

Simulação e Avaliação de Sistemas Digitais de Proteção e Automação Baseados em IED Operando com o Protocolo IEC 61850

Eduardo Cesar Senger

LProt – Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



Roberval Bulgarelli
Eduardo Cesar Senger
Francisco Antônio Reis Filho
Adenilson Santos
Enrico Viceconti
Paulo Egídio Zerbinatti

PETROBRAS
Lprot/USP
Lprot/USP
GE
GE
GE

Objetivos:

- Implementação, simulação e ensaios de um sistema digital de automação e proteção baseado em IEDs de última geração e protocolo IEC 61850;
- Verificação da viabilidade de implementação das lógicas de proteção, intertravamento e controle de sistema de automação, diretamente nos relés digitais, sem a utilização de UTRs.
- Avaliação da performance das mensagens prioritárias GOOSE, inclusive em situações de congestionamento do tráfego de dados na rede.

IEC 61850

Communication Networks and Systems in
Substations

Características da IEC 61850:

- Interoperabilidade entre equipamentos de vários fabricantes instalados na SE. Isto permite otimizar a seleção desses equipamentos para aplicações dedicadas e irá aumentar a competição.
- Separação entre a camada de aplicação e a camada de comunicação => uma pode ser alterada ou atualizada sem mudanças na outra.

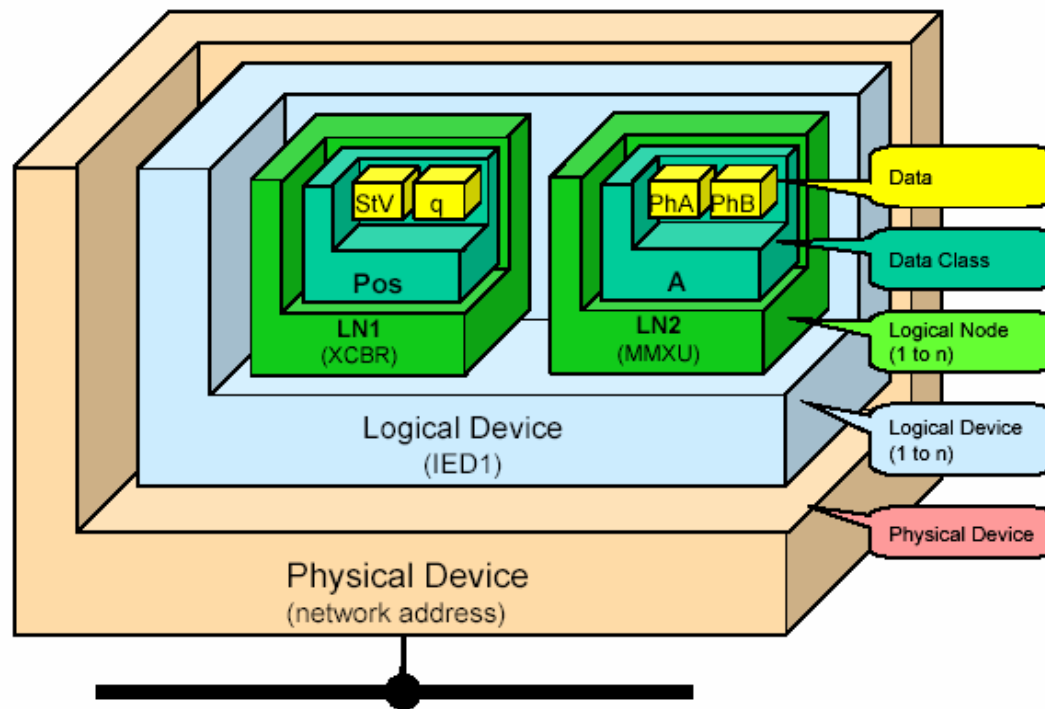
Características da IEC 61850:

- O protocolo 61850 visualiza a automação como um conjunto de funções que podem interoperar de forma distribuída. Essas funções podem estar alocadas em diferentes IEDs conectados em rede.
- Essa livre alocação permite não somente otimizar as aplicações existentes, mas também criar novas aplicações inteligentes conhecendo somente a fonte lógica dos dados .

IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations

Logical Groupings

Devices, nodes, classes and data



Serviços de Comunicação no protocolo 61850

Os modelos de comunicação definidos na 61850 podem ser agrupados em:

- **Cliente/servidor:** conjunto de serviços orientados a ações do tipo: acesso ou notificação automática de informações, comando, transferência de arquivos, seqüência de eventos, etc.
- **Peer-to-peer:** orientado para as aplicações de proteção e controle utilizando um comunicação de alta velocidade, multicast, entre IEDs.

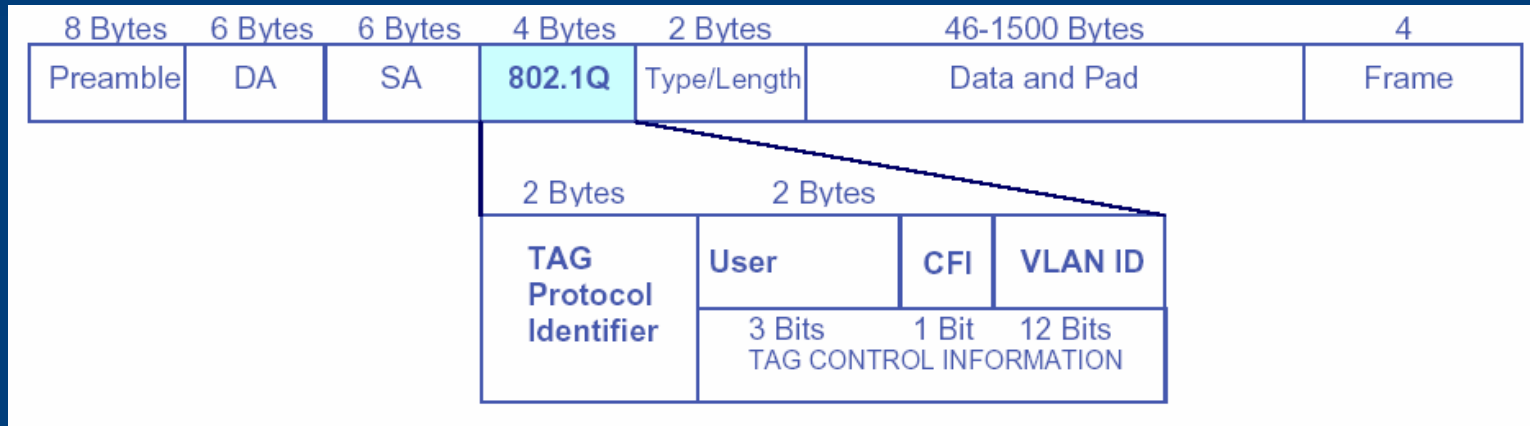
Serviços de Comunicação no protocolo 61850

Tipos de comunicação Peer-to-peer (serviço GSE – *Generic Substation Events*):

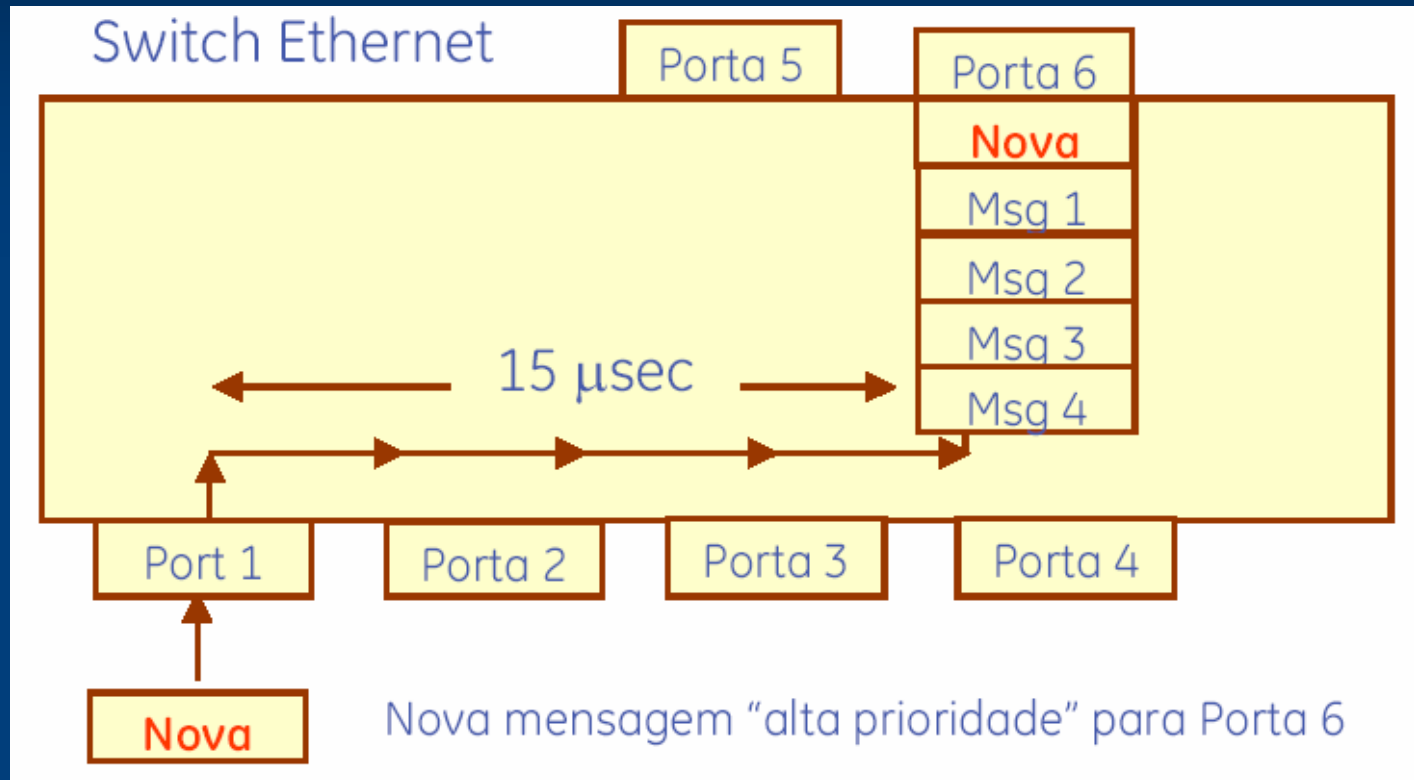
- **GSSE (Generic Substation Event)**: novo nome para a mensagem GOOSE do protocolo UCA.
- **GOOSE (Generic Object Oriented Substation)**: possui tag de prioridade e suporta Virtual LAN (VLAN).

