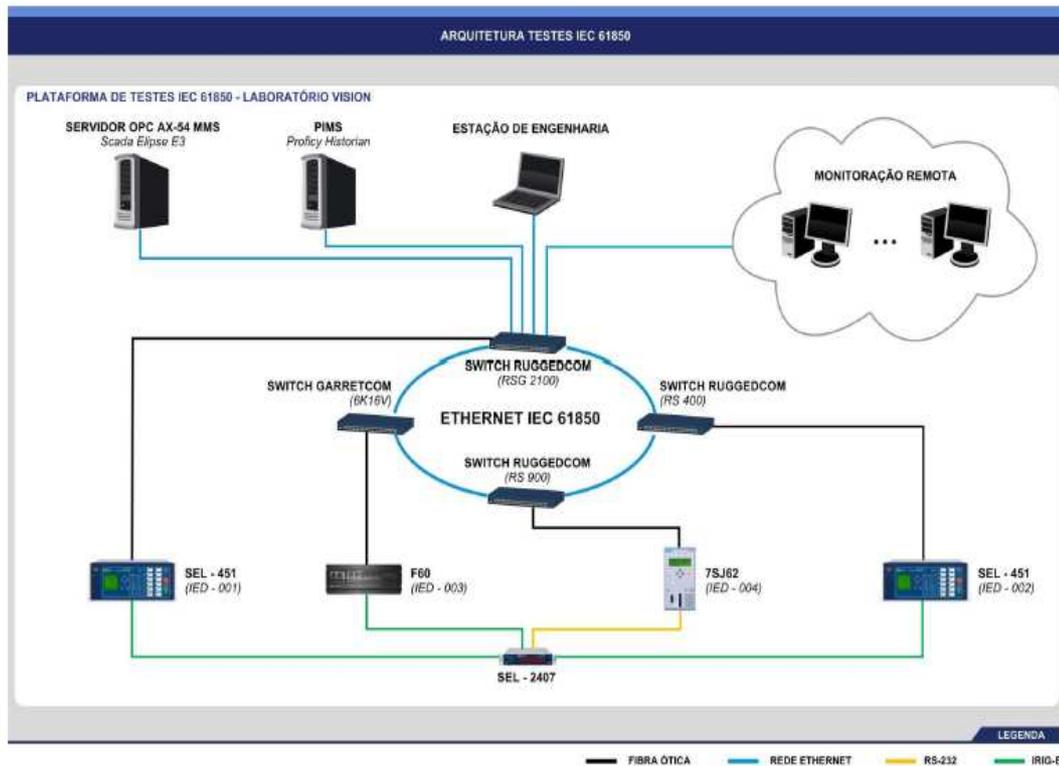
### **3.3.3 Mensagens GOOSE IEC 61850 e Interoperabilidade**

A proposta deste ensaio é demonstrar a eficácia da interoperabilidade e o desempenho da velocidade na transmissão de dados na utilização das mensagens prioritárias GOOSE IEC 61850 com fabricantes de *IEDs* diferentes (SOUTO, 2009). Esta condição é cada vez mais exigida pelo nível de automação dos novos projetos de subestações de energia elétrica, além das modernizações, pois será necessária que a comunicação entre *IEDs* de fabricantes diferentes flua de forma natural e com alto desempenho do ponto de vista da velocidade na transmissão de dados.

Para a proposta dos ensaios, foi configurada uma rede de comunicação com os seguintes componentes:

- 2 *IEDs* de proteção do fabricante A (*IED-001* e *IED-002*);
- 1 *IED* de proteção do fabricante B (*IED-003*);
- 1 *IED* de proteção do fabricante C (*IED-004*);
- 1 switch do fabricante D;
- 1 switch do fabricante E de modelo A;
- 1 switch do fabricante E do modelo B;
- 1 switch do fabricante E do modelo C;
- 1 receptor GPS do fabricante A.

Esta configuração pode ser visualizada pela figura 3.6 (SOUTO, 2009).



Fonte: SOUTO, 2009

Figura 3.6 – Topologia da rede de comunicação montada para os ensaios.

Para estes ensaios, foi avaliado o desempenho da troca de mensagens entre os *IEDs*, através das mensagens prioritárias GOOSE, que é o interesse relativo à seletividade lógica.

Para o cálculo dos tempos de respostas entre os *IEDs* foi utilizado o recurso do registrador de eventos seqüenciais (*SER*) de cada *IED*.

O Quadro 3.4 demonstra os resultados alcançados nos ensaios. Neste caso, em se tratando de mensagens GOOSE IEC 61850, foi considerado como referência para estes ensaios o nível de prioridade 4 para estas mensagens, sendo que segundo definição da norma IEC 61850, as faixas de priorização variam de 1 a 7, sendo o crescimento desta priorização em ordem crescente da classificação numérica.

Portanto, para o caso considerado, definiu-se um nível de prioridade intermediário dentro da escala normalizada.

IEDs		TEMPO MÉDIO (ms)
IED-001	IED-002	4.67
IED-001	IED-003	3.67
IED-001	IED-004	3.5
IED-002	IED-003	4.55
IED-002	IED-004	5.0
IED-003	IED-004	5.67

Fonte: SOUTO, 2009

**QUADRO 3.4 - Tempo médio de comunicação entre IEDs com somente um switch (em estrela).**

Para o primeiro tipo de ensaio, considerou-se uma topologia com somente um *switch* interligando os componentes (*IEDs*) em estrela, ou seja, cada *IED* interligando-se diretamente em cada porta do *switch*. Ainda para este primeiro ensaio, foi considerado o nível de tráfego da rede normal.

Numa segunda condição, foram realizados os ensaios de acordo com a figura 3.6, utilizando-se os quatro *switches* com a configuração em anel.

Conforme o Quadro 3.5, estes ensaios foram realizados primeiramente com a rede de comunicação com tráfego normal, sendo que para a rede com nível de carregamento de 99% os resultados são expostos no Quadro 3.6, mantido para os dois casos o mesmo nível 4 de prioridade para as mensagens GOOSE (SOUTO, 2009).

IEDs		TEMPO MÉDIO (ms)
IED-001	IED-002	4.33
IED-001	IED-003	3.3
IED-001	IED-004	4.0
IED-002	IED-003	4.67
IED-002	IED-004	4.5
IED-003	IED-004	4.67

Fonte: SOUTO, 2009

**QUADRO 3.5 - Tempo de resposta entre IEDs com switches em anel com tráfego normal.**

IEDs		TEMPO MÉDIO (ms)
IED-001	IED-002	7.1
IED-001	IED-003	7.33
IED-001	IED-004	6.12
IED-002	IED-003	5.0
IED-002	IED-004	6.6
IED-003	IED-004	6.5

Fonte: SOUTO, 2009

**QUADRO 3.6 - Tempo de resposta entre IEDs com switches em anel com carregamento da rede.**

Pode-se observar pelos resultados de tempo de resposta entre os *IEDs* que não existe uma relação entre o desempenho e a posição do *IED* na rede assim como uma relação entre o desempenho desta comunicação e o tipo de fornecedor (fabricante).

Observa-se claramente o impacto do nível de carregamento no desempenho do tempo de resposta da comunicação, muito embora o atraso provocado pelo carregamento não é relevante para os estudos de proteção, em particular para a aplicação da seletividade lógica, mesmo tendo-se casos em que o tempo médio de resposta foi duplicado.

Deve-se observar também que a utilização do software IP LOAD para inclusão de dados para simulação do carregamento da rede de comunicação gera o impacto verificado no sistema conforme resultados, porém as mensagens inseridas por este programa não tem definição de priorização conforme definido para as mensagens GOOSE. Sendo assim, não foi possível avaliar a influência do nível de carregamento com maior volume de mensagens de alta priorização, embora se perceba na prática que a ocorrência dos níveis de carregamento estabelecidos nos ensaios realizados é improvável.

Verifica-se que os resultados alcançados nos ensaios, mesmo em condições adversas, estão em conformidade com a faixa de valores máximos estabelecidos na norma IEC 61850 para cada tipo de comunicação. O Quadro 3.7 apresenta os requisitos de tempo segundo a norma IEC 61850 (SOUTO, 2009).

TIPO	CLASSE	ORIGEM	DESTINO	TEMPO (ms)	DESCRIÇÃO
1A	P1	IED	IED	10	Trip, bloqueios e seletividade
1B	P1	IED	IED	100	Outras mensagens rápidas
2	-	IED	IHM	100	Eventos, alarmes e <i>status</i>
5	-	IHM	IED	1000	Arquivos de configuração
6	T1	STIM	IED	1	Mensagens de sincronização
7	-	IHM	IED	500	Comandos do sistema SCADA

Fonte: SOUTO, 2009

**QUADRO 3.7 - Requisitos de valores máximos de tempo estabelecidos pela IEC 61850.**

### 3.4 TESTES REALIZADOS

Neste tópico, conforme comentado anteriormente, serão apresentados os resultados de testes da função seletividade lógica em conjunto com dois fabricantes de *IEDs* e sistemas de proteção.

Estes ensaios foram realizados em bancada de testes nas instalações dos próprios fabricantes, e tiveram o objetivo de registrar e analisar a velocidade de resposta da comunicação através de alguns tipos de interligação entre os *IEDs* (sistema fiado; comunicação ethernet; comunicação serial).

A implementação dos testes foi concretizada com a utilização de dois *IEDs* em cascata (série), na configuração de *IED* associado ao disjuntor alimentador (saída) e de entrada (geral) da subestação, dispositivos de rede ethernet, utilizando-se o registrador seqüencial de eventos dos próprios *IEDs* para análise dos tempos de resposta envolvidos em cada teste.

#### 3.4.1 Caso 1 (Fabricante A)

Este ensaio foi realizado nas instalações do fabricante A, aplicando-se os três tipos de interligação entre os *IEDs*: interligação através de contato elétrico físico (sistema fiado); interligação utilizando-se o protocolo proprietário deste fabricante em *Ethernet*, e uma última configuração em *Ethernet* com as mensagens prioritárias GOOSE conforme a IEC 61850.

Foram realizados os testes com dois *IEDs* em cascata com a injeção de corrente elétrica através de uma caixa de testes de relés de proteção, sendo que quando se injetava uma corrente elétrica acima do valor ajustado de *pickup* no relé de proteção, o relé de proteção definido para acionar o disjuntor atuava no desligamento da caixa de testes de relés, simulando a eliminação da falta no circuito.

Os testes de desempenho para os três tipos de interligação citados foram realizados separadamente, verificando-se a atuação e o tempo de resposta para cada situação.

Com relação ao tipo de interligação com contato elétrico entre os *IEDs*, foram realizados os ensaios com contato elétrico de alta velocidade disponibilizado por este fabricante e contato elétrico de velocidade convencional.

O Quadro 3.8 apresenta os valores de tempo extraídos do registrador seqüencial de eventos do *IED* do disjuntor de entrada (a montante) com a utilização de contato elétrico de alta velocidade. Neste quadro são mostradas na coluna “Elemento” as variáveis de interesse para análise de desempenho dos *IEDs* em questão, sendo também mostrado na coluna “Status” o estado momentâneo destas variáveis para cada evento.

Neste ensaio foram realizados testes para interação com o *IED* do disjuntor de entrada, alternando-se pela ação dos *IEDs* a condição de estado das variáveis de interesse (ativado ou desativado).