Mensagem GOOSE: Tag de prioridade e VLAN

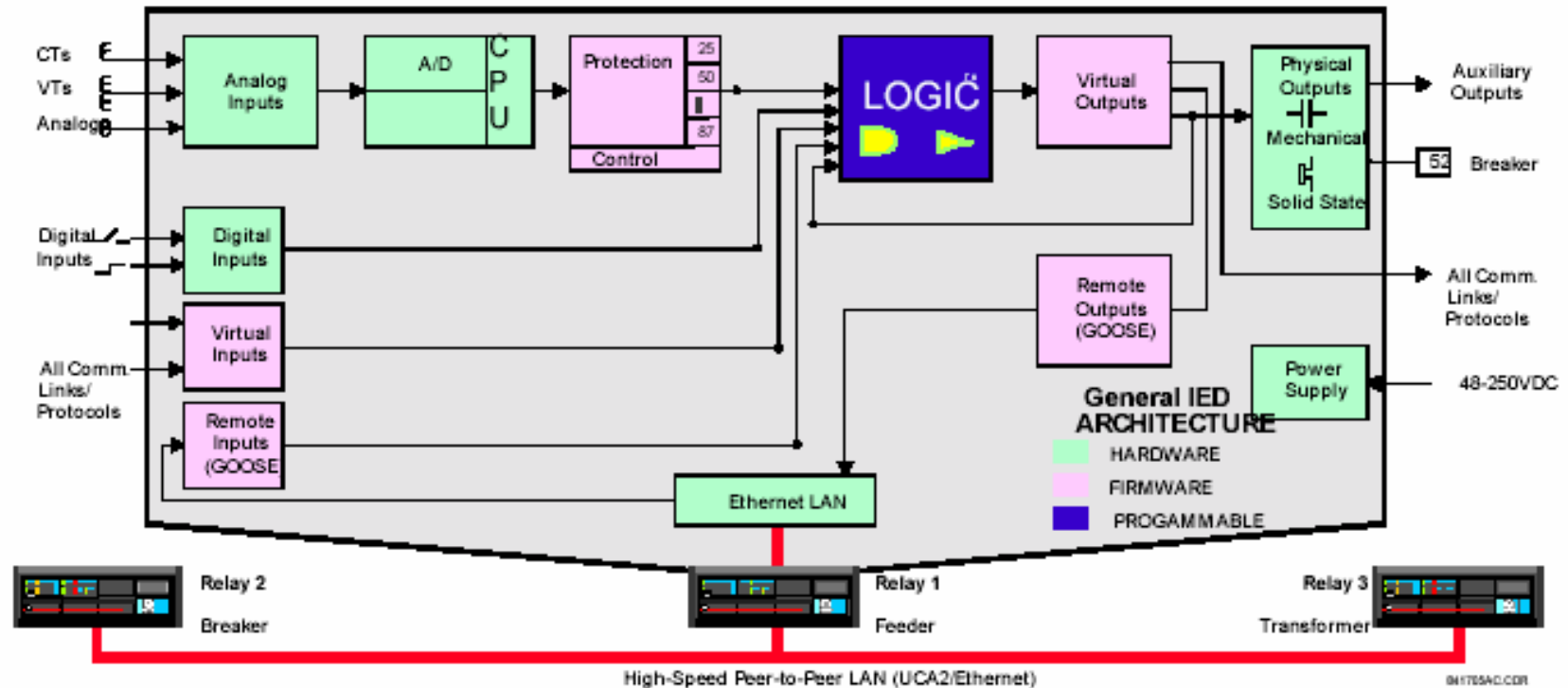
Frame Ethernet:



Priorização das mensagens GOOSE:



Arquitetura dos Modernos IED com IEC 61850:



Reproduzido da referência [1]

Sistema de Recebimento e Distribuição de Energia Elétrica em uma Planta Petroquímica

Novo Sistema Elétrico de Distribuição da Refinaria

Carga: 40 MW – 2.000 motores

Cogeração: 250 MW (ciclo combinado)

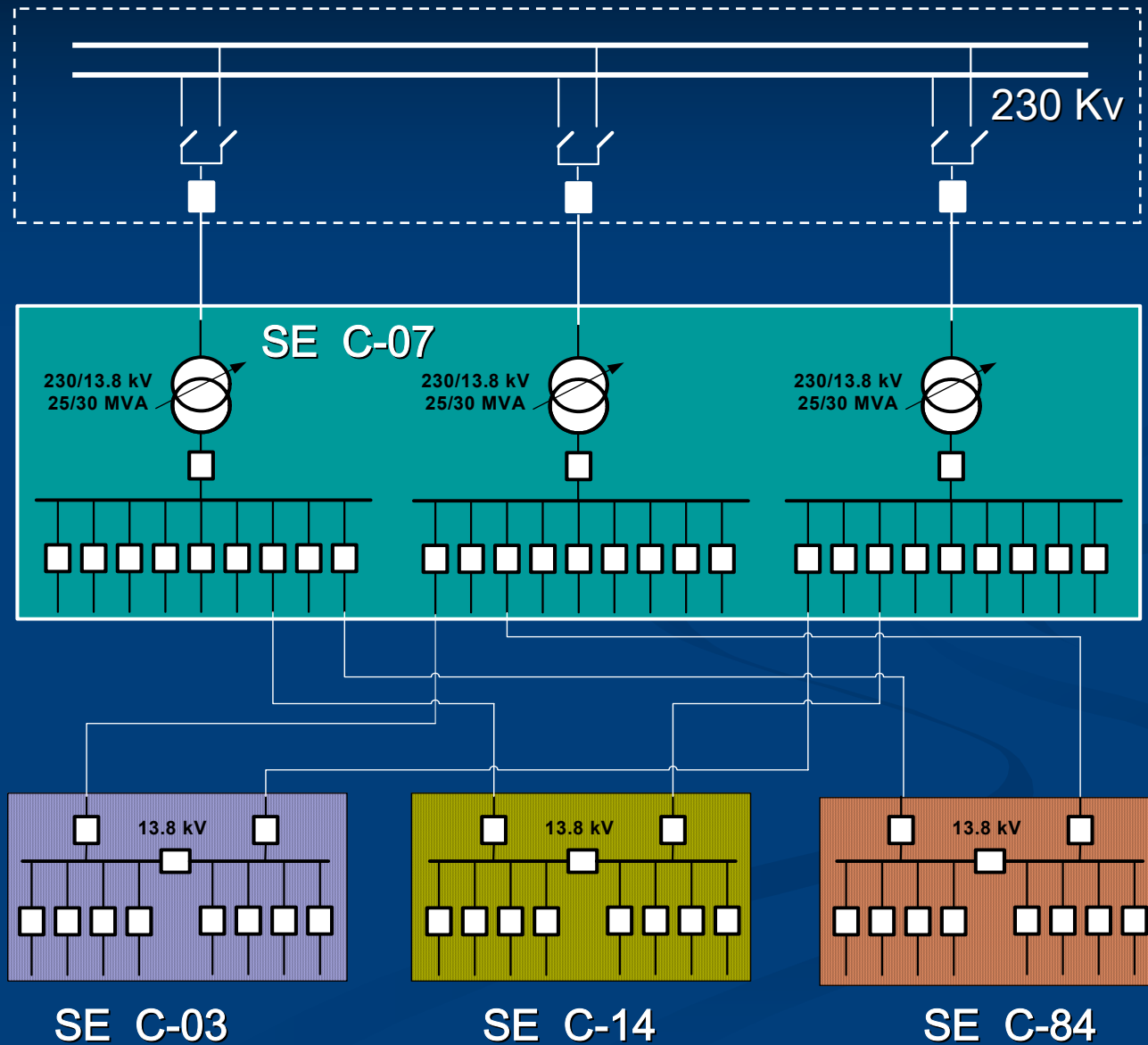
Entrada: 230 kV (atual 88 kV)

SEs: - 03 Centros de Distribuição de Carga (13.8 kV)
dezenas de SE unitárias de área (4.16/0.48 kV)