<b>Registro dos Eventos do Teste no Fabricante A - Agosto/2008</b>				
<b>IED do Disjuntor Geral (contato elétrico de alta velocidade)</b>				
<b>Evento</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Elemento</b>	<b>Status</b>
1	9/8/2008	15:39:51.832	50P1	ATIVADO
2	9/8/2008	15:39:51.836	IN101	ATIVADO
3	9/8/2008	15:39:51.836	CCIN001	ATIVADO
4	9/8/2008	15:39:51.836	CCOUT01	ATIVADO
5	9/8/2008	15:39:51.838	RMB1A	ATIVADO
6	9/8/2008	15:39:51.838	TMB1A	ATIVADO
7	9/8/2008	15:39:51.849	50P1	DESATIVADO
8	9/8/2008	15:39:51.853	CCIN001	DESATIVADO
9	9/8/2008	15:39:51.853	CCOUT01	DESATIVADO
10	9/8/2008	15:39:51.855	RMB1A	DESATIVADO
11	9/8/2008	15:39:51.855	TMB1A	DESATIVADO
12	9/8/2008	15:39:51.863	IN101	DESATIVADO
13	9/8/2008	15:40:30.365	50P1	ATIVADO
14	9/8/2008	15:40:30.369	IN101	ATIVADO
15	9/8/2008	15:40:30.369	CCIN001	ATIVADO
16	9/8/2008	15:40:30.369	CCOUT01	ATIVADO
17	9/8/2008	15:40:30.371	RMB1A	ATIVADO
18	9/8/2008	15:40:30.371	TMB1A	ATIVADO
19	9/8/2008	15:40:31.548	50P1	DESATIVADO
20	9/8/2008	15:40:31.553	CCIN001	DESATIVADO
21	9/8/2008	15:40:31.553	CCOUT01	DESATIVADO
22	9/8/2008	15:40:31.555	RMB1A	DESATIVADO
23	9/8/2008	15:40:31.555	TMB1A	DESATIVADO
24	9/8/2008	15:40:31.563	IN101	DESATIVADO
25	9/8/2008	15:49:17.211	50P1	ATIVADO
26	9/8/2008	15:49:17.215	IN101	ATIVADO
27	9/8/2008	15:49:17.215	RMB1A	ATIVADO
28	9/8/2008	15:49:17.215	TMB1A	ATIVADO
29	9/8/2008	15:49:17.215	CCIN001	ATIVADO
30	9/8/2008	15:49:17.215	CCOUT01	ATIVADO
31	9/8/2008	15:49:18.377	50P1	DESATIVADO
32	9/8/2008	15:49:18.381	RMB1A	DESATIVADO
33	9/8/2008	15:49:18.381	TMB1A	DESATIVADO
34	9/8/2008	15:49:18.381	CCIN001	DESATIVADO
35	9/8/2008	15:49:18.381	CCOUT01	DESATIVADO
36	9/8/2008	15:49:18.390	IN101	DESATIVADO
37	9/8/2008	15:49:19.627	50P1	ATIVADO
38	9/8/2008	15:49:19.631	RMB1A	ATIVADO
39	9/8/2008	15:49:19.631	TMB1A	ATIVADO
40	9/8/2008	15:49:19.633	IN101	ATIVADO
41	9/8/2008	15:49:19.633	CCIN001	ATIVADO
42	9/8/2008	15:49:19.633	CCOUT01	ATIVADO
43	9/8/2008	15:49:20.227	50P1	DESATIVADO
44	9/8/2008	15:49:20.231	RMB1A	DESATIVADO
45	9/8/2008	15:49:20.231	TMB1A	DESATIVADO
46	9/8/2008	15:49:20.231	CCIN001	DESATIVADO
47	9/8/2008	15:49:20.231	CCOUT01	DESATIVADO
48	9/8/2008	15:49:20.240	IN101	DESATIVADO

**QUADRO 3.8 - Registro de eventos do relé associado ao disjuntor geral.**

Analisando-se os testes realizados, observa-se que quando há a sensibilização do *IED* em função de uma condição de falta, o elemento “50P1” é ativado, informando que há uma situação de sobre-corrente no circuito. Após alguns instantes, é provocada a mudança de estado de algumas variáveis de interesse, como por exemplo, informada no quadro a condição do elemento “IN101”, representando a chegada da informação do sinal de bloqueio da seletividade lógica via contato elétrico (sistema fiado) proveniente de uma saída (OUT201) do *IED* a jusante. Neste caso, verifica-se que a função da seletividade lógica é ativada, e que o tempo de resposta entre o momento da sensibilização do *IED* (50P1) e a chegada do sinal de bloqueio variou de 4 ms a 6 ms. Disto conclui-se que o atendimento à seletividade lógica pelo sistema fiado está bastante eficiente do ponto de vista do tempo de resposta, ressaltando que foi utilizado para este ensaio o contato elétrico de alta velocidade.

Outra avaliação diz respeito à condição da aplicação nos ensaios, do protocolo proprietário de comunicação Ethernet do fabricante, representada no quadro 3.8 pelos elementos “RMB1A” e “TMB1A”, sendo respectivamente elemento de recebimento do sinal de bloqueio do *IED* a jusante (disjuntor alimentador) e de envio do sinal de bloqueio do *IED* referente à função da seletividade lógica.

Para esta aplicação, também se verifica a ativação da função seletividade lógica, assim como uma resposta de tempo similar ao caso anterior (sistema fiado com contato de alta velocidade), com variação de 4 a 6 ms.

Para o último caso, em que foi aplicada a comunicação Ethernet com mensagens GOOSE IEC 61850, sendo informada esta situação pelos elementos “CCIN001” e “CCOUT01”, representando respectivamente, chegada do sinal de bloqueio do *IED* do disjuntor alimentador (a jusante) no *IED* do disjuntor geral, e envio do sinal de bloqueio da seletividade lógica para o nível a montante (caso haja). Nesta situação, observa-se a atuação da seletividade lógica entre estes *IEDs*, com tempo de resposta entre eles variando também de 4 a 6 ms.

Pode-se observar que em nenhum dos ensaios realizados, o *IED* do disjuntor geral apresentou sinal de *trip*, demonstrando a boa eficiência da aplicação da seletividade lógica.

Através do Quadro 3.9, pode-se observar os registros de eventos gerados pelo *IED* do disjuntor alimentador (a jusante), na qual percebe-se o comando de *trip* deste disjuntor, ou seja, em todos os ensaios registrados para este *IED*, houve o comando de abertura do disjuntor

Para o *IED* do disjuntor alimentador, a sensibilização é informada pelo elemento “50P2” no Quadro 3.9. Observa-se que nestes ensaios, os elementos de informação do envio do sinal de bloqueio para o disjuntor a montante do sistema fiado (contato elétrico), representado pelo elemento “OUT201”, e a informação do sinal de bloqueio do protocolo proprietário de comunicação deste fabricante, representado pela informação “TMB1A”, bem como a informação correspondente à saída do sinal de bloqueio da seletividade lógica por parte da mensagem GOOSE IEC61850, representado pelo elemento “CCOUT01”, estão ocorrendo no mesmo instante da sensibilização do sinal de trip do *IED* para o disjuntor alimentador.

Foi realizado também o ensaio utilizando-se o contato elétrico para o sistema fiado com contato de velocidade normal (convencional), observando-se neste caso que houve um atraso do sistema fiado em relação às outras formas de interligação.

Para este caso, conforme o Quadro 3.10, foram realizados três ensaios de simulação de sensibilização do *IED* do disjuntor de entrada (a montante), sendo que o sistema fiado com contato elétrico de velocidade normal apresentou variação de tempo de resposta entre 6 e 11 ms, e sempre apresentando uma velocidade menor comparativamente às outras duas formas de comunicação.

<b>Registro dos Eventos do Teste no Fabricante A - Agosto/2008</b>				
<b>IED do Disjuntor Alimentador (com contato elétrico de alta velocidade)</b>				
<b>Evento</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Elemento</b>	<b>Status</b>
1	9/8/2008	15:35:45.757	RMB1A	ATIVADO
2	9/8/2008	15:35:47.763	50P2	DESATIVADO
3	9/8/2008	15:35:47.763	OUT201	DESATIVADO
4	9/8/2008	15:35:47.763	TMB1A	DESATIVADO
5	9/8/2008	15:35:47.763	CCOUT01	DESATIVADO
6	9/8/2008	15:35:47.770	TRIP	DESATIVADO
7	9/8/2008	15:35:47.772	CCIN001	DESATIVADO
8	9/8/2008	15:35:47.774	RMB1A	DESATIVADO
9	9/8/2008	15:36:24.280	50P2	ATIVADO
10	9/8/2008	15:36:24.280	TRIP	ATIVADO
11	9/8/2008	15:36:24.280	OUT201	ATIVADO
12	9/8/2008	15:36:24.280	TMB1A	ATIVADO
13	9/8/2008	15:36:24.280	CCOUT01	ATIVADO
14	9/8/2008	15:36:24.288	CCIN001	ATIVADO
15	9/8/2008	15:36:24.290	RMB1A	ATIVADO
16	9/8/2008	15:36:25.463	50P2	DESATIVADO
17	9/8/2008	15:36:25.463	OUT201	DESATIVADO
18	9/8/2008	15:36:25.463	TMB1A	DESATIVADO
19	9/8/2008	15:36:25.463	CCOUT01	DESATIVADO
20	9/8/2008	15:36:25.472	TRIP	DESATIVADO
21	9/8/2008	15:36:25.472	CCIN001	DESATIVADO
22	9/8/2008	15:36:25.474	RMB1A	DESATIVADO
23	9/8/2008	15:45:11.125	50P2	ATIVADO
24	9/8/2008	15:45:11.125	TRIP	ATIVADO
25	9/8/2008	15:45:11.125	OUT201	ATIVADO
26	9/8/2008	15:45:11.125	TMB1A	ATIVADO
27	9/8/2008	15:45:11.125	CCOUT01	ATIVADO
28	9/8/2008	15:45:11.136	RMB1A	ATIVADO
29	9/8/2008	15:45:12.292	50P2	DESATIVADO
30	9/8/2008	15:45:12.292	OUT201	DESATIVADO
31	9/8/2008	15:45:12.292	TMB1A	DESATIVADO
32	9/8/2008	15:45:12.292	CCOUT01	DESATIVADO
33	9/8/2008	15:45:12.298	TRIP	DESATIVADO
34	9/8/2008	15:45:12.300	CCIN001	DESATIVADO
35	9/8/2008	15:45:12.302	RMB1A	DESATIVADO
36	9/8/2008	15:45:13.544	50P2	ATIVADO
37	9/8/2008	15:45:13.544	TRIP	ATIVADO
38	9/8/2008	15:45:13.544	OUT201	ATIVADO
39	9/8/2008	15:45:13.544	TMB1A	ATIVADO
40	9/8/2008	15:45:13.544	CCOUT01	ATIVADO
41	9/8/2008	15:45:13.552	RMB1A	ATIVADO
42	9/8/2008	15:45:13.552	CCIN001	ATIVADO
43	9/8/2008	15:45:14.142	50P2	DESATIVADO
44	9/8/2008	15:45:14.142	OUT201	DESATIVADO
45	9/8/2008	15:45:14.142	TMB1A	DESATIVADO
46	9/8/2008	15:45:14.142	CCOUT01	DESATIVADO
47	9/8/2008	15:45:14.148	TRIP	DESATIVADO
48	9/8/2008	15:45:14.152	RMB1A	DESATIVADO
49	9/8/2008	15:45:14.152	CCIN001	DESATIVADO

**QUADRO 3.9 - Registro de eventos do disjuntor alimentador (contato elétrico alta velocidade).**

No Quadro 3.10, a informação do sinal de bloqueio do contato elétrico de velocidade convencional é representada pelo elemento “IN101”.

<b>Registro dos Eventos do Teste no Fabricante A - Agosto/2008</b>				
<b>IED do Disjuntor de Entrada (contato elétrico normal)</b>				
<b>Evento</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Elemento</b>	<b>Status</b>
1	9/8/2008	16:35:42.925	50P1	ATIVADO
3	9/8/2008	16:35:42.929	RMB1A	ATIVADO
4	9/8/2008	16:35:42.929	TMB1A	ATIVADO
5	9/8/2008	16:35:42.931	CCIN001	ATIVADO
6	9/8/2008	16:35:42.931	CCOUT01	ATIVADO
7	9/8/2008	16:35:42.936	IN101	ATIVADO
8	9/8/2008	16:35:44.675	50P1	DESATIVADO
9	9/8/2008	16:35:44.679	RMB1A	DESATIVADO
10	9/8/2008	16:35:44.679	TMB1A	DESATIVADO
11	9/8/2008	16:35:44.681	CCIN001	DESATIVADO
12	9/8/2008	16:35:44.681	CCOUT01	DESATIVADO
13	9/8/2008	16:35:44.683	IN101	DESATIVADO
15	9/8/2008	16:37:22.994	50P1	ATIVADO
17	9/8/2008	16:37:23.000	RMB1A	ATIVADO
18	9/8/2008	16:37:23.000	TMB1A	ATIVADO
19	9/8/2008	16:37:23.000	CCIN001	ATIVADO
20	9/8/2008	16:37:23.000	CCOUT01	ATIVADO
21	9/8/2008	16:37:23.002	IN101	ATIVADO
22	9/8/2008	16:37:25.061	50P1	DESATIVADO
23	9/8/2008	16:37:25.067	RMB1A	DESATIVADO
24	9/8/2008	16:37:25.067	TMB1A	DESATIVADO
25	9/8/2008	16:37:25.067	CCIN001	DESATIVADO
26	9/8/2008	16:37:25.067	CCOUT01	DESATIVADO
27	9/8/2008	16:37:25.069	IN101	DESATIVADO
29	9/8/2008	16:37:48.379	50P1	ATIVADO
31	9/8/2008	16:37:48.383	RMB1A	ATIVADO
32	9/8/2008	16:37:48.383	TMB1A	ATIVADO
33	9/8/2008	16:37:48.383	CCIN001	ATIVADO
34	9/8/2008	16:37:48.383	CCOUT01	ATIVADO
35	9/8/2008	16:37:48.385	IN101	ATIVADO
36	9/8/2008	16:37:49.129	50P1	DESATIVADO
37	9/8/2008	16:37:49.133	RMB1A	DESATIVADO
38	9/8/2008	16:37:49.133	TMB1A	DESATIVADO
39	9/8/2008	16:37:49.133	CCIN001	DESATIVADO
40	9/8/2008	16:37:49.133	CCOUT01	DESATIVADO
41	9/8/2008	16:37:49.135	IN101	DESATIVADO

**QUADRO 3.10 - Registro de eventos do disjuntor geral com contato elétrico de velocidade convencional.**

Numa última situação de ensaio realizada com este fabricante, foi verificado o desempenho dos IEDs em caso da ausência do sinal de bloqueio por parte do disjuntor a jusante para o disjuntor a montante, em função de alguma falha, resultando no comando de abertura do disjuntor a montante (geral), conforme a

relação de eventos do Quadro 3.11. Pode-se observar que após o tempo de 50 ms foi gerado o comando de trip para o disjuntor geral, em função da temporização definida inicialmente (50 ms) para a verificação do sinal de bloqueio proveniente do disjuntor alimentador.