Novo Sistema Elétrico de Distribuição da Refinaria

E Principal →

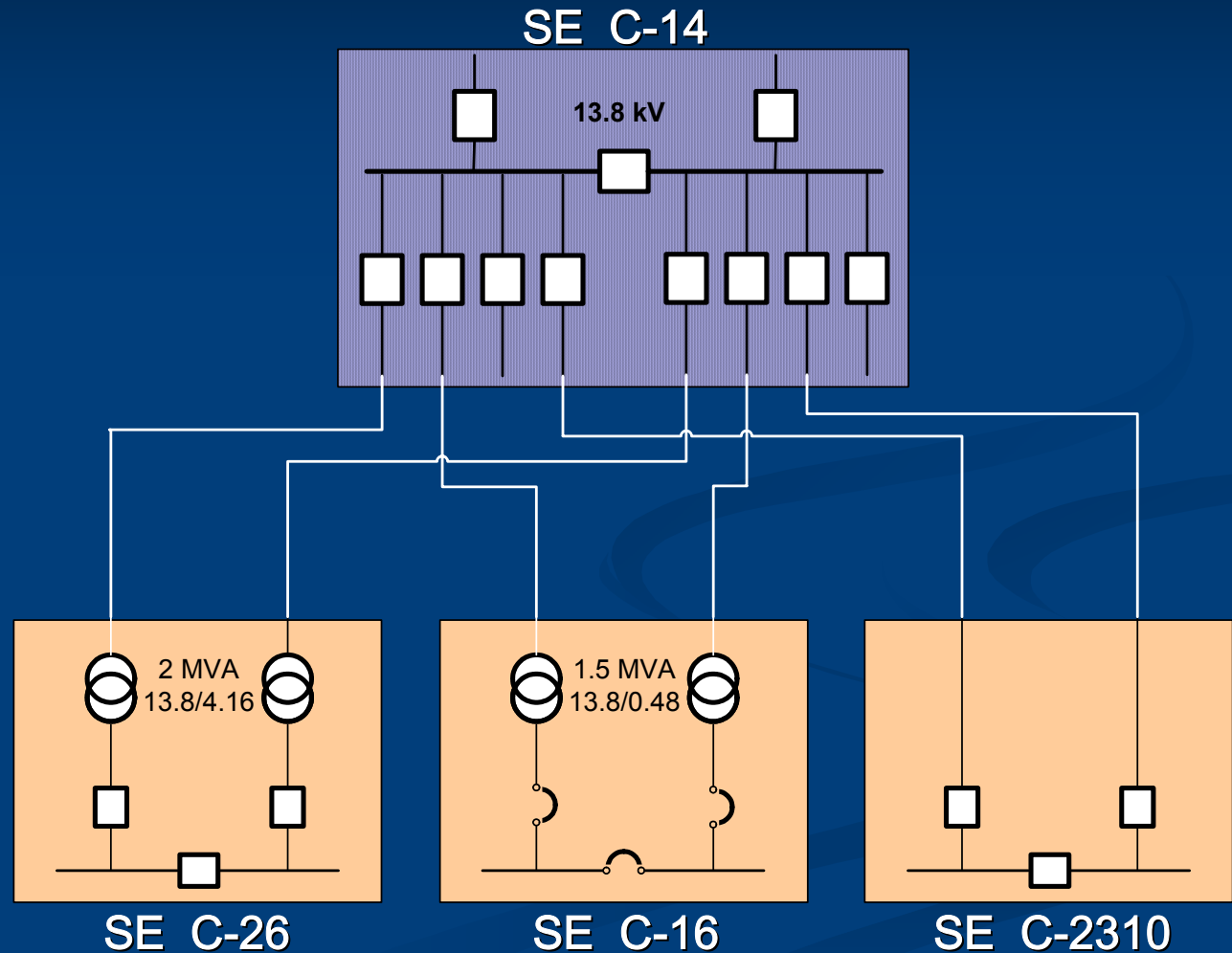
Centros de
Distribuição
de Carga →



Novo Sistema Elétrico de Distribuição da Refinaria

Centro de
Distribuição
de Carga →

SE unitárias
do processo →



Sistema de Automação Atual da Rede Elétrica

- Instalado na década de 90
- Monitoramento de 9.500 pontos
- Arquitetura distribuída baseada em UTRs e protocolo proprietário
- Funções de automação e controle, tais como intertravamento, monitoração e comando de disjuntores/seccionadoras.

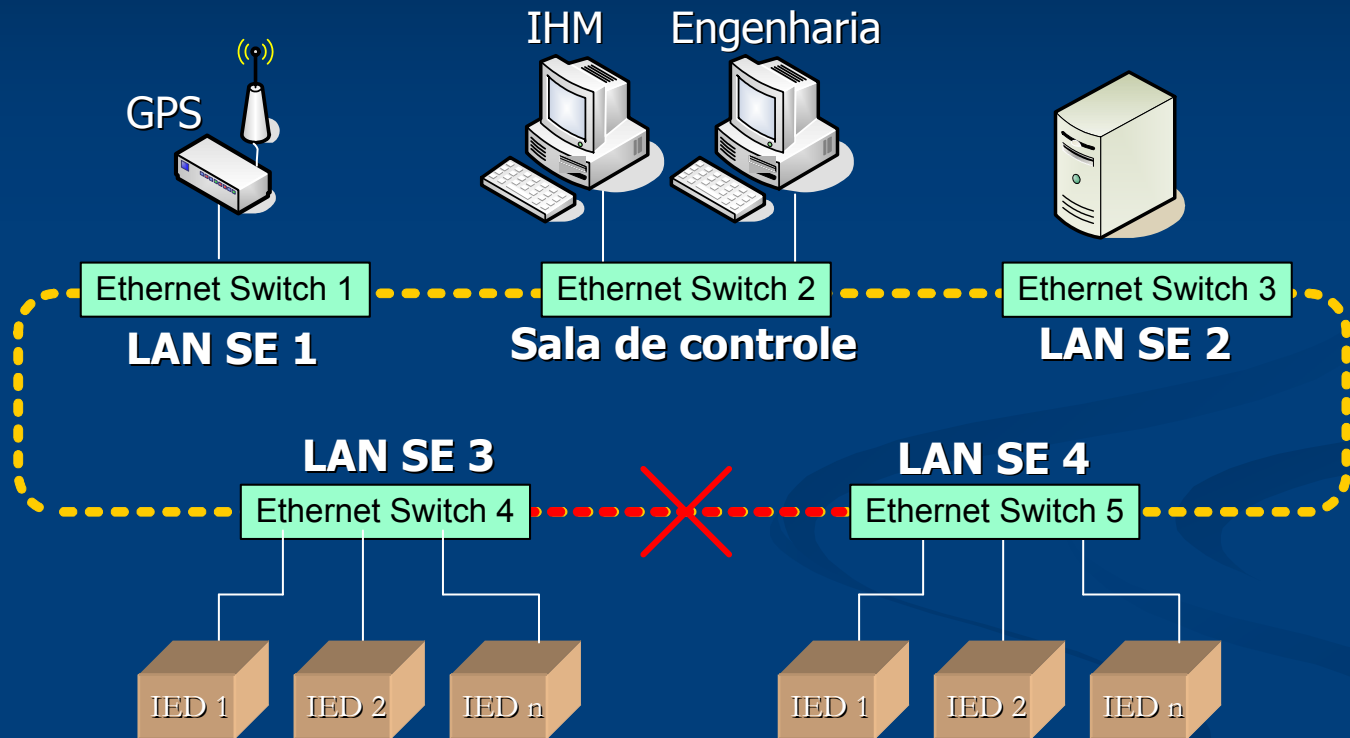
Novo Sistema de Automação da Rede Elétrica

- Baseado em IEDs (*Intelligent Electronic Device*), utilizando protocolo de comunicação aberto IEC 61850, interligados através de *switches* ópticos.
- Além das funções de proteção, os IEDs são responsáveis pela aquisição de dados digitais e analógicos, lógicas de comando e de intertravamentos, oscilografia, registro de eventos.

Novo Sistema de Automação da Rede Elétrica

- Rede de comunicação de dados interligando os switches, com cabos de fibra óptica, bidirecional, em anel. Utilizada para funções de engenharia, supervisão/controle e proteção/intertravamentos entre IEDs.
- Rede dedicada para sincronismo de tempo através de GPS/IRIG-B.
- Rede, no protocolo MODBUS RTU, interligando os IEDs de proteção de motores.

Novo Sistema de Automação da Rede Elétrica



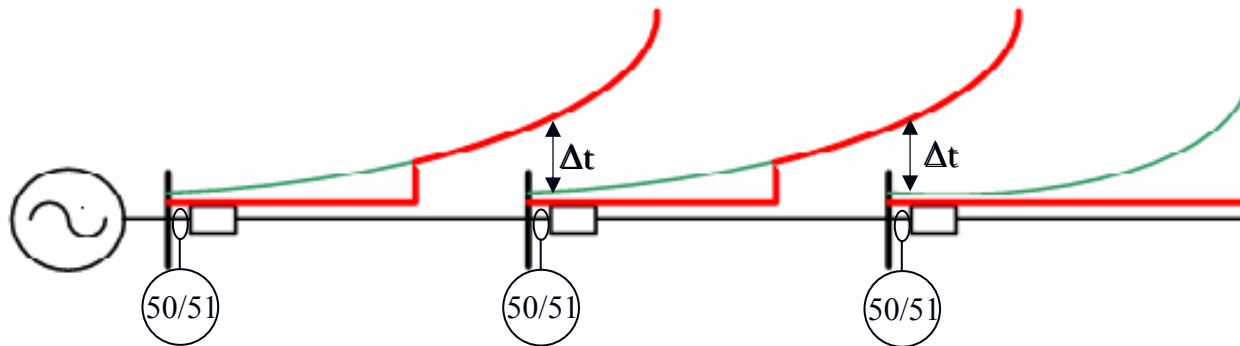
Funções de Proteção, Intertravamentos e Automatismos implementados via IEC 61850

Funções de Proteção e Controle:

- 1)- Seletividade Lógica (68)
- 2)- Transferência Automática de alimentadores (27)
- 3)- Paralelismo momentâneo de alimentadores (43)
- 4)- Transfer trip (94)
- 5)- Falha de disjuntor (50BF)
- 6)- Descarte seletivo de cargas

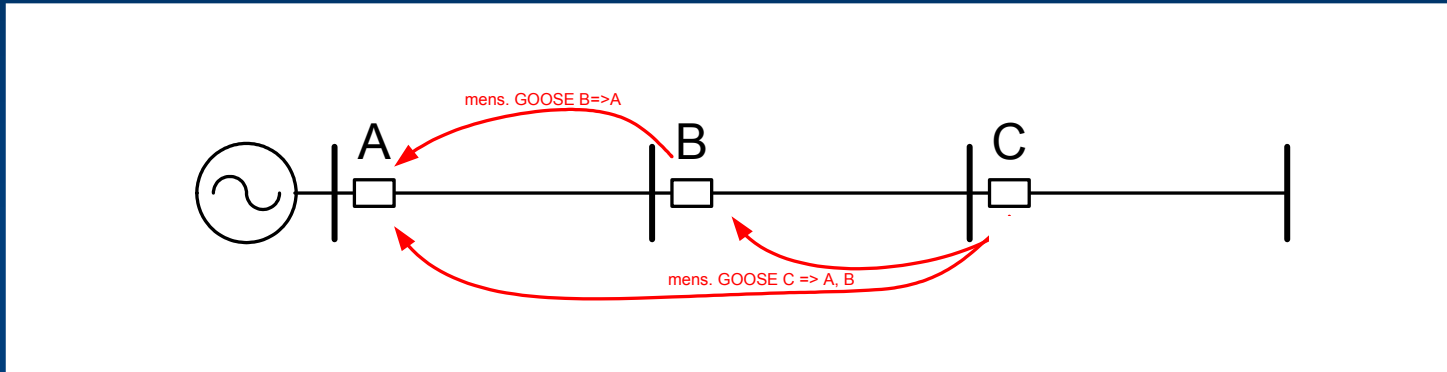
Seletividade Lógica (68):

- funções 50/51: Seletividade tradicional



Seletividade Lógica:

- funções 50/51: Seletividade via mensagens GOOSE



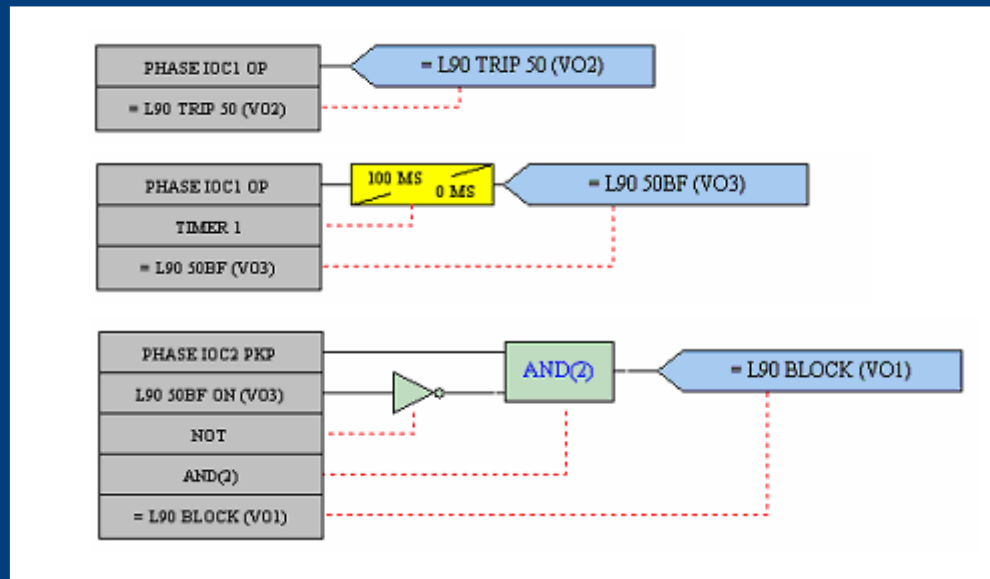
- funções 50 ajustadas para sobrealcançar a linha a jusante

- IED C
$$\begin{cases} 50_1 (\Delta T=0) \Rightarrow \text{bloqueio para B e A} \\ 50_2 (\Delta T=50 \text{ ms}) \Rightarrow \text{trip} \end{cases}$$

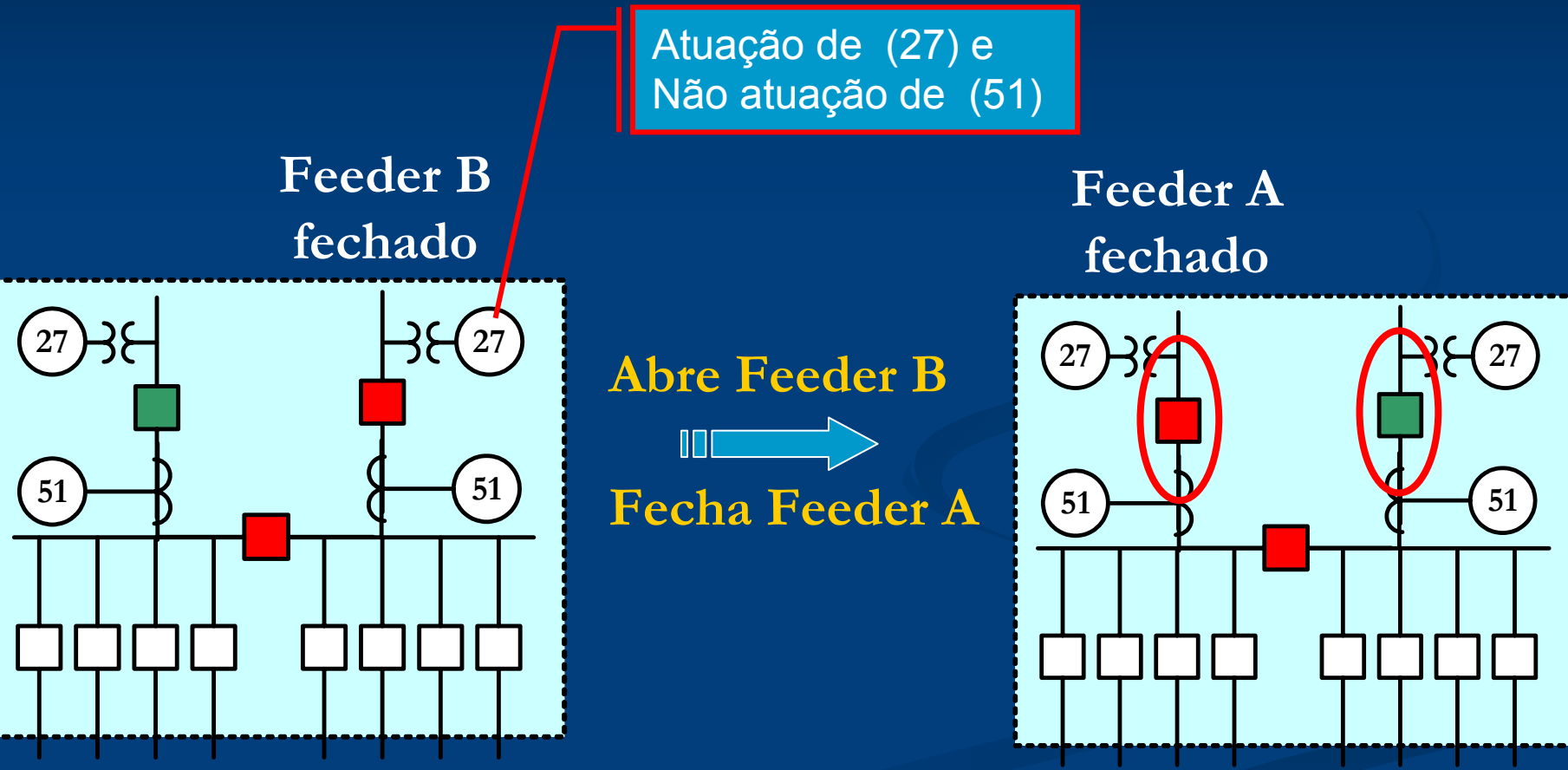
- IED B
$$\begin{cases} 50_1 (\Delta T=0) \Rightarrow \text{bloqueio para A} \\ 50_2 (\Delta T=50\text{ms}) \Rightarrow \text{trip} \end{cases}$$

Falha de Disjuntor (50BF):

- O sinal de bloqueio da seletividade lógica foi parametrizado para durar 100 ms. Após esse tempo se a função 50 ainda estiver atuada, o relé envia um sinal de desbloqueio para os IEDs a montante.

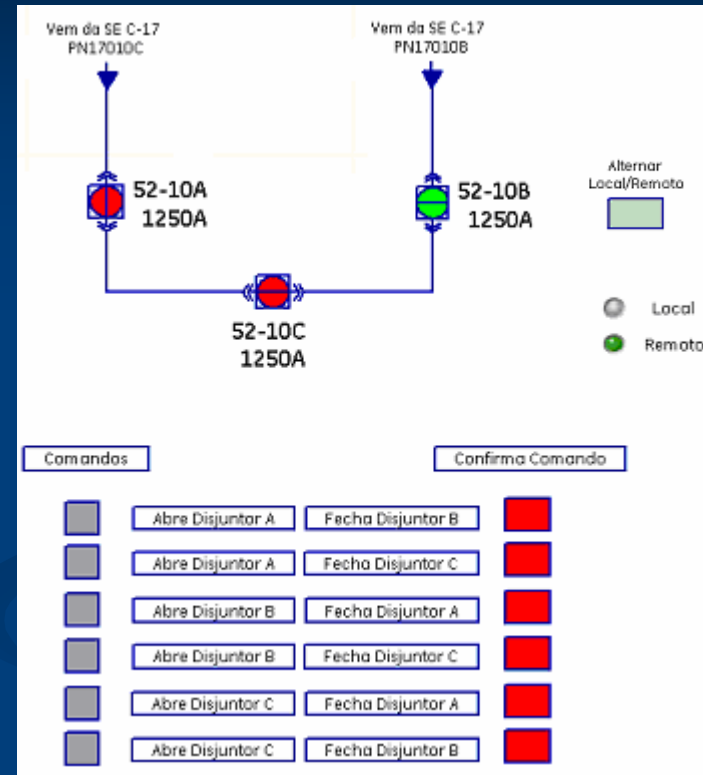


Transferência Automática de Alimentadores (27):



Paralelismo Momentâneo de Alimentadores (43):

- Lógica implementada no IED de interligação de barras
 - inclui modo de operação Local/Remoto
 - usuário seleciona disjuntores a serem abertos e fechados.
 - lógica verifica a validade do comando e altera disjuntores após confirmação, sem interrupção de potência
 - Todos os sinais comando/status necessários devem ser efetuados/aquisitados via rede de IEDs (GOOSE)



Descarte Seletivo de Cargas:

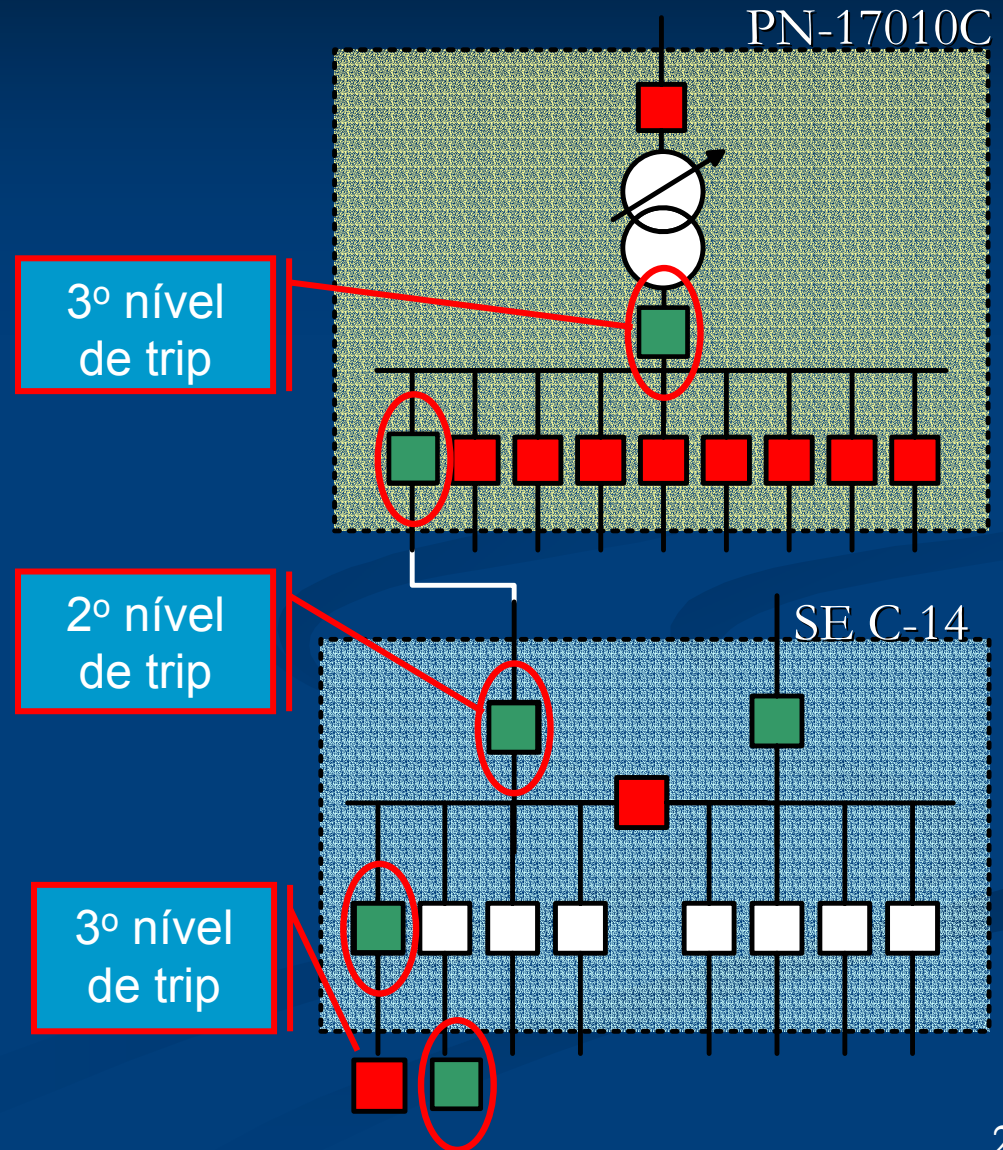
Condição Normal:

Geração: 250 MW
Carga: 50 MW

1º nível de trip
Geração: 30 MW

2º nível de trip
Geração: 20 MW

3º nível de trip
Geração: 10 MW



Transferência de Trip (94):

- Esta lógica faz com que, quando do trip de um disjuntor, o respectivo disjuntor a jusante seja também automaticamente aberto.

Bloqueio de Fechamento (86):

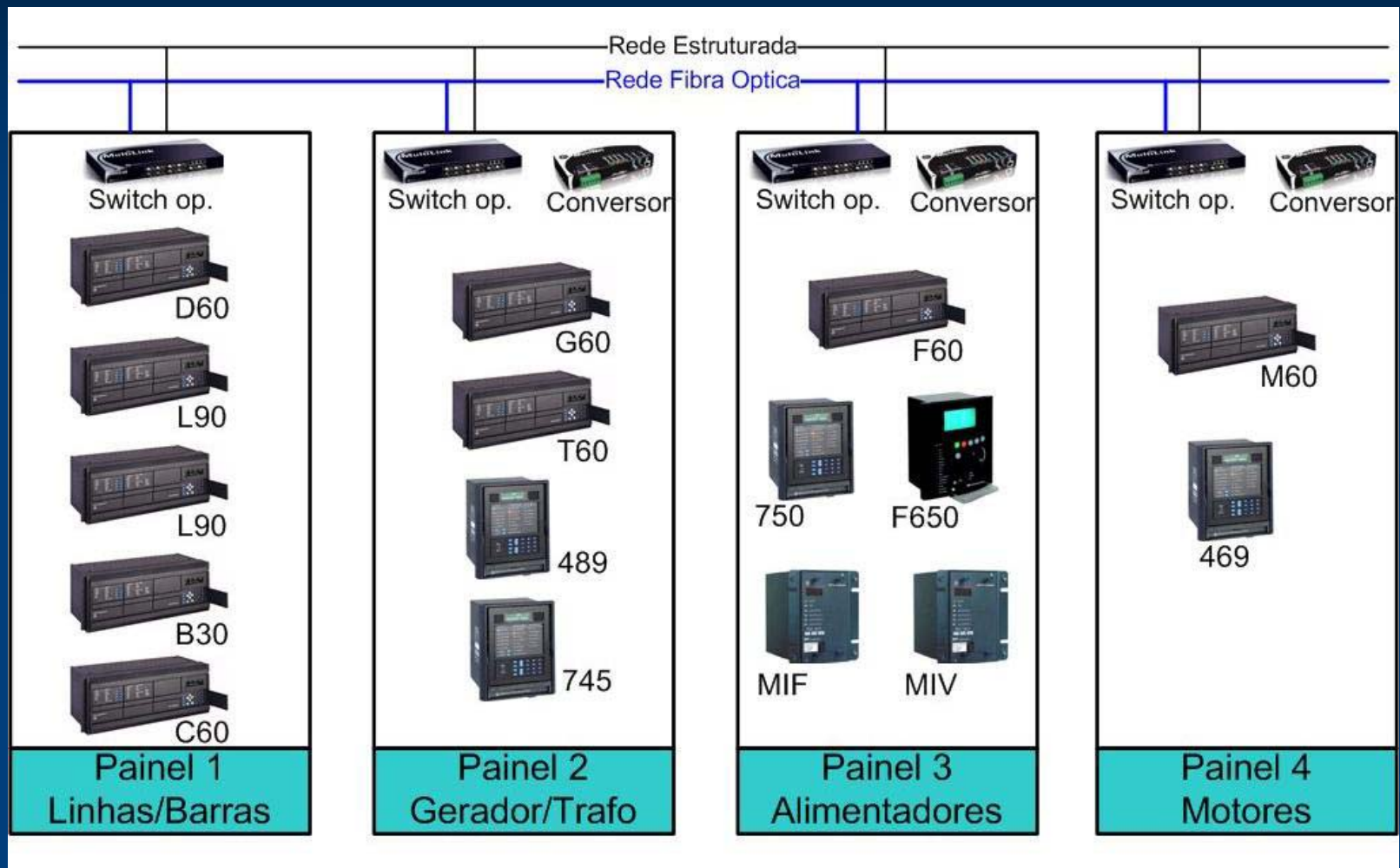
- Bloqueia o fechamento do disjuntor caso a abertura tenha sido provocada por função de proteção.
- Lógica implementada com elementos *non-volatile latches* (armazenados em memória EEPROM).

Ensaio do Sistema Digital de Proteção e
Automação Realizados no Laboratório de
Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos
Lprot/USP

Infra-estrutura do laboratório:



Infra-estrutura do laboratório (IEDs):



Infra-estrutura do laboratório:

■ hardware:

- 16 IEDs com protocolo 61850 e/ou ModBus (Ethernet 10 Mbps)
- 4 swiches ópticos
- 3 conversores ModBus/RTU para ModBus/TCP
- 2 caixas de testes OMICRON CMC 256-6
- 1 GPS receiver REASON – RT 2000

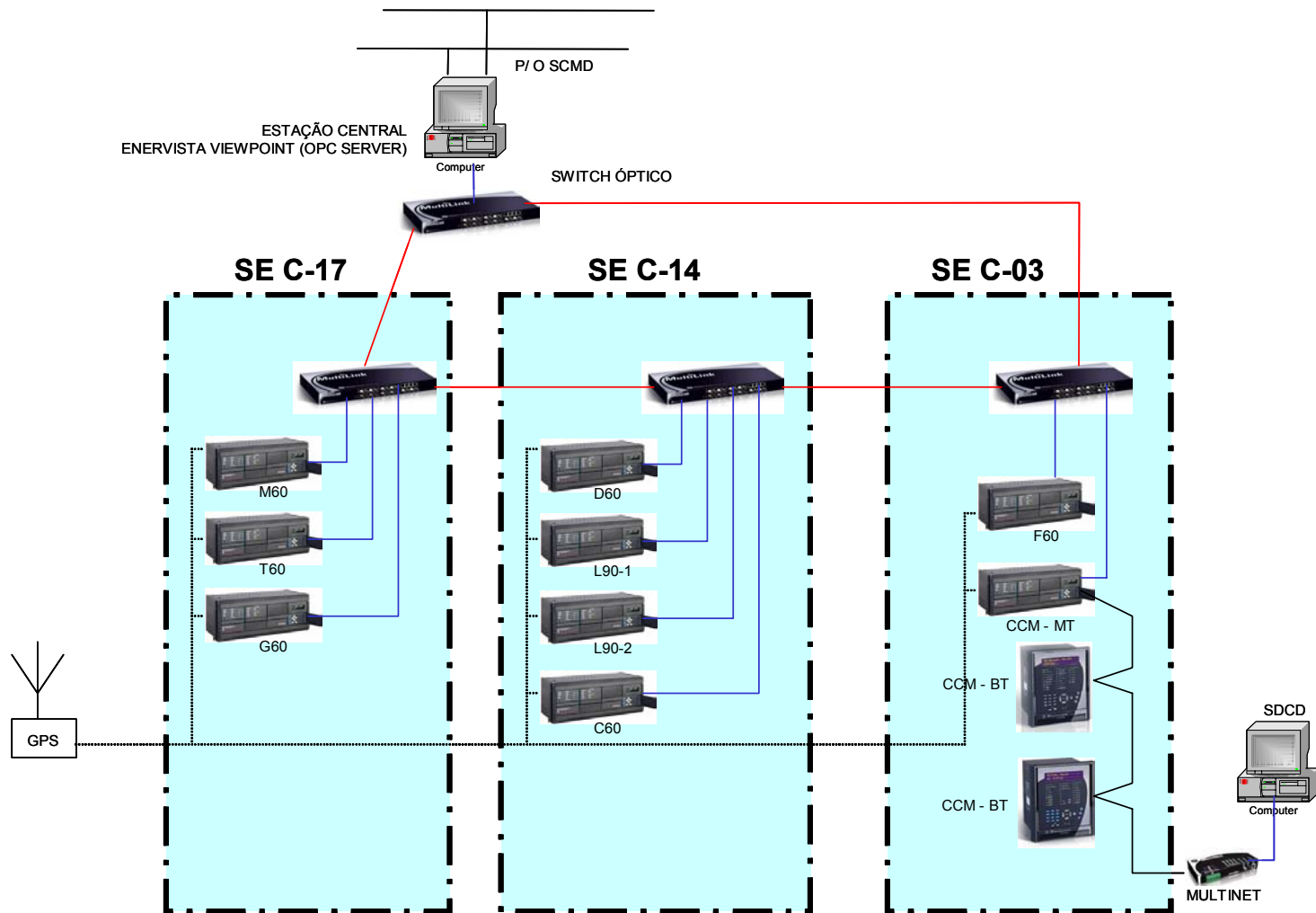
■ software:

- Enervista ViewPoint - GE
- IP Load – BTT Software

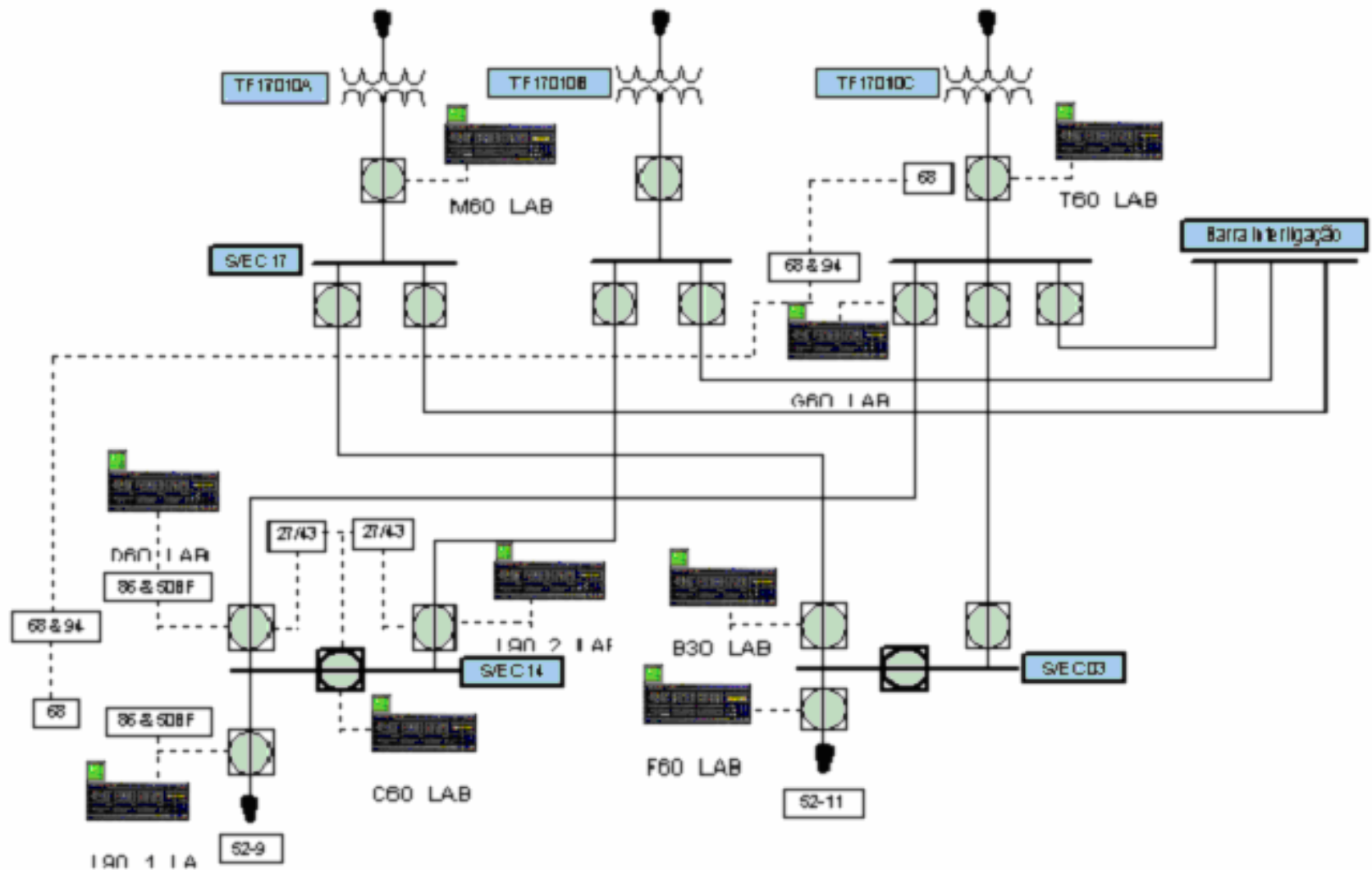
■ redes implementadas:

- Proteção e automação - 61850
- Controle de Processos – ModBus/RTU
- Sincronismo de tempo (estruturada e SNTP)
- Engenharia e configuração IEDs (proprietária)

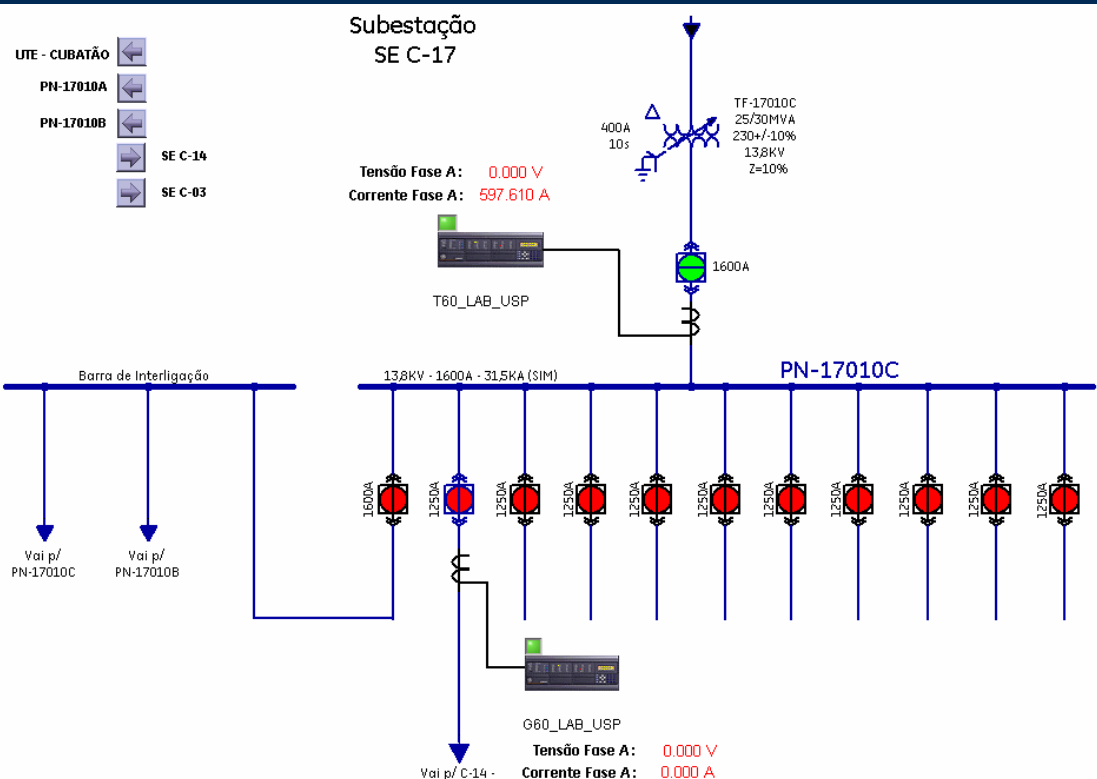
Simulação da Arquitetura do Sistema de Proteção e Automação:



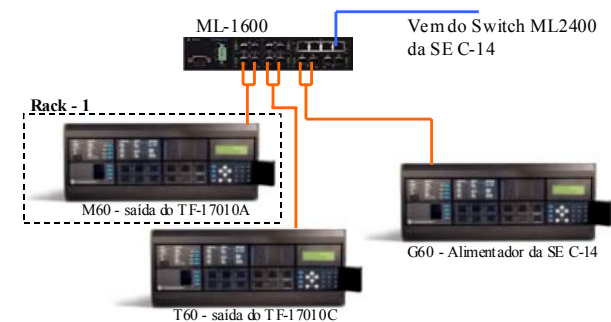
Tela do Diagrama Unifilar de Interligação entre Painéis:



SE C-17 - Painel PN-17101B:



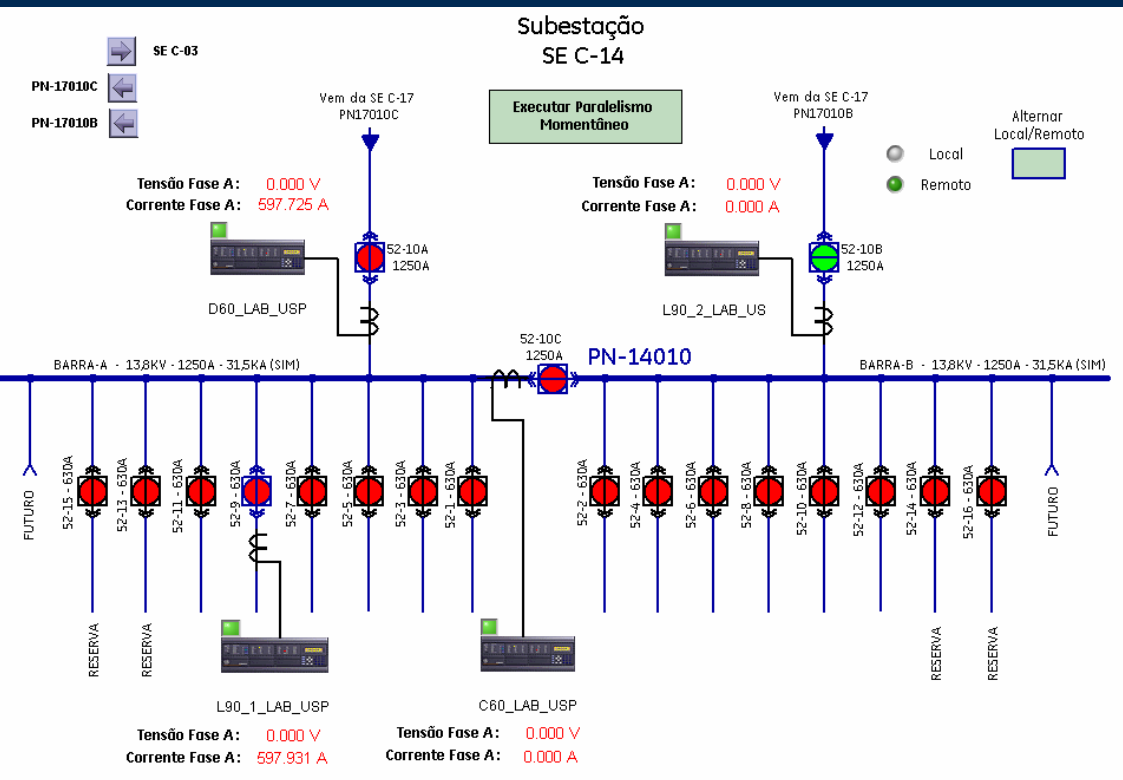
SE C-17 – Rack 2



**UpLink em cabo metálico
RJ-45. 10Mb – Full-Duplex**

Fibra-Óptica Multimodo ST – 820nm. 10Mb – Full-Duplex

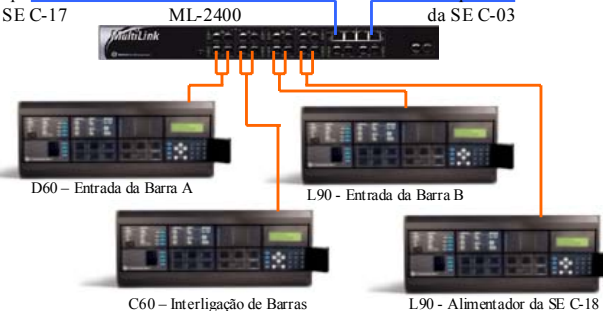
Diagrama Unifilar da SE C-14:



SE C-14 – Rack 3

Vai para Switch ML1600 da SE C-17

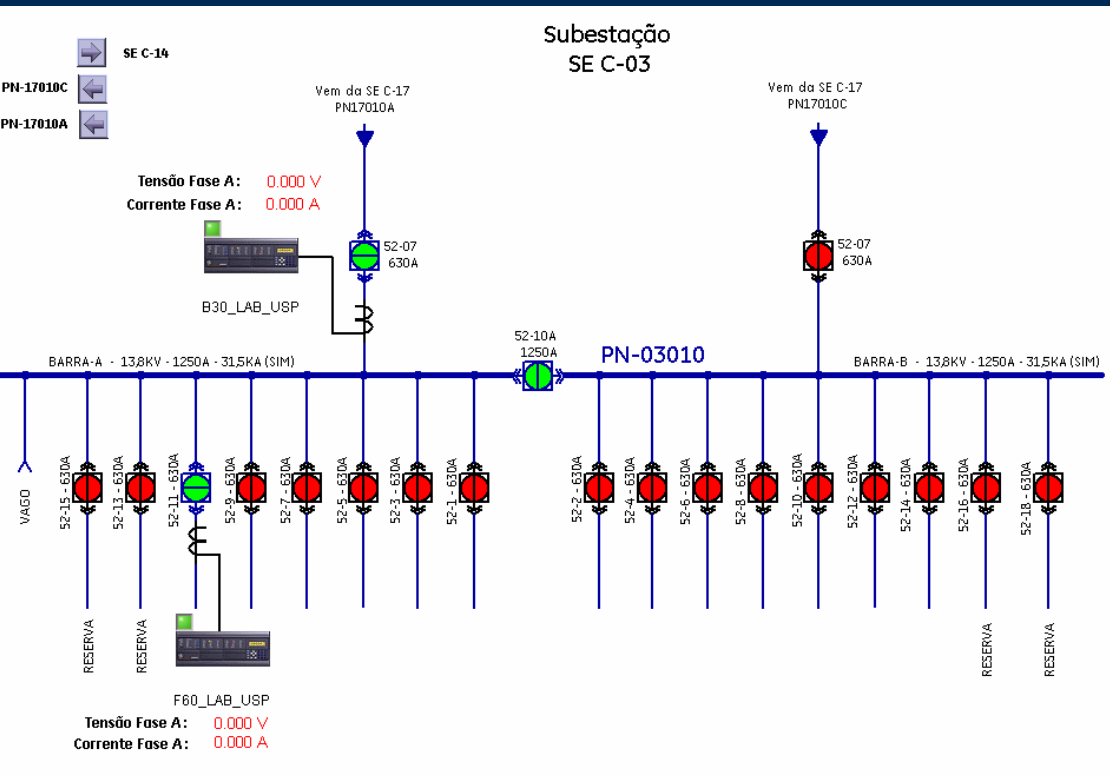
Vai para Switch ML2400 da SE C-03



UpLink em cabo metálico
RJ-45. 10Mb – Full-Duplex

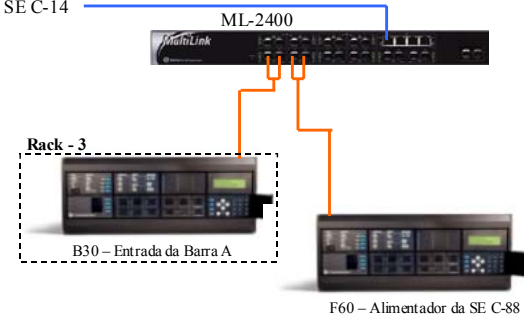
Fibra-Óptica Multimodo ST –
820nm. 10Mb – Full-Duplex

Diagrama Unifilar da SE C-03:



SE C-03 – Rack 4

Vem do Switch ML2400
da SE C-14



UpLink em cabo metálico
RJ-45. 10Mb – Full-Duplex

Fibra-Óptica Multimodo ST –
820nm. 10Mb – Full-Duplex

Resultados dos Ensaaios

Função 68 – Sem carregamento da Rede de comunicação

IED
usante



IED
montante



The screenshot shows the 'EnerVista UR Setup - Event Record' window. It contains two sub-windows, each displaying an event log for a specific relay.

Top Window: L90-1 Relé 6: Actual Values: Records

File Name: C:\PROGRA~1\GEMULT~1\Data\Device Files\L90-1 Relé 6\EVT_254_20051122_185045.EVT
Date / Time of Last Clear: Tuesday, November 22, 2005 18:50:45
Events Since Last Clear: 39 Shown Number of Events: 28
0 days 0 h : 0 m : 0.006241 s

Event Number	Date/Time	Cause	Data
7	Nov 22 2005 18:51:34.469837	L90 BLOCK On	
6	Nov 22 2005 18:51:34.469837	PHASE IOC2 OP A	
5	Nov 22 2005 18:51:34.469837	PHASE IOC2 PKP A	
4	Nov 22 2005 18:51:34.469837	PHASE IOC1 OP A	
3	Nov 22 2005 18:51:34.469837	PHASE IOC1 PKP A	

Bottom Window: D60 Relé 5: Actual Values: Records

File Name: C:\PROGRA~1\GEMULT~1\Data\Device Files\D60 Relé 5\EVT_254_20051122_185045.EVT
Date / Time of Last Clear: Tuesday, November 22, 2005 18:50:45
Events Since Last Clear: 17 Shown Number of Events: 16
0 days 0 h : 0 m : 0.020835 s

Event Number	Date/Time	Cause	Data
8	Nov 22 2005 18:51:34.472913	L90 BLOCK On	
7	Nov 22 2005 18:51:34.470828	Rem O/P UserSt 1 On	
6	Nov 22 2005 18:51:34.470828	D60 BLOCK On	
5	Nov 22 2005 18:51:34.470828	PHASE IOC2 OP A	
4	Nov 22 2005 18:51:34.470828	PHASE IOC2 PKP A	

tempo da mens GOOSE = 18:51:34.472913 - 18:51:34.469837 = 3.076 ms

Função 68 – Sem carregamento da Rede de comunicação

OMICRON QuickCMC - [Visualização do teste: Teste Petrobras V0.qcm]

Arquivo Editar Vista Teste Parametros Janela Ajuda

Saídas analógicas

Modo de ajust	Direto		
V A-II	0,000 V	0,00 *	60,000 Hz
V B-II	0,000 V	-120,00 *	60,000 Hz
V C-II	0,000 V	120,00 *	60,000 Hz
I A	5,000 A	0,00 *	60,000 Hz
I B	0,000 A	-120,00 *	60,000 Hz
I C	0,000 A	120,00 *	60,000 Hz

Saídas binárias

Saída bin. 1 ☐

Saída bin. 2 ☐

Saída bin. 3 ☐

Saída bin. 4 ☐

5 ☐

6 ☐

7 ☐

8 ☐

F9

F10

Entradas analógicas

Vdc: 0,000 V Idc: 0,0000 mA

Entradas Binárias / Trigger

	☒	☒	
L90 - TRIP	☒	☒	26,20 ms
D60 - TRIP	☐	☐	n/d
G60 - TRIP	☒	☐	n/d
T60 - TRIP	☒	☐	n/d
Não usado	☐	☐	
Não usado	☐	☐	
Não usado	☐	☐	
Não usado	☐	☐	
Não usado	☐	☐	