Registro dos Eventos do Teste no Fabricante A - Agosto/2008				
IED do Disjuntor de Entrada (contato elétrico normal)				
Evento	Data	Hora	Elemento	Status
1	9/8/2008	17:00:06.882	50P1	ATIVADO
2	9/8/2008	17:00:06.932	TRIP	ATIVADO
3	9/8/2008	17:00:13.916	50P1	DESATIVADO
4	9/8/2008	17:00:13.922	TRIP	DESATIVADO

**QUADRO 3.11 - Registro de eventos do disjuntor geral sem o sinal de bloqueio.**

De uma forma geral, os ensaios realizados no fabricante A confirmaram a eficiência dos sinais de bloqueio da seletividade lógica entre os dois *IEDs*, apresentando certo equilíbrio no aspecto de tempo de resposta entre os tipos de comunicação implementados.

Com relação à implementação das mensagens GOOSE IEC61850, foi verificado que o tempo de resposta de comunicação entre os *IEDs* (sinal de bloqueio da seletividade lógica), atende o exposto pela norma IEC 61850 informado no Quadro 3.7, como tipo 1A, sendo o valor máximo permitido de 10 ms.

### 3.4.2 Caso 2 (Fabricante B)

Estes ensaios foram realizados nas instalações do fabricante B, utilizando um esquema com dois disjuntores, representado pelo disjuntor A como o disjuntor da entrada (geral), estando em série com o disjuntor B, correspondente ao disjuntor alimentador (saída para alguma subestação unitária).

A rede de comunicação para este ensaio foi composta numa configuração em anel, interligando-se os dois *IEDs* a um *switch* através de fibra ótica, e este último a um computador que operou como uma IHM.

Nesta situação foram realizados testes com dois tipos de comunicação, via mensagens prioritárias GOOSE IEC61850 e via contato elétrico (sistema fiado), conforme resultados apresentados no Quadro 3.12.

Os eventos de importância para a análise estão relacionados a partir do status “ativado”, sendo que para verificação da velocidade do sinal de bloqueio da seletividade lógica estão identificados pelos elementos “IN101”, relativo ao sistema fiado, e “CCIN001”, representando as mensagens GOOSE.

Registro dos Eventos do Teste no Fabricante B - Março/2009					
IEDs dos Disjuntores Geral e Alimentador					
Evento	Data	Hora	Disjuntor	Elemento	Status
1	11/3/2009	17:12:23.815	Disjuntor B	50P2	DESATIVADO
3	11/3/2009	17:12:23.815	Disjuntor B	CCOUT01	DESATIVADO
4	11/3/2009	17:12:23.815	Disjuntor B	OUT201	DESATIVADO
5	11/3/2009	17:12:23.815	Disjuntor B	TRIP	DESATIVADO
6	11/3/2009	17:19:43.887	Disjuntor A	50P1	DESATIVADO
7	11/3/2009	17:19:43.887	Disjuntor A	CCIN001	DESATIVADO
9	11/3/2009	17:19:43.887	Disjuntor A	IN101	DESATIVADO
10	11/3/2009	17:19:43.887	Disjuntor A	TRIP	DESATIVADO
11	11/3/2009	17:19:43.888	Disjuntor B	50P2	ATIVADO
12	11/3/2009	17:19:43.888	Disjuntor B	OUT201	ATIVADO
13	11/3/2009	17:19:43.888	Disjuntor B	CCOUT01	ATIVADO
14	11/3/2009	17:19:43.888	Disjuntor B	TRIP	ATIVADO
15	11/3/2009	17:19:43.892	Disjuntor A	50P1	ATIVADO
16	11/3/2009	17:19:43.901	Disjuntor A	IN101	ATIVADO
17	11/3/2009	17:19:43.897	Disjuntor A	CCIN001	ATIVADO
18	11/3/2009	17:19:43.897	Disjuntor A	TRIP	DESATIVADO

**QUADRO 3.12 - Registro de eventos dos disjuntores do fabricante B.**

Observa-se que neste ensaio a seletividade lógica operou adequadamente, fazendo atuar o disjuntor a jusante (B) primeiramente, e inibindo a atuação do disjuntor a montante (A). Entretanto, os tempos alcançados superaram o caso anterior, totalizando em 13 ms para o sistema fiado e 9 ms para as mensagens GOOSE.

Desta forma, verifica-se que a implementação da seletividade via contato elétrico teve pior desempenho em relação às mensagens GOOSE IEC 61850.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como foco apresentar o desempenho da seletividade lógica diante de algumas variações de meios de interligação e protocolos de comunicação com relação ao tempo de resposta dos sinais de bloqueio.

Foram apresentados os resultados de alguns trabalhos provenientes da literatura técnica nacional e internacional, demonstrando que existem variações de desempenho dependendo tanto da forma de interligação (sistema fiado; protocolos próprios de comunicação; mensagens prioritárias GOOSE IEC 61850) como do fabricante do *IED*. Entretanto, para os estudos de proteção, este impacto é mínimo em função dos baixos valores dos tempos de resposta verificados.

Nas topologias em redes de comunicação ethernet, foram apresentados resultados de desempenho de velocidade em condições normais e críticas de tráfego de dados na rede, sendo que este impacto, de uma forma geral, não é significativo para os estudos de proteção.

Por último, foram apresentados resultados de testes realizados em laboratórios de dois fabricantes, confirmando-se, de forma geral, os resultados apresentados na literatura técnica nacional e internacional.

## **4 ESTUDO DE CASO – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SELETIVIDADES LÓGICA E CONVENCIONAL**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Uma vez apresentada a conceituação, os tipos de seletividade existentes e as formas de implementação da seletividade lógica, neste capítulo será realizada uma análise comparativa entre a aplicação da seletividade lógica e a seletividade convencional, utilizando como estudo de caso um sistema elétrico industrial de grande porte.

Neste contexto, será avaliado o desempenho de cada tipo de seletividade (lógica e convencional), comparando-se os tempos de atuação dos dispositivos de proteção, simulando-se curtos-circuitos em diversos pontos do sistema industrial utilizado para estudo.

### **4.2 ESTUDO DE CASO – DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO**

O estudo de caso será realizado tomando-se como base um sistema elétrico industrial real, que se encontra em plena operação, partindo-se de um sistema de baixa tensão (0,48 kV), média (4,16 e 13,8 kV) até a alta tensão (138 kV). Normalmente, a aplicação da seletividade lógica ocorre nos níveis de média e alta tensão, entretanto, neste trabalho, também será avaliada a sua aplicação na baixa tensão.

O complexo industrial que será tomado como referência para este estudo diz respeito a uma empresa brasileira da área de mineração, sendo que a planta industrial divide-se em três usinas (Usinas 1, 2 e 3). Existe uma subestação principal para alimentação das Usinas 1 e 2, e outra subestação principal para alimentação exclusiva da Usina 3, sendo que esta última usina teve sua operação iniciada recentemente.

O estudo de caso concentra-se no sistema da Usina 3, constituído por uma subestação principal, que supre quatro subestações unitárias conforme mostrado na figura 4.1.

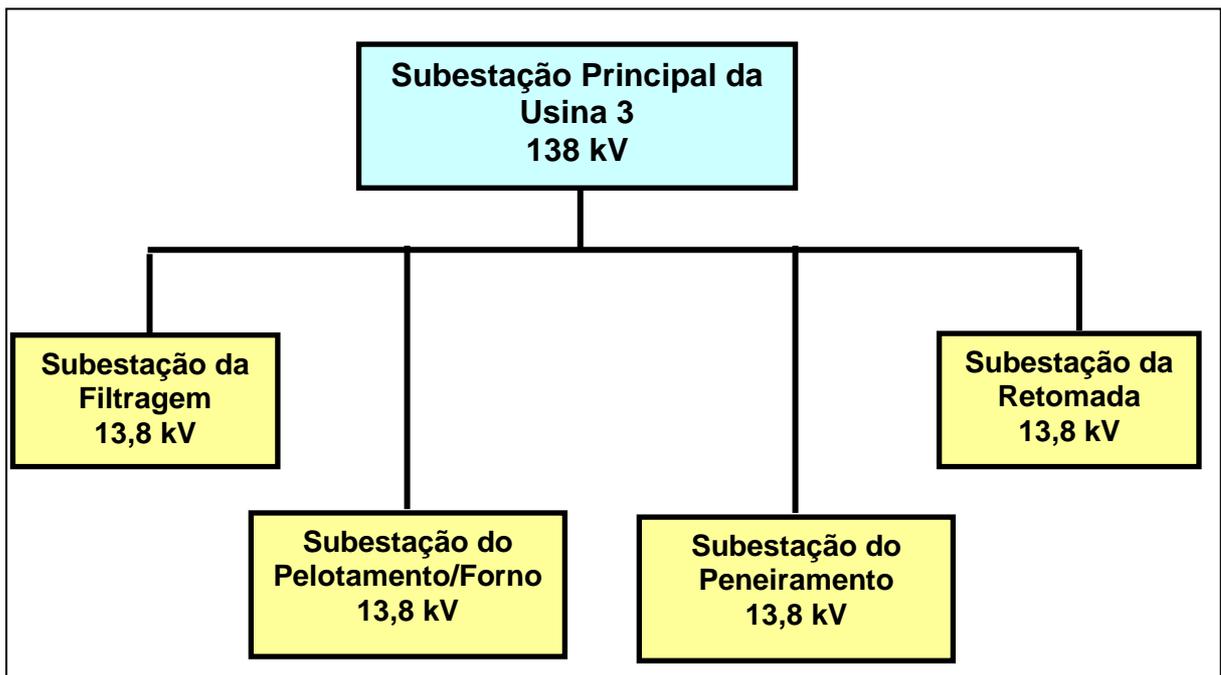


Figura 4.1 – Sistema elétrico da Usina 3.

A denominação das subestações elétricas secundárias da Usina 3 foi definida de forma macro, baseando-se em subdivisões dos processos operacionais da atividade de mineração, conforme pode ser visto abaixo:

- **Subestação Principal**
- **Subestação da Filtragem**
- **Subestação do Pelotamento/Forno**
- **Subestação do Peneiramento**
- **Subestação da Retomada**

Para o propósito deste trabalho, as análises serão conduzidas somente para uma parcela do sistema elétrico, restritas às subestações Principal e Filtragem mostradas na figura 4.1.

Esta decisão deve-se ao fato de que estas subestações são semelhantes às demais tanto no aspecto elétrico como construtivo.

Partindo-se desta premissa, será apresentada na seqüência uma descrição detalhada da composição do sistema elétrico industrial em questão, focando-se nas duas subestações elétricas selecionadas.

### **4.2.1 Sistema Elétrico - Usina 3**

O suprimento de energia elétrica para a Usina 3 é realizado através da sua Subestação Principal, que recebe alimentação elétrica em 138 kV e através de dois transformadores de 50/60 MVA reduz a tensão para 13,8 kV.

Os transformadores operam normalmente isolados, alimentando suas respectivas barras em 13,8 kV, a partir das quais derivam os disjuntores alimentadores que suprem as subestações secundárias correspondentes, conforme figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

#### **4.2.1.1 Subestação Principal - Usina 3**

A Subestação Principal em 138 kV responsável pelo suprimento de energia elétrica do complexo industrial da Usina 3, recebe energia através de uma linha de transmissão 138 kV localizada internamente à área industrial.

No pátio externo da subestação, existe um conjunto de dispositivos de manobras, proteção e medição (disjuntores, seccionadores, TCs e TPs), além dos dois transformadores trifásicos de potência 50/60 MVA, providos de comutadores automáticos de TAPs (*LTCs*).

A figura 4.2 apresenta a configuração geral desta subestação.

Na entrada da subestação existe um disjuntor de alimentação geral da Usina 3, sendo realizada a distribuição da energia via um barramento através de dois disjuntores de alimentação de dois transformadores de 50/60 MVA.

O suprimento em 13,8 kV proveniente dos secundários dos transformadores trifásicos fornece a energia para as duas barras de alimentação 13,8 kV localizadas no interior da sala de controle da Subestação Principal, conforme figuras 4.3 e 4.4.

Estas duas barras podem ser interligadas através de um disjuntor de interligação (TIE), caso seja necessário por alguma razão de indisponibilidade operacional de uma das entradas de alimentação.

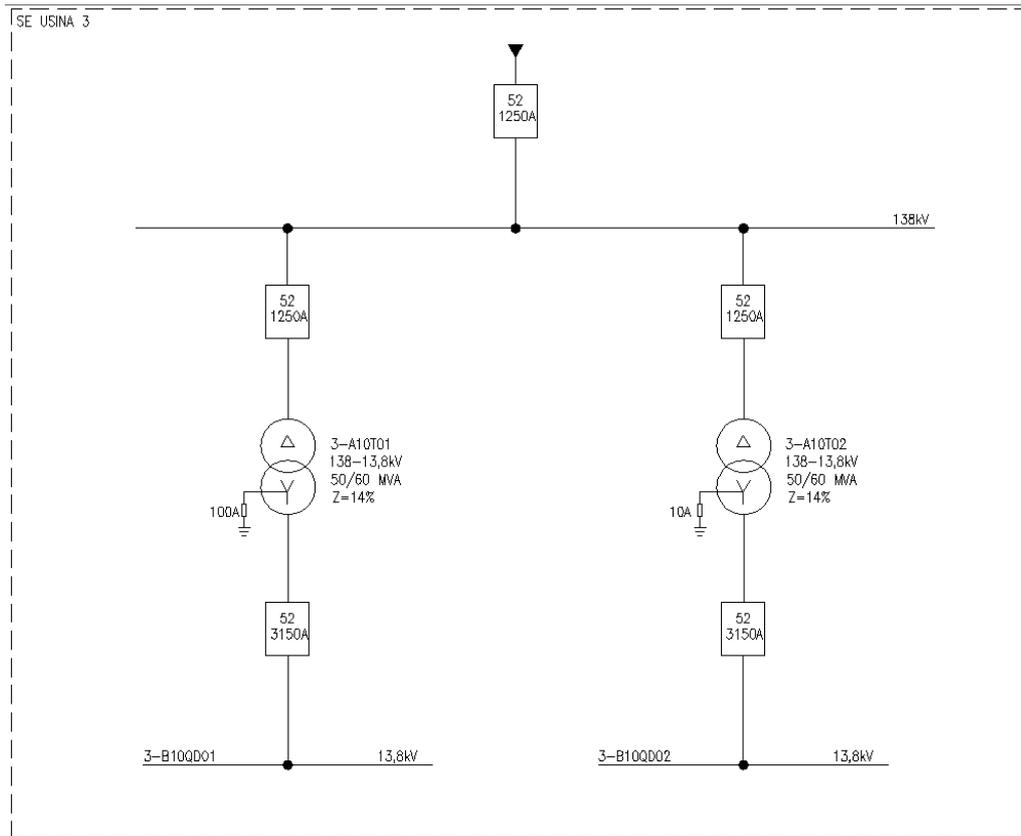


Figura 4.2 – Configuração geral da subestação da Usina 3.

Nas barras de 13,8 kV estão instalados os disjuntores dos circuitos alimentadores responsáveis pelo suprimento das subestações secundárias conforme já descrito no item 4.2.

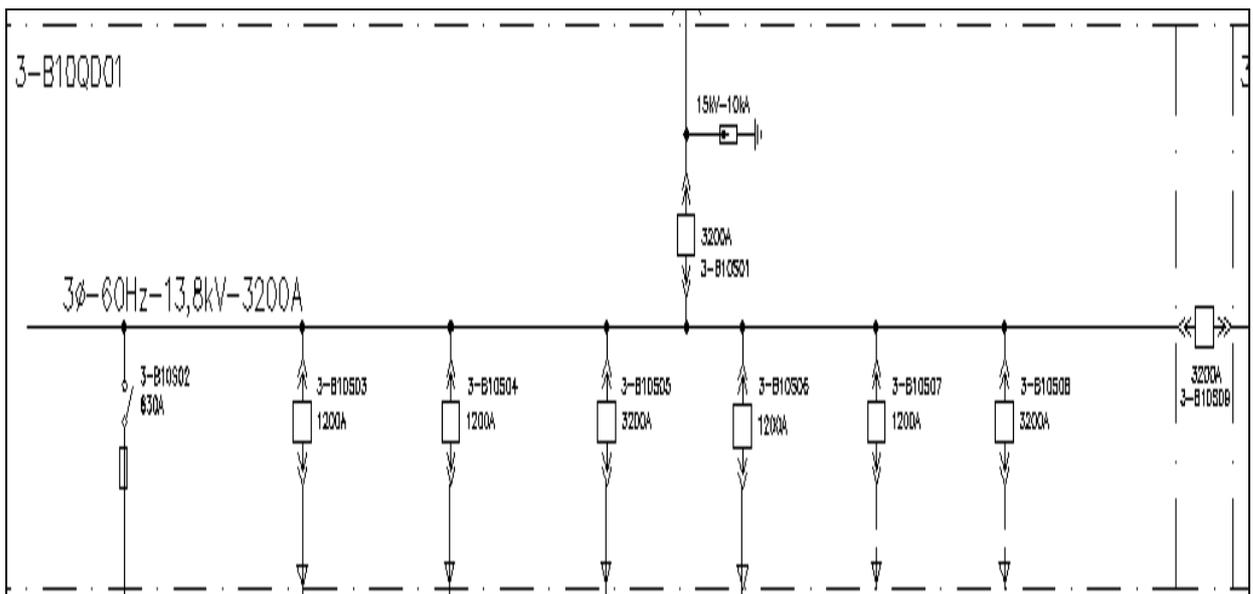


Figura 4.3 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B10QD01.

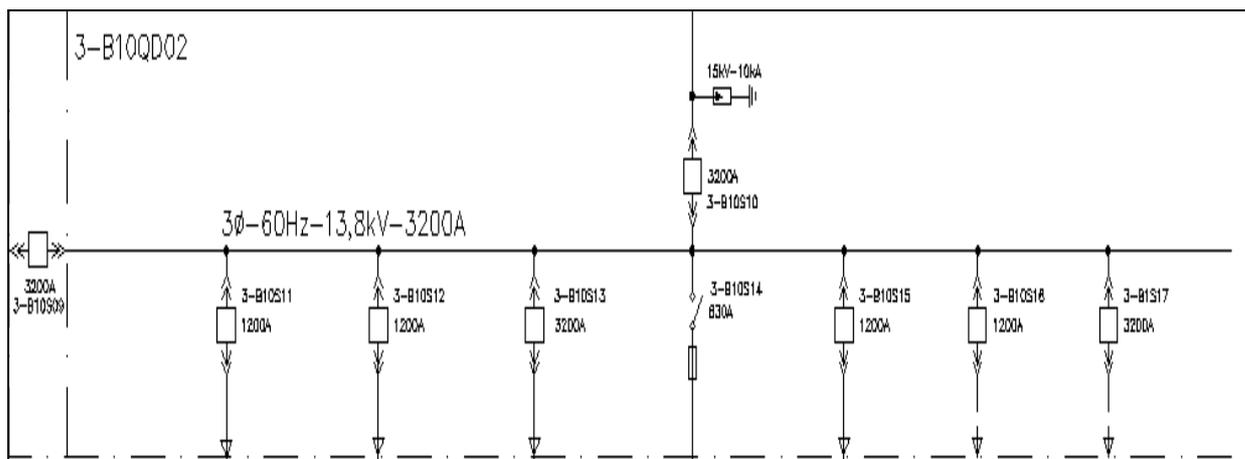


Figura 4.4 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B10QD02.

Nas barras de 13,8 kV da subestação principal existem seis (6) disjuntores que fazem a distribuição para as subestações elétricas secundárias, dispostos da seguinte forma:

- **Subestação da Filtragem** - dois circuitos alimentadores com disjuntores de 1200 A (3 – B10S06 e 3 – B10S12);
- **Subestação do Pelotamento/Forno** - dois circuitos alimentadores com disjuntores de 3200 A (3 – B10S05 e 3 – B10S13);
- **Subestação do Peneiramento** - um circuito alimentador com disjuntor de 1200 A (3 – B10S15);
- **Subestação da Retomada** - um circuito alimentador com disjuntor de 1200 A (3 – B10S04);

Todos os circuitos alimentadores provenientes das barras principais em 13,8 kV são protegidos e monitorados por relés de proteção micro-processados, que estão sincronizados por sistema GPS (*Global Positioning System*), utilizando protocolo de sincronismo IRIG-B.

Pelo aspecto de controle, monitoramento e diagnóstico, a subestação principal da Usina 3 é equipada através de um sistema automatizado, com comunicação em rede Ethernet, com uma interface homem-máquina que possibilita a supervisão de todas as mensagens referentes aos eventos ocorridos no sistema elétrico.

#### **4.2.1.2 Subestação da Filtragem**

O suprimento de energia desta subestação é realizado via dois alimentadores de 13,8 kV (3-B10S06 e 3-B10S12), proveniente da Subestação Principal da Usina 3.

A alimentação geral em 13,8 kV desta subestação é realizada através de dois disjuntores (3-B1S01 e 3-B1S07), sendo que estes disjuntores suprem duas barras denominadas 3-B1QD01 e 3-B1QD02, conforme figuras 4.5 e 4.6.

Existe a possibilidade de interligação destas duas barras através do disjuntor 3-B1S06.

Destas duas barras derivam dez alimentadores em 13,8 kV responsáveis pelo suprimento em baixa e média tensão (0,48 kV e 4,16 kV), alimentando as áreas industriais.

Nesta subestação estão concentrados dois barramentos alimentadores de motores de média tensão em 4160 V (CCMs J1CM01 e J1CM02) e sete barramentos alimentadores de motores de baixa tensão em 480 V (CCMs E1CM01 a E1CM07), sendo estes últimos barramentos constituídos por derramadores de partida direta de motores assim como também por inversores de frequência para controle de velocidade.

O sistema de proteção instalado nos barramentos de média tensão é formado por relés de proteção micro-processados para aplicação em alimentadores e proteção de transformadores, e referente aos alimentadores de CCMs em 480 V, estes são protegidos por disjuntores trifásicos equipados com módulos eletrônicos de proteção.

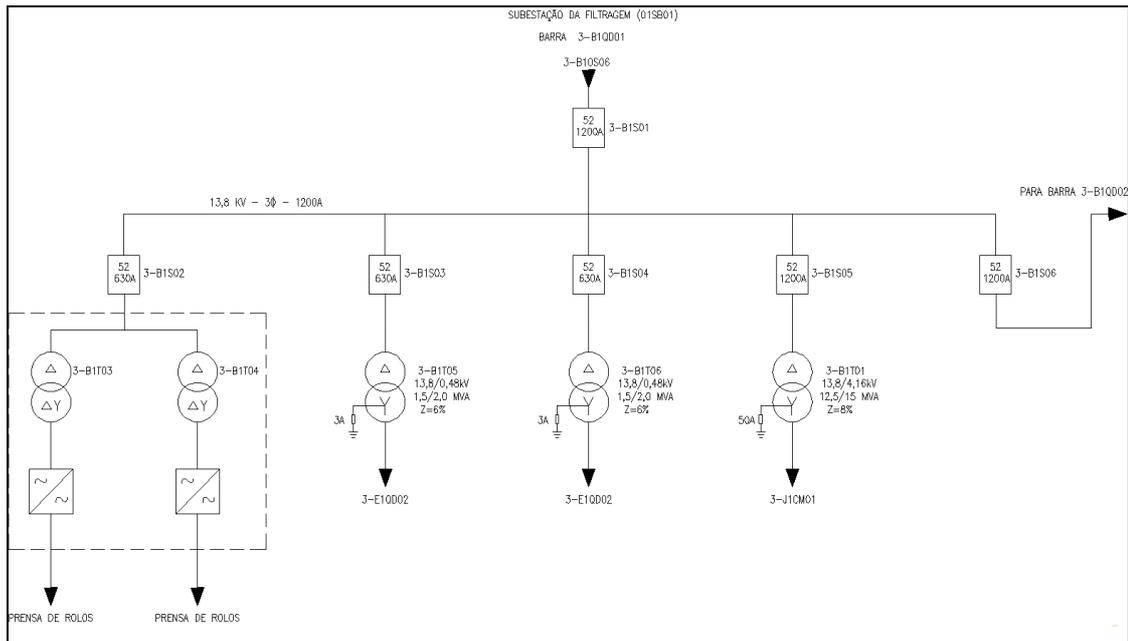


Figura 4-5 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B1QD01.

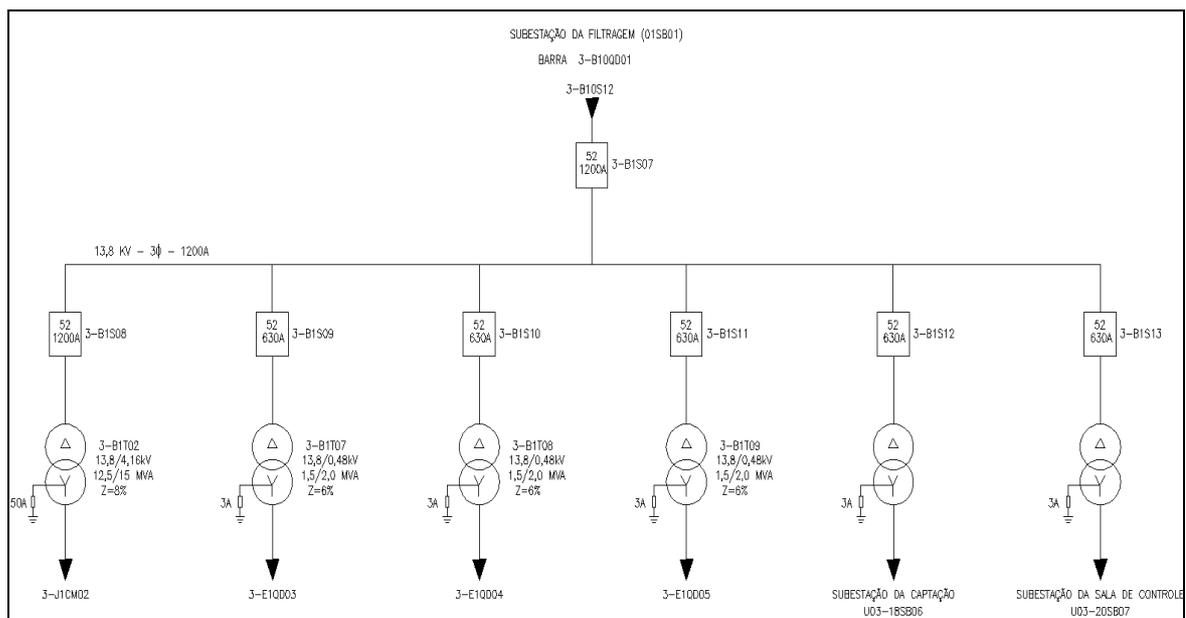


Figura 4.6 – Alimentadores 13,8 kV do barramento 3-B1QD02.

### 4.3 ESTUDO DE SELETIVIDADE – CRITÉRIOS E PREMISSAS

O estudo de proteção do sistema elétrico industrial avaliado considerou a aplicação da seletividade lógica através do sistema fiado (entradas/saídas discretas), restrita a cada subestação existente (seletividade lógica entre painéis), não sendo aplicada este tipo de seletividade entre subestações.

Os critérios adotados no estudo de seletividade para a Subestação Principal e Subestação da Filtragem foram:

- ✓ A operação do sistema elétrico ocorrerá de forma isolada, ou seja, somente será permitida a operação paralela dos alimentadores em condição temporária, visando o isolamento de barras para manutenção.
- ✓ As correntes de curto-circuito fase-terra são limitadas por resistor de aterramento de 100 A/10 s no nível de tensão de 13,8 V, em 50 A/10 s em 4,16 kV e de 3 A em regime permanente em 0,48 kV. Os ajustes propostos para os relés são 50 A, 25 A e de 3 A, respectivamente, para as tensões 13,8 kV, 4,16 kV e 0,48 kV. No nível de tensão de 0,48 kV o sistema está configurado somente para dar alarme;
- ✓ Os níveis de curto-circuito trifásico e fase-terra foram obtidos do estudo de curto-circuito existente;
- ✓ Todas as premissas e filosofias de proteção aplicadas no estudo de seletividade estão baseadas nas normas IEEE Std 242-2001, NFPA 70-2002 e C37.91-2000;
- ✓ A proteção contra sobre-corrente primária do transformador (função 51) contempla o ajuste entre 120 e 250% da corrente nominal do transformador;
- ✓ A proteção instantânea contra curto-circuito (função 50) considera a corrente de *IN RUSH*, não podendo esta proteção ser sensibilizada na energização do transformador;
- ✓ A corrente de energização do transformador (*IN RUSH*) foi adotada como sendo 12 vezes a corrente nominal do transformador para potências maiores que 2 MVA, e 8 vezes a corrente nominal para transformadores menores que 2 MVA num tempo de 100ms;
- ✓ Os intervalos de temporização foram adotados conforme a norma IEEE Std 242-2001, sendo apresentados no Quadro 4.1.

<b>INTERVALOS DE TEMPO PARA A SELETIVIDADE</b>		
<b>Eventos e Tolerância</b>	<b>Tipo de Relé</b>	
	<b>Eletromecânico</b>	<b>Estático</b>
<b>Tempo de Abertura do Disjuntor</b>	<b>0,08 seg</b>	<b>0,08 seg</b>
<b>Overtravel do Relé</b>	<b>0,10 seg</b>	<b>0,0 seg</b>
<b>Tolerância e Erros</b>	<b>0,17 seg</b>	<b>0,17 seg</b>
<b>Total</b>	<b>0,35 seg</b>	<b>0,25 seg</b>

**QUADRO 4.1 - Intervalos considerados para seletividade conforme norma.**

Foi adotado, neste caso, um intervalo de seletividade entre 0,25 a 0,40s, considerando que o sistema elétrico é composto somente por relés de proteção micro-processados.

- ✓ Devido à inexistência de interligação entre os relés de proteção da Subestação Principal e as subestações secundárias, foi definido o intervalo de temporização para a seletividade convencional para proteção de fase de 0,40 s, para faltas ocorrendo nas subestações secundárias, e para seletividade lógica de 0,10 s para faltas ocorrendo na barra 13,8kV da Subestação Principal.
- ✓ Não foi aplicada a seletividade lógica para faltas fase-terra na Subestação da Filtragem, devido aos níveis baixos de corrente de curto-circuito limitados pelos resistores limitadores de terra.
- ✓ Para os circuitos em baixa tensão (0,48 kV), conforme o estudo de seletividade, as funções de proteção instantâneas (50) contra curto-circuito não foram habilitadas, não sendo aplicada a seletividade lógica.

#### **4.4 ANÁLISE COMPARATIVA – ESTUDO DE CASO**

Neste item será realizada uma análise da aplicação da seletividade lógica, comparando-se os tempos de atuação da proteção em relação à seletividade convencional, com foco principal na seletividade cronométrica.

A análise da seletividade será realizada em função da atuação do dispositivo de proteção logo a montante do ponto da falta, considerando também a primeira proteção de retaguarda.

Para cada ponto de falta, serão utilizados os valores calculados de corrente conforme o estudo de curto-circuito, assim como os gráficos das curvas de atuação dos relés de proteção.

A figura 4.7 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico selecionado, conforme comentado, indicando-se os pontos de falta F1 a F13 considerados para o objetivo pretendido neste trabalho.

#### **4.4.1 PONTO DE FALTA F1**

Esta falta ocorre no circuito em 4,16 kV no cabo de alimentação do motor elétrico de média tensão, comandado e protegido por um demarrador com configuração típica constituída por fusível e contator de média tensão. Este demarrador está conectado à barra 3 - J1CM01 conforme figura 4.7, com a alimentação a montante realizada pelo disjuntor 3 – J1S01 proveniente do secundário do transformador 3 – B1T01.

Para este tipo de alimentador, o componente imediatamente responsável pela proteção contra curto-circuito é o fusível de média tensão, sendo que o relé de proteção existente neste demarrador é responsável pelas demais funções de proteção.

Para esta falta, o valor da corrente de curto-circuito subtransitória trifásica calculada é de 5,59 kA na tensão de referência de 13,8 kV, conforme a figura 4.8.

Para a falta em F1, a corrente de curto-circuito fará com que o fusível de 400 A atue instantaneamente (curva 2), e simultaneamente sensibilizará a função de sobre-corrente dos relés de proteção de curva 1 e curva 3.

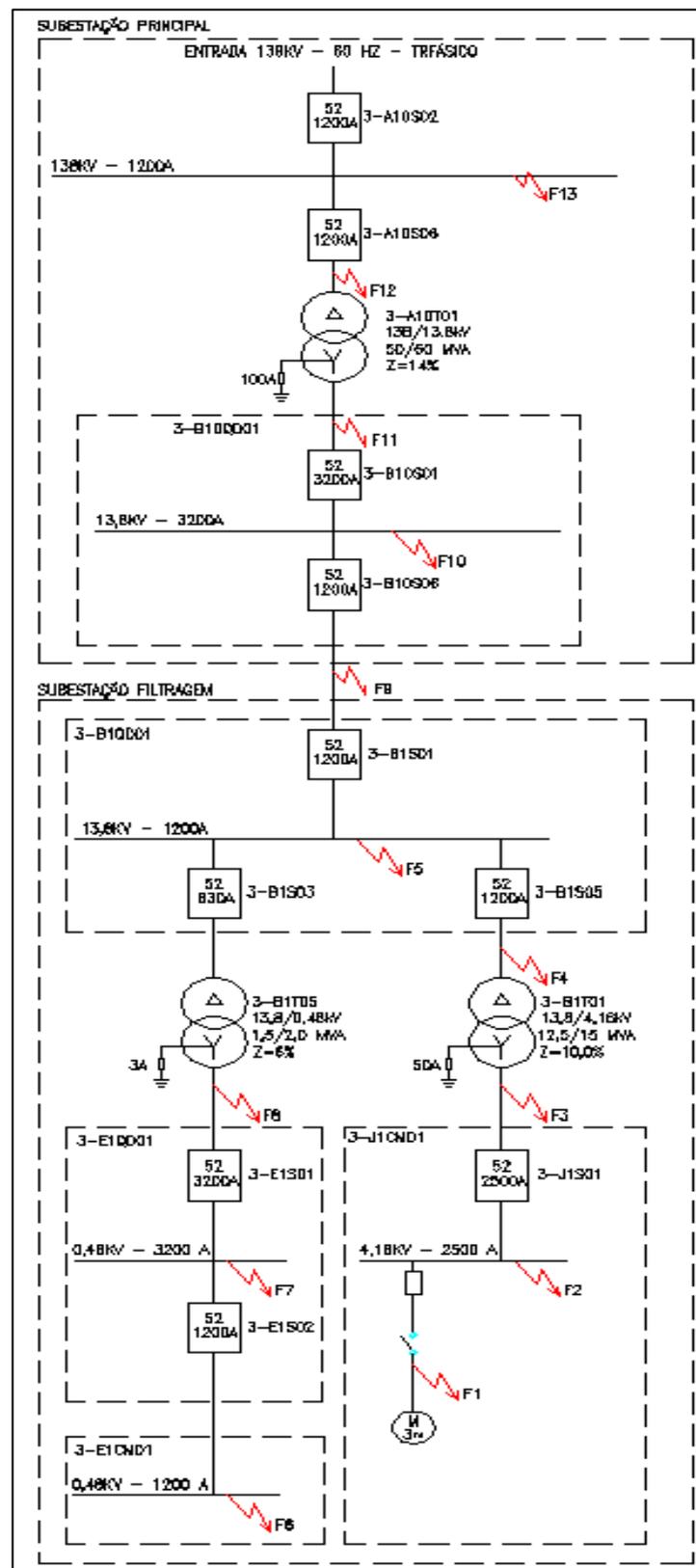


Figura 4.7 – Configuração do sistema elétrico e falhas analisadas.



Análise da Proteção para Falta em F1	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 1	Envia sinal de bloqueio da seletividade lógica para relé de proteção 3
Relé de Proteção 3	Bloqueado em 100 ms pelo relé de proteção 1
Fusível 400 A	Atuação instantânea em 10 ms protegendo o circuito

QUADRO 4.2 - Atuação da proteção para falta F1.

Para este caso, existe a seletividade lógica entre os relés de proteção 1 e 3, conforme observado na figura 4.8.

Numa situação de falha do fusível de média tensão de 400 A, o relé de proteção 3 atuará num tempo de 100 ms pela seletividade lógica, e num tempo de 300 ms pela seletividade cronométrica, comandando a abertura do disjuntor 3-J1S01, alimentador da barra 3-J1CM01, conforme figura 4.7.

#### 4.4.2 PONTO DE FALTA F2

A falta em questão ocorre na barra 3 – J1CM01 representada na figura 4.7. Esta barra é protegida pelo relé associado ao disjuntor de entrada 3 – J1S01, instalado no secundário do transformador 3 – B1T01 (13,8/4,16 kV), sendo este transformador protegido pelo relé do disjuntor 3 – B1S05.

A corrente de curto-circuito calculada é a corrente trifásica transitória na barra 3 – J1CM01, denominada na figura 4.8 de corrente G, no valor de 3,57 kA na referência de 13,8 kV.

A corrente de curto-circuito G sensibilizará os relés de proteção 3, 4 e 5, sendo que somente o relé 3 terá a sua função de sobre-corrente instantânea (50) sensibilizada para comandar a abertura do disjuntor 3 – J1S01.

A parametrização da seletividade lógica, numa forma padrão do estudo de seletividade aplicado a esta instalação, foi definida com um retardo de 100 ms para o sinal de bloqueio entre os relés de proteção situados a jusante em relação ao correspondente a montante.

O Quadro 4.3 resume a atuação da proteção para falta F2.

Análise da Proteção para Falta em F2	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 1	Não envia sinal de bloqueio para relé de proteção 3
Relé de Proteção 3	Atuação em 100 ms pela seletividade lógica
Relé de Proteção 3	Atuação em 300 ms pela seletividade cronométrica ( <i>backup</i> )

QUADRO 4.3 - Atuação da proteção para falta F2.

Este caso está utilizando a filosofia da seletividade cronométrica como backup em função de uma possível falha da seletividade lógica, sendo que pela seletividade lógica a proteção atuará em 100 ms, e pela seletividade cronométrica, a atuação será em 300 ms conforme Quadro 4.3

#### 4.4.3 PONTO DE FALTA F3

Esta falta ocorre no secundário do transformador 3 - B1T01, que é protegido pelos relés de proteção 3 e 4 associados ao disjuntor 3 - B1S05. Neste caso, o relé de proteção 3 está configurado para proteção diferencial e o relé de proteção 4 configurado para proteção de sobre-corrente, pois esta falta está a montante em relação ao TC de proteção de sobre-corrente do relé de proteção 3 (figura 4.7).

Pela figura 4.8, a corrente desta falta é representada pela corrente de curto-circuito G (3,57kA).

Esta corrente sensibilizará a proteção diferencial do transformador através do relé de proteção 3, atuando imediatamente na abertura dos disjuntores e isolamento do transformador 3 – B1T01.

A proteção diferencial por ser mais sensível e naturalmente seletiva, conforme descrito no Capítulo 1, atuará de forma instantânea para esta falta. O Quadro 4.4 ilustra a atuação da proteção.

#### Análise da Proteção para Falta em F3

Dispositivo	Status
Relé de Proteção 1	Não ocorre a sensibilização e não envia bloqueio para relé de proteção 3
Relé de Proteção 3	Não é sensibilizado pela função instantânea (50)
Relé de Proteção 3	Atuação instantânea pela proteção diferencial (87)

**QUADRO 4.4 - Atuação da proteção para falta F3.**

Pela localização da falta, a função instantânea (50) do relé de proteção 3 não é ativada, portanto, não haverá o recurso da seletividade lógica entre os relés de proteção 1 e 3. Assim, numa possível falha da proteção diferencial, a proteção de retaguarda será realizada pelo relé de proteção 4, através da função temporizada em aproximadamente 450 ms.

#### 4.4.4 PONTO DE FALTA F4

Conforme a figura 4.7, esta falta ocorre a jusante do disjuntor 3 – B1S05, associado ao relé de proteção 4, no primário do transformador 3 – B1T01, alimentada pela barra 3 – B1QD01 na tensão de 13,8 kV.

A corrente de curto-circuito trifásica considerada é a transitória ocorrida na barra 3 – B1QD01 representada pela corrente E (11,21 kA), conforme mostrado na figura 4.8. Esta corrente faz sensibilizar a função instantânea tanto do relé de proteção 4 quanto do relé de proteção 5, sendo que entre estes dois relés de proteção foi aplicada a seletividade lógica.

O Quadro 4.5 apresenta a atuação da proteção.

Análise da Proteção para Falta em F4	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 4	Envia sinal de bloqueio para o relé de proteção 5
Relé de Proteção 4	Atuação instantânea (10 ms) pela seletividade amperimétrica
Relé de Proteção 5	Bloqueado em 100 ms pelo relé de proteção 4

**QUADRO 4.5 - Atuação da proteção para falta F4.**

Neste caso foi aplicada a seletividade amperimétrica como recurso da proteção, em função da impedância do transformador 3 – B1T01, fazendo com que a seletividade convencional seja bastante eficiente do ponto de vista da temporização para defeitos no primário do transformador.

Como pode ser observado pela figura 4.8, caso haja uma falha na atuação instantânea do relé de proteção 4, o relé de proteção 5 atuará em 100 ms pela seletividade lógica acionando a abertura do disjuntor 3 – B1S01, e tendo ainda como backup a seletividade cronométrica atuando em 300 ms no mesmo disjuntor.

#### 4.4.5 PONTO DE FALTA F5

Pelo diagrama da figura 4.7, esta falta ocorre na barra 3 – B1QD01, responsável pela alimentação parcial da Subestação da Filtragem. Esta barra é alimentada pelo disjuntor 3 – B1S01 em 13,8 kV associado ao relé de proteção 5.

A alimentação deste disjuntor é proveniente do alimentador 3 – B10S06 da Subestação Principal da Usina 3.

Neste caso, como a falta está sensibilizando relés instalados em subestações diferentes, não foi previsto sinal de bloqueio da seletividade lógica, utilizando-se portanto, apenas a seletividade cronométrica.

A corrente considerada para esta falta é a mesma do caso anterior, ou seja, a corrente E.

Como esta falta não sensibilizará o relé de proteção 4, o relé de proteção 5 não receberá bloqueio e atuará em 100 ms, tendo como retaguarda a seletividade cronométrica em 300 ms no próprio relé. O Quadro 4.6 ilustra a atuação da proteção para este caso.

Análise da Proteção para Falta em F5	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 4	Não envia sinal de bloqueio para o relé de proteção 5
Relé de Proteção 5	Atuação em 100 ms pela seletividade lógica
Relé de Proteção 5	Atuação em 300 ms pela seletividade cronométrica (back-up)

QUADRO 4.6 - Atuação da proteção para falta F5.

Neste ponto também é perceptível o ganho que a seletividade lógica traz para o sistema elétrico com relação à seletividade convencional, resultando numa atuação mais rápida da proteção, com uma diferença de 200 ms.

#### **4.4.6 PONTO DE FALTA F6**

Esta falta está localizada conforme a figura 4.7 na baixa tensão (0,48 kV), mais precisamente na barra do centro de controle de motores (CCM) 3 – E1CM01.

Este CCM é alimentado e protegido pelo disjuntor 3 – E1S02, através da barra 3 – E1QD01, tendo como alimentador geral desta barra o disjuntor 3 – E1S01.

Embora a seletividade lógica não tenha sido aplicada na baixa tensão, buscou-se avaliar possíveis ganhos, verificando-se junto ao fabricante se com os equipamentos existentes é possível aplicar a seletividade lógica, via sistema fiado, utilizando o sistema de controle do módulo micro-processado de proteção dos disjuntores analisados. Neste contexto, será feita uma alteração no tratamento da seletividade em relação ao sistema real implantado, avaliando-se a possibilidade de aplicação da seletividade lógica para este circuito.

A corrente de curto-circuito para falta F6 será a corrente transitória calculada na barra 3 - E1QD01, indicada na figura 4.9 como sendo a corrente E (27,51 kA).

Para a aplicação da seletividade lógica, segundo informação do fabricante, deverá ser utilizado o tempo do sinal de bloqueio no ajuste do curto-retardo do disjuntor a jusante para o disjuntor a montante.

Esta corrente de falta sensibilizará as funções de curto-retardo dos disjuntores 3 – E1S02 e 3 – E1S01, fazendo com que o primeiro disjuntor bloqueie o segundo disjuntor, sendo que o disjuntor 3 – E1S02 é o dispositivo imediatamente responsável pela extinção desta falta.

Pela figura 4.9, a proteção do disjuntor 3 – E1S02 atuará em 80 ms, e a seletividade lógica fará com que o disjuntor a montante seja acionado em 100 ms.

Com este tempo de bloqueio, não é interessante a aplicação da seletividade lógica, pois pela curva de atuação da proteção 2 (disjuntor 3 – E1S01), este atuará em 200 ms como retaguarda em caso de falha da proteção 1 (disjuntor 3 – E1S01).

O Quadro 4.7 resume a atuação da proteção para este caso.

Análise da Proteção para Falta em F6	
Dispositivo	Status
Proteção 1	Envia bloqueio para função curto-retardo para o relé de proteção 2
Proteção 1	Atuação pela função curto-retardo em 80 ms
Proteção 2	Bloqueado em 100 ms pela seletividade lógica
Proteção 2	Atuação em 200 ms pela seletividade cronométrica (back up)

QUADRO 4.7 - Atuação da proteção para falta F6.

#### 4.4.7 PONTO DE FALTA F7

Esta falta ocorre diretamente na barra 3 – E1QD01 em 0,48 kV, situada a montante do disjuntor 3 – E1S02, sendo esta barra alimentada pelo disjuntor 3 – E1S01, instalado no secundário do transformador 3 – B1T05 (13,8/0,48 kV).

A corrente de curto-circuito considerada é a mesma do caso anterior, ou seja, a corrente E no valor de 27,51kA, conforme a figura 4.9.

Será avaliada a aplicação da seletividade lógica entre as proteções dos disjuntores 3 – E1S01 e 3 – B1S03, sendo este último instalado no primário do transformador 3 – B1T05.

Esta corrente de falta sensibilizará a proteção 2 na sua função de curto-retardo e a função temporizada do relé de proteção 3, sendo que a proteção 2 enviará o sinal de bloqueio da seletividade lógica para o relé de proteção 3, e a proteção 2 atuará num tempo de 200 ms pela função de curto retardo.

O Quadro 4.8 resume a atuação da proteção.

Análise da Proteção para Falta em F7	
Dispositivo	Status
Proteção 2	Atuação pela seletividade cronométrica em 200 ms
Relé de Proteção 3	Retaguarda pela seletividade cronométrica em 500 ms (função temporizada)

**QUADRO 4.8 - Atuação da proteção para falta F7.**

Conclui-se que a aplicação da seletividade lógica para este caso também não é viável, em função da corrente de falta sensibilizar o relé de proteção 3 somente na sua função temporizada, fato que não trará ganho em relação a temporização.

#### **4.4.8 Ponto de Falta F8**

A falta F8 ocorre no secundário do transformador 3 – B1T05 conforme diagrama da figura 4.7. A proteção imediatamente responsável neste caso é realizada pelo relé 3, associado ao disjuntor 3 – B1S03, conforme figura 4.9.

A corrente de falta F8 é representada pela corrente E (27,5 kA em 480 V), correspondendo a uma corrente de falta de 0,96 kA em 13,8 kV.

Pela figura 4.9, esta corrente sensibilizará o relé de proteção 3 na sua região temporizada com atuação em 500 ms. Sendo assim, o secundário deste transformador é protegido pela função temporizada do relé do primário.

O estudo de proteção não previu a aplicação da função diferencial para transformadores de menor potência (2MVA).



A corrente de falta que sensibilizará o relé de proteção 1 conforme a figura 4.10 é a corrente C (11,6kA), correspondendo à corrente de curto-circuito na barra 3 – B10QD01, mostrada na figura 4.11.

O Quadro 4.9 apresenta o comportamento da atuação da proteção.

Análise da Proteção da Falta em F9	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 1	Sensibilizado e envia bloqueio para o relé de proteção 3
Relé de Proteção 1	Atuação pela seletividade cronométrica em 400 ms
Relé de Proteção 3	Bloqueado pela seletividade lógica em 100 ms

QUADRO 4.9 - Atuação da proteção para falta F9.

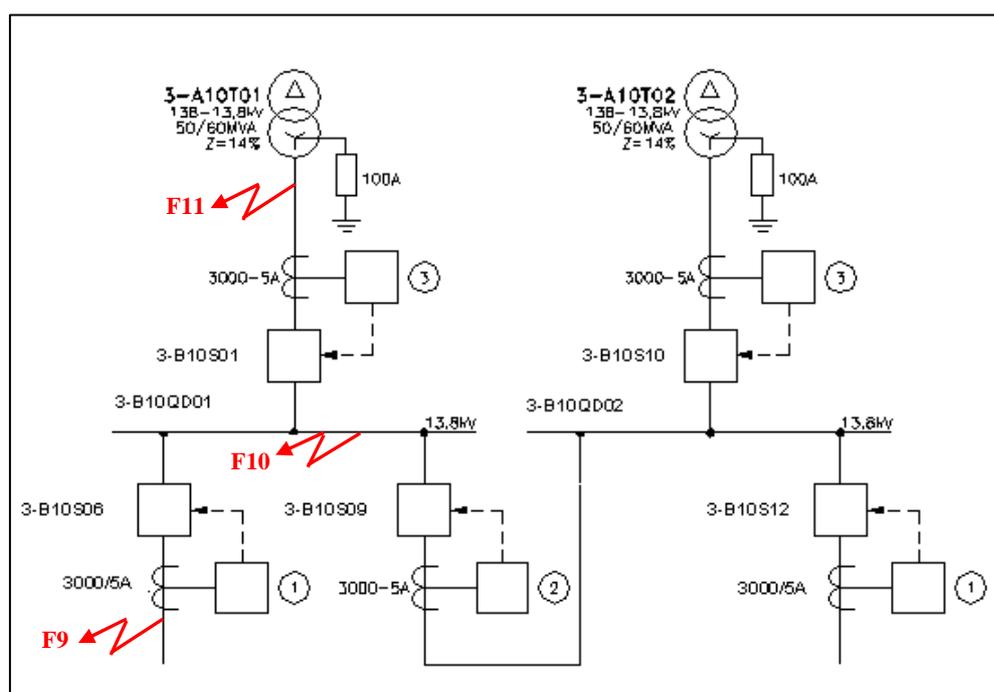


Figura 4.10 – Diagrama detalhado para faltas F9, F10 e F11.

Para esta falta, o relé de proteção 3 atua como retaguarda pela seletividade cronométrica em 850 ms.

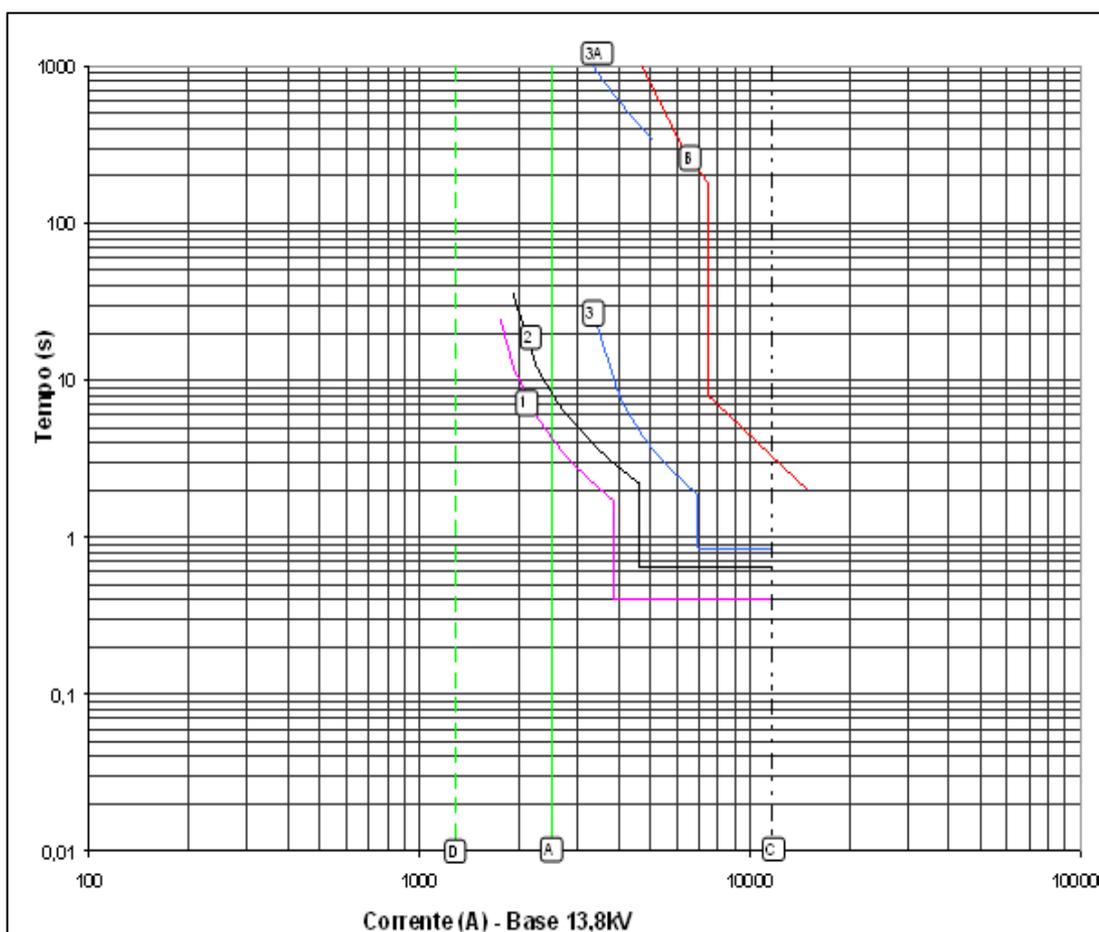


Figura 4.11 – Curvas de atuação tempo-corrente para falta F9 e F10.

#### 4.4.10 PONTO DE FALTA F10

Esta falta ocorre na barra 3 – B10QD01 em 13,8 kV, localizada na Subestação Principal, sendo alimentada e protegida pelo disjuntor 3 – B10S01, associado ao relé de proteção 3, conforme as figuras 4.7 e 4.10.

Pela figura 4.11, verifica-se que a corrente de falta C (11,6 kA) sensibilizará pela função instantânea (50) o relé de proteção 3.

Nesta aplicação foi configurada a seletividade lógica entre os relés de proteção 1 e 3 associados aos disjuntores 3 – B10S06 e 3 – B10S01, com tempo de bloqueio em 100 ms.

O Quadro 4.10 apresenta o comportamento da proteção para a falta em F10.

Análise da Proteção para Falta em F10	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 1	Não é sensibilizado e não envia bloqueio para o relé de proteção 3
Relé de Proteção 3	Atuação pela seletividade lógica em 100 ms

**QUADRO 4.10 - Atuação da proteção para falta F10.**

Pode-se observar que pela seletividade cronométrica, que o tempo de atuação do relé 3 está em torno de 850 ms, bem superior quando comparado ao tempo da seletividade lógica.

Neste caso, o relé de proteção 3 enviará também o bloqueio da seletividade lógica para o relé de proteção do primário do transformador 3 – A10T01, não representado no diagrama da figura 4.10.

Para o caso de curto-circuito na barra 3 – B10QD01 ou 3 – B10QD02, o relé de proteção 2 associado ao disjuntor 3 – B10S09 (TIE), somente exercerá a sua função caso este disjuntor esteja fechado, fato que não será avaliado por ser uma situação atípica.

#### **4.4.11 PONTO DE FALTA F11**

Esta falta ocorre no secundário do transformador 3 – A10T01 (138/13,8 kV) na Subestação Principal, a montante do disjuntor 3 – B10S01 de alimentação da barra 3 – B10QD01, conforme as figuras 4.7 e 4.10.

O diagrama da figura 4.12 mostra os relés de proteção disponíveis no sistema.

Dependendo do ponto exato de localização da falta, haverá a atuação instantânea da proteção diferencial do transformador, muito embora não esteja representada na Figura 4.12.

Concomitantemente, a proteção 1 não recebe bloqueio da proteção a jusante e atua em 100 ms. Caso haja falha da seletividade lógica, o relé 1 atuará em 850 ms, como back-up, pela seletividade cronométrica.

O Quadro 4.11 apresenta as atuações do sistema de proteção.

Análise da Proteção para Falta em F11	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 1	Envia bloqueio para o relé de proteção 2 pela seletividade lógica
Relé de Proteção 1	Atuação pela seletividade lógica em 100 ms
Relé de Proteção 2	Atuação imediata pela proteção diferencial (prioridade)

QUADRO 4.11 - Atuação da proteção para falta F11.

Devido à grande diferença entre os tempos de atuação da proteção, evidencia-se mais uma vez o significativo ganho para o sistema com a aplicação da seletividade lógica em relação ao resultado obtido com a seletividade cronométrica.

#### 4.4.12 PONTO DE FALTA F12

Localizada a montante do primário do transformador 3 – A10T01 e a jusante do disjuntor 3 – A10S06, sendo este alimentado em 138 kV conforme as figuras 4.7 e 4.12.

A figura 4.12 apresenta os relés de proteção e os disjuntores envolvidos na análise desta falta.

A corrente de falta considerada é de 5 kA na referência de 138 kV, representada pela corrente E na figura 4.13. Esta corrente sensibiliza a função instantânea do relé de proteção 2, com tempo de atuação de 50 ms.

O estudo de proteção considerou a seletividade lógica entre os relés de proteção 2 e 3, sendo representada esta função na figura 4.13 pela curva 3A.

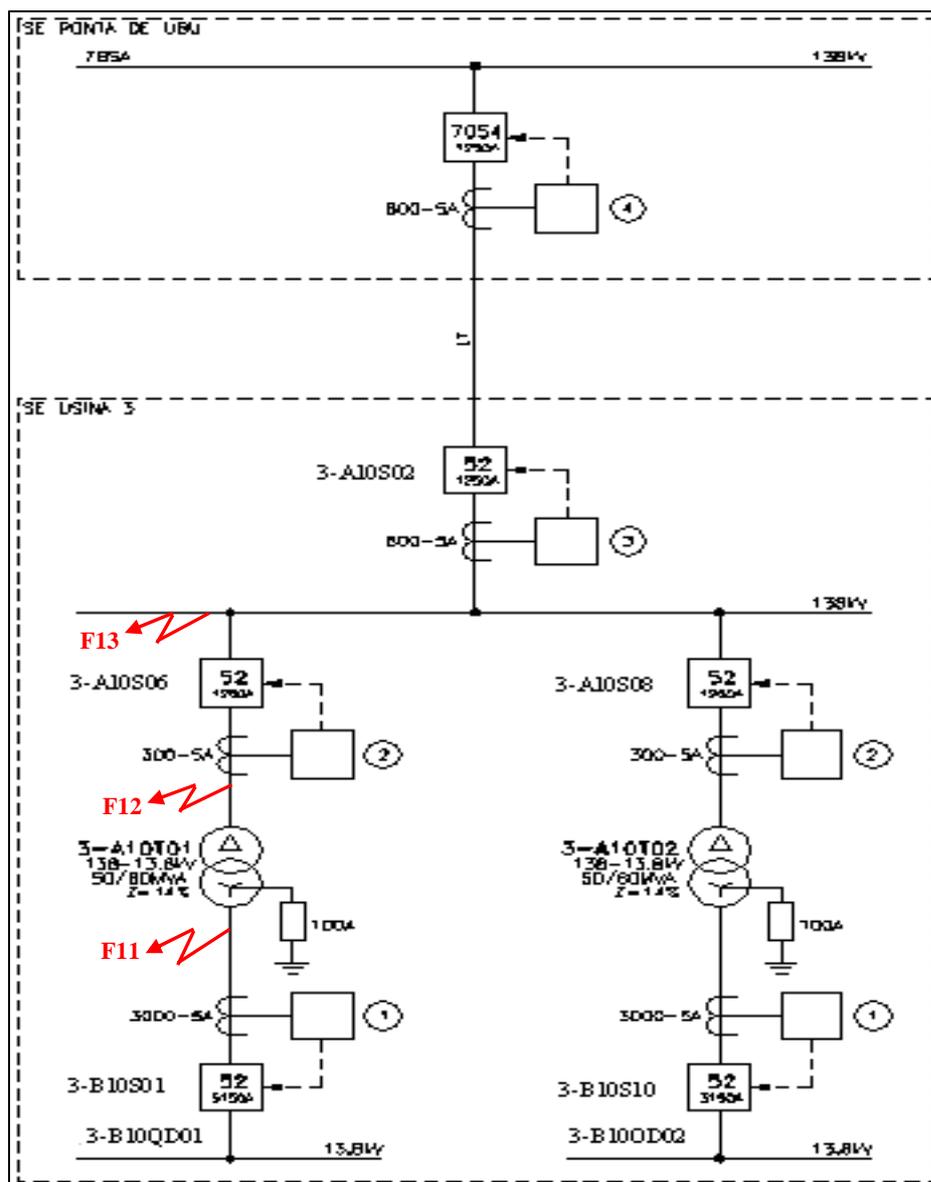


Figura 4.12 – Diagrama detalhado para faltas F11, F12 e F13.

O Quadro 4.12 apresenta o resumo da atuação do sistema de proteção para a falta F12.

Análise da Proteção para Falta em F12	
Dispositivo	Status
Relé de Proteção 1	Não é sensibilizado e não envia bloqueio para o relé de proteção 2
Relé de Proteção 2	Atuação pela seletividade amperimétrica em 50 ms
Relé de Proteção 3	Bloqueado em 100 ms pela seletividade lógica

QUADRO 4.12 - Atuação da proteção para falta F12.



A corrente de falta, correspondente ao valor E da figura 4.13, sensibilizará os relés de proteção 3 e 4 do diagrama da figura 4.12.

Pela estrutura física da instalação, o relé de proteção 4 localiza-se em outra subestação. Sendo assim, não existe interligação física para o sinal de bloqueio da seletividade lógica entre os relés de proteção 3 e 4.

A figura 4.13 ilustra o comportamento da proteção e o Quadro 4.13 detalha a atuação da mesma.

<b>Análise da Proteção para Falta em F13</b>	
<b>Dispositivo</b>	<b>Status</b>
<b>Relé de Proteção 2</b>	<b>Não é sensibilizado e não envia bloqueio para o relé de proteção 3</b>
<b>Relé de Proteção 3</b>	<b>Atuação pela seletividade lógica em 100 ms</b>
<b>Relé de Proteção 4</b>	<b>Atuação em 250 ms pela seletividade cronométrica (back up)</b>

**QUADRO 4.13 - Atuação da proteção para falta F13.**

No caso de uma falha da seletividade lógica relativa à atuação do relé de proteção 3 e disjuntor associado, a retaguarda exercida pelo relé de proteção 4 atuará em 250 ms, admitindo neste caso, por razões operacionais, a falta de seletividade entre os relés de proteção 3 e 4, pois a atuação pela seletividade cronométrica do relé de proteção 3 ocorrerá em 500 ms.

As análises realizadas com a simulação de faltas em diversos locais do sistema comprovaram o ganho da eficiência da proteção em relação aos tempos da atuação, observando-se claramente as vantagens na aplicação da seletividade lógica.

O Quadro 4.14 apresenta um resumo dos resultados obtidos, com destaque para a redução do tempo de atuação da proteção em F10 de 850 ms para 100 ms.

Falta	Temporização (ms)	
	Seletividade Convencional	Seletividade Lógica
F1	Instantâneo pelo fusível	100
	300 (cronométrica retaguarda)	
F2	300	100
F3	Instantâneo (diferencial)	Não Aplicável
	450 (cronométrica)	
F4	Instantâneo (amperimétrica)	100
	300 (cronométrica)	
F5	300	100
F6	80	Não Aplicável
F7	200	Não Aplicável
F8	500	Não Aplicável
F9	400	500 (lógica retaguarda)
	850 (cronométrica retaguarda)	
F10	850	100
F11	Instantâneo	100
	850 (cronométrica retaguarda)	
F12	50 (amperimétrica)	100
	500 (cronométrica retaguarda)	
F13	500	100
	250 (cronométrica retaguarda)	

**QUADRO 4.14 - Resumo da aplicação da seletividade lógica.**

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas no sistema elétrico utilizado como caso teste, representado por uma parcela de um sistema elétrico industrial real, comprova-se que a aplicação da seletividade lógica de uma forma geral é viável e adequada.

Foi observado que em situações específicas, a aplicação da seletividade lógica não é indicada, prevalecendo a seletividade cronométrica. Tal situação ocorre no sistema

de baixa tensão do caso teste, onde ocorre a utilização de disjuntores com sensores do tipo LSI incorporados.

Em alguns pontos específicos do sistema, onde encontram-se instalados transformadores de potência, a aplicação da seletividade amperimétrica apresenta baixos tempos de atuação, justamente com a proteção diferencial, que é seletiva por natureza.

Pelas situações avaliadas, em sua maioria, demonstram que a aplicação da seletividade lógica traz benefícios para o sistema elétrico, minimizando o tempo de exposição da rede a altas correntes de curto-circuito.

A partir do caso teste, conclui-se que nos casos em que a seletividade lógica foi aplicada, a redução na temporização em relação à seletividade convencional apresentou uma variação de tempo de 200 a 750 milissegundos.

Finalmente, pode-se concluir que os ganhos ainda poderiam ser maiores se existisse uma interligação física entre a subestação principal e as subestações unitárias.

## 5 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, procurou-se atender o objetivo fundamental de se estabelecer maiores conhecimentos a respeito da aplicação da seletividade lógica nos estudos de proteção de instalações industriais, com a busca das respostas em relação ao seu real grau de efetividade.

Neste sentido, foram abordadas as formas possíveis de implementação da seletividade lógica, detalhando-se os ganhos ou diferenças que cada forma de implementação pode oferecer ao sistema de proteção, vislumbrando-se através das análises das topologias e tecnologias disponíveis estabelecer uma relação de custo e benefício.

Associada também à criticidade da aplicação exigida e/ou grau de redundância do sistema de proteção envolvido, de forma comparativa, buscou-se respostas para as questões relativas às diferenças técnicas oferecidas por cada tipo de implementação, e se existem diferenças competitivas no quesito eficiência ora disponibilizadas pelos grandes fabricantes de sistemas de proteção.

Diante da particularidade do assunto em questão, faz-se necessário comentar neste momento sobre a dimensão da base de conhecimento para se abordar assuntos de tamanha complexidade, partindo-se das informações a respeito da proteção elétrica, no que tange à aplicação da seletividade nos sistemas industriais, intermediando-se com as implementações dos sistemas em redes de comunicação, e finalizando-se com a recente norma IEC 61850, que veio determinar um padrão de utilização para a aplicação em redes de comunicação, apresentando-se como uma tendência entre os fabricantes e usuários de sistemas para aplicações em subestações.

Com relação ao quesito eficiência abordado anteriormente, é relevante comentar que este assunto foi conduzido com o foco na avaliação do comportamento da temporização aplicada nos estudos de seletividade da proteção, através da aplicação da seletividade lógica nas instalações industriais, sendo considerado este aspecto o mais importante do ponto de vista técnico no tratamento da

proteção elétrica, em função do impacto que envolve desde a concepção do projeto ao comissionamento da instalação envolvida.

Deve-se destacar que, com relação à avaliação citada anteriormente de custo e benefício, faz-se necessário comentar sobre a dificuldade referente à avaliação comparativa do quesito custo de implantação entre os sistemas convencionais e os implementados através das redes de comunicação.

Embora já existam trabalhos abordando este tipo de avaliação, deve-se informar que os ganhos destacados são específicos para cada tipo de projeto, portanto apresenta particularidades para se estabelecer uma referência de custo para definição do ganho com as novas topologias disponíveis no mercado. Entretanto, tem-se uma certeza, de que atualmente pratica-se um maior custo em relação à aquisição dos equipamentos com as novas tecnologias em rede, em particular para a aplicação do novo padrão IEC 61850, porém gera-se uma redução dos custos com infra-estrutura, tempo com comissionamento e *start up* das novas instalações, existindo uma tendência de redução do custo global, além das vantagens previstas com a implantação dos novos projetos num ambiente de rede de comunicação.

Referente à base de conhecimento necessária para encaminhamento do assunto em questão, tratados nos Capítulos 1 e 2, entende-se que os objetivos traçados por este trabalho, traduzindo-se em se estabelecer as informações básicas a respeito dos tipos de seletividade aplicáveis aos estudos de proteção em ambientes industriais, conjugando-se com o objetivo de se demonstrar as formas possíveis de implementação, abordando-se tópicos sobre os projetos tradicionais de aplicação da seletividade lógica, através dos sistemas fiados, avançando-se para as redes de comunicação, apresentando-se uma análise da confiabilidade oferecida pelas diversas topologias analisadas.

Uma abordagem bem contundente relativo a outro objetivo proposto pelo trabalho refere-se aos assuntos tratados no Capítulo 3, que diz respeito ao desempenho da velocidade de resposta quando da solicitação pelo sistema de proteção da atuação da seletividade lógica. Neste capítulo, buscou-se respostas referentes às possíveis diferenças de eficiência na aplicação da seletividade lógica relacionada à temporização de atuação da proteção nas diversas situações discutidas.

Assim, através de trabalhos pesquisados nas referências bibliográficas, foi analisado o desempenho dos sistemas fiados, em redes de comunicação com alguns tipos de protocolos, em situações normais e de saturação da rede, incluindo as mensagens GOOSE aplicadas pela IEC 61850.

Na parte final deste capítulo, foram realizadas simulações juntamente a fabricantes de sistemas de proteção, buscando-se verificar na prática o comportamento da aplicação da seletividade lógica com algumas variantes em relação aos meios de comunicação.

Os resultados deste capítulo apresentam uma variação relativa do comportamento diante das mudanças dos meios de comunicação (sistema fiado; redes de comunicação; protocolos de comunicação aplicados) referente à velocidade de resposta da seletividade lógica. Entretanto, as diferenças apresentadas são significativas do ponto de vista relativo, porém para os estudos de proteção, estas variações não se apresentam relevantes.

Outro marco deste trabalho foi abordado no Capítulo 4, através de uma análise de aplicação em um caso real de uma instalação industrial, verificando-se quais são os possíveis ganhos com a seletividade lógica em relação à aplicação da seletividade convencional, em particular com a seletividade cronométrica.

A abordagem deste capítulo buscou verificar quais benefícios são possíveis de serem alcançados em relação à redução da temporização da atuação da proteção com a seletividade lógica, sendo avaliada esta aplicação em alguns possíveis pontos de falta no sistema elétrico selecionado.

Pode-se observar através das análises realizadas que em algumas circunstâncias específicas, a aplicação da seletividade lógica não seria possível e/ou não traria ganhos para o sistema, em função da particularidade do tipo aplicado da seletividade.

Pelo sistema avaliado, concluí-se que a seletividade lógica aplicada aos estudos de proteção traz ganhos em relação aos tempos de atuação da proteção, podendo impactar desde a concepção do projeto do sistema, assim como também durante a operação deste, relacionado à sua confiabilidade e disponibilidade para o processo produtivo industrial.

Desta forma, este capítulo apresenta-se como uma avaliação de demonstração prática da aplicação da seletividade lógica nas instalações elétricas industriais.

## **5.1 PONTOS DE CONTINUIDADE PARA FUTURAS PESQUISAS**

Em função de algumas particularidades encontradas nas avaliações no trabalho realizado, seguem algumas propostas para futuros desenvolvimentos para dar continuidade nas pesquisas:

- Explorar a análise do comportamento da possibilidade da aplicação da seletividade lógica em circuitos de baixa tensão, em função de representar a grande parte das instalações elétricas em ambientes industriais;
- Avaliar os reais ganhos da aplicação da seletividade lógica entre subestações elétricas (principal e unitárias) nas instalações industriais, com foco na relação de custo e benefício.
- Estabelecer parâmetros e/ou pesquisar trabalhos que possibilitam realizar análise comparativa de custos entre o sistema fiado e rede de comunicação para os futuros projetos de proteção.
- Executar estudos mais aprofundados sobre a Norma IEC 61850.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 14724:2002. Apresentação de trabalhos acadêmicos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

BOTZA, Yousseff *et al.* **Configuration and performance of IEC 61850 for first-time users – UNC Charlotte Senior Design Project.** Pullman/WA USA: University of North Carolina/Schweitzer Engineering Laboratories. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 9 set. 2008.

CEMIG. **Proteção contra sobrecorrentes em redes de distribuição aéreas.** Diretoria de Distribuição. Estudo de Distribuição ED – 3.3. Belo Horizonte: Cemig, nov. 1994.

COMPERJ. **Guia de preparação para a segunda etapa de ensaios para o sistema de proteção e automação do COMPERJ: Versão SIEMENS.** Rio de Janeiro: COMPERJ, 2008.

IGARASHI, Gilberto. **Estudo da IEC61850 e o seu impacto no sistema de automação de subestações. Dissertação.** Escola Politécnica de São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 15 ago 2009.

KIMURA, Sérgio *et al.* **Aplicação do IEC 61850 no mundo real: projeto de modernização de 30 subestações elétricas.** Campinas: Schweitzer Engineering Laboratories, 2008. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 27 jun. 2008.

MERLIN GERIN. **User's manual electrical network protection.** SEPAM Series 20. Paris: Schneider Electric, 2006.

MERLIN GERIN. **User's Manual. Electrical Network Protection.** SEPAM Series 40 Paris: Schneider Electric, 2006.

MORIMOTO, Carlos E. **Redes, guia prático**. São Paulo: GDH Press e Sul Editores, 2008.

ROSSI, Ronaldo. **Proteção de sistemas industriais**. Itajubá: FUPAI, 2005.

SCHEER, Gary W.; DOLEZILEK, David J. **Selecting, designing, and installing modern data networks in electrical substations**. Pullman/WA USA: Schweitzer Engineering Laboratories, 2007. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 10 set. 2008.

\_\_\_\_\_. **Comparando a confiabilidade de topologias de redes Ethernet nas redes de supervisão e controle de subestações**. Campinas: Schweitzer Engineering Laboratories, 2000. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 24 ago. 2008.

SCHEER, Gary W; MOXLEY, Roy. **Digital Communications Improve Contact I/O Reliability**. Pullman/WA USA: Schweitzer Engineering Laboratories, 2005. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 28 ago. 2008.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Proteção de redes elétricas: guia de proteção**. São Paulo: Schneider Electric, 2008.

SENGER, Eduardo César; REIS FILHO, Francisco Antônio; BULGARELLI, Roberval. **O modelamento e ensaios de sistema digital de proteção e automação para o novo sistema de recebimento e distribuição de energia elétrica da Refinaria Presidente Bernardes, baseado em IEDs e no Protocolo IEC 61850**. São Paulo: USP/POLI/Petrobras/RPBC, 2005.

SOUTO, Allan de Oliveira. **I Vision tech'09 : testes de desempenho em sistemas baseados na Norma IEC 61850**. Belo Horizonte: Vision Sistemas Industriais, 2009.

WOODWARD, Darold. **Questões relacionadas com redes Ethernet em subestações**. Pullman/WA USA: Schweitzer Engineering Laboratories, 2001. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 12 ago. 2008.