F5

☒ Desligar no trigger Atraso: 0,000 s

Passo / Rampa

Saída: V A-N Taman.: 0,000 V ☐ Passo auto

Grandeza: Magnitude Tempo: 1,000 s

☐ Pulse Ramp Reinicial: 500,0 ms

CMC256-6 (GB5580) conectado ao PC

CMC256-6 (GB5580) conectado ao PC

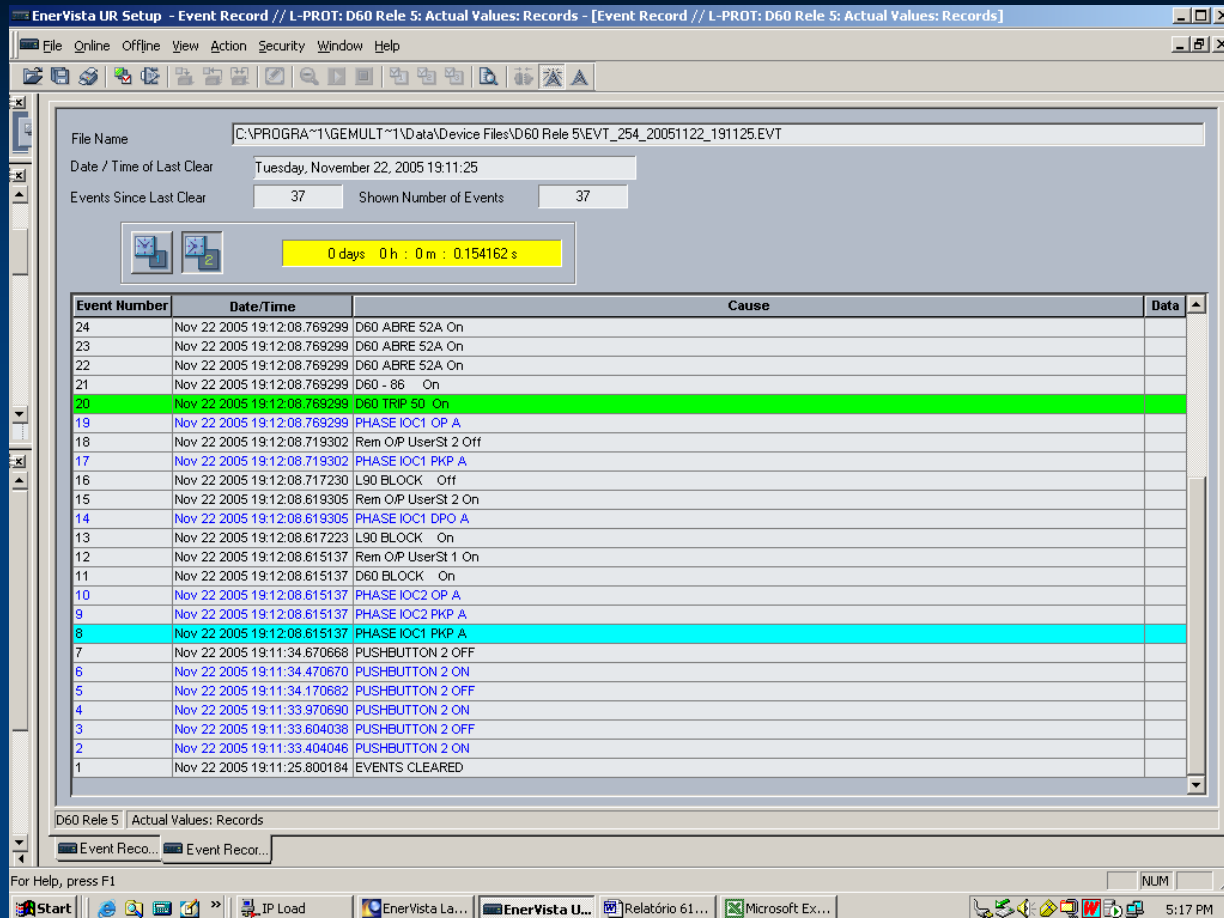
(REG01:00000010) Erro interno da CMC: Tempo de espera principal devido ao software de autoteste.

(REG01:00000010) Erro interno da CMC: Tempo de espera principal devido ao software de autoteste.

15:14

tempo de Trip = 26,2 ms (tempo de operação do contato do IED= 8 ms)

Função 50BF – Sem carregamento da Rede de comunicação

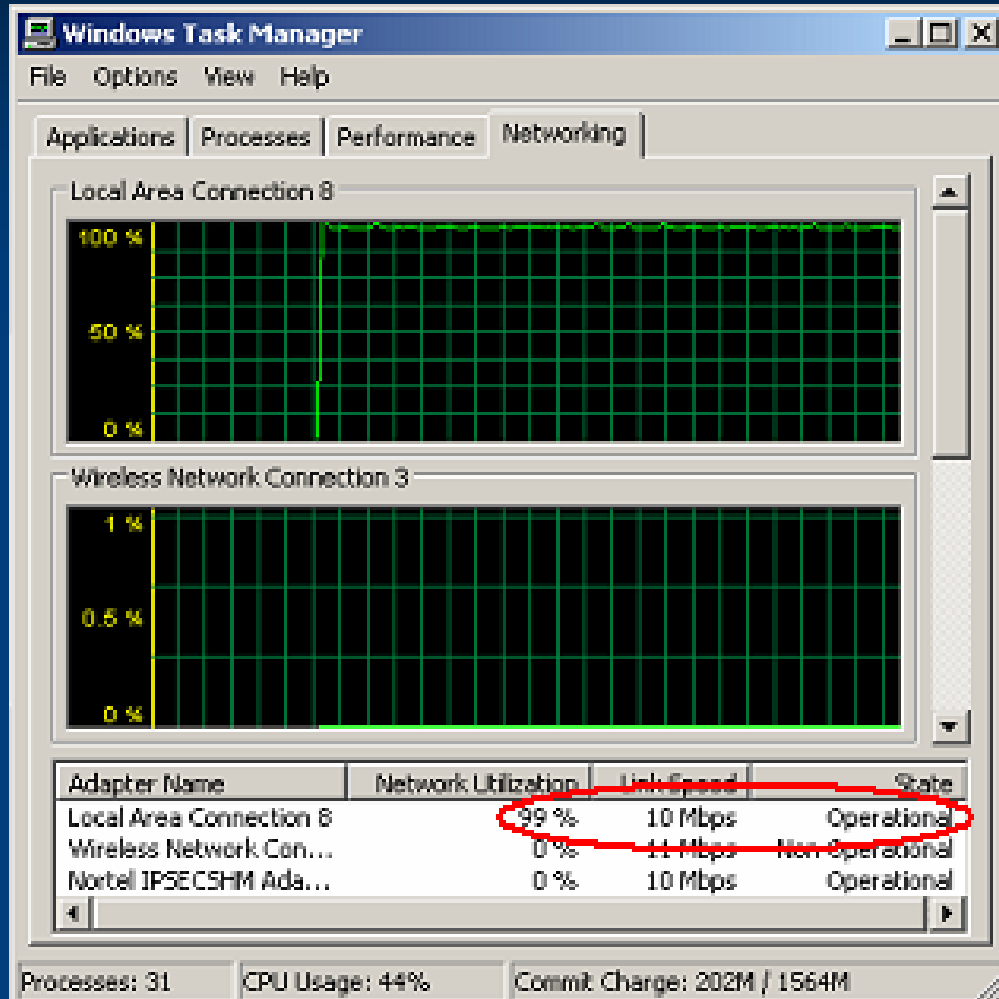
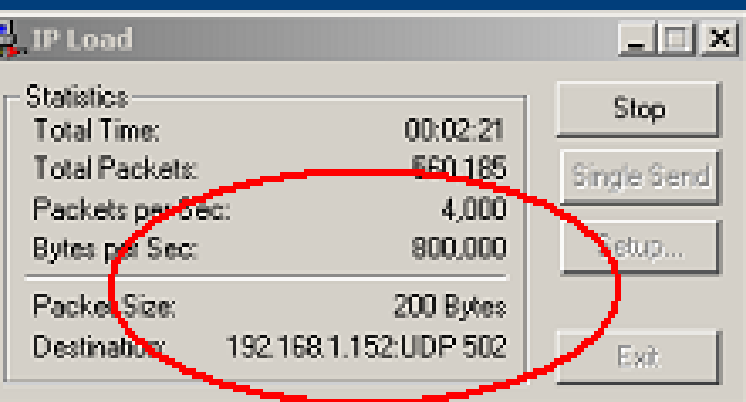
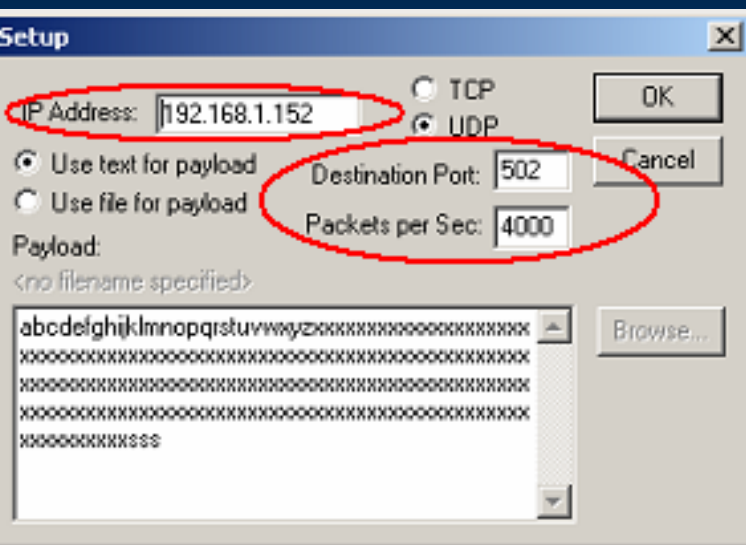


Event Number	Date/Time	Cause	Data
24	Nov 22 2005 19:12:08.769299	D60 ABRE 52A On	
23	Nov 22 2005 19:12:08.769299	D60 ABRE 52A On	
22	Nov 22 2005 19:12:08.769299	D60 ABRE 52A On	
21	Nov 22 2005 19:12:08.769299	D60 - 86 On	
20	Nov 22 2005 19:12:08.769299	D60 TRIP 50 On	
19	Nov 22 2005 19:12:08.769299	PHASE IOC1 OP A	
18	Nov 22 2005 19:12:08.719302	Rem O/P UserSt 2 Off	
17	Nov 22 2005 19:12:08.719302	PHASE IOC1 PKP A	
16	Nov 22 2005 19:12:08.717230	L90 BLOCK Off	
15	Nov 22 2005 19:12:08.619305	Rem O/P UserSt 2 On	
14	Nov 22 2005 19:12:08.619305	PHASE IOC1 DPO A	
13	Nov 22 2005 19:12:08.617223	L90 BLOCK On	
12	Nov 22 2005 19:12:08.615137	Rem O/P UserSt 1 On	
11	Nov 22 2005 19:12:08.615137	D60 BLOCK On	
10	Nov 22 2005 19:12:08.615137	PHASE IOC2 OP A	
9	Nov 22 2005 19:12:08.615137	PHASE IOC2 PKP A	
8	Nov 22 2005 19:12:08.615137	PHASE IOC1 PKP A	
7	Nov 22 2005 19:11:34.670668	PUSHBUTTON 2 OFF	
6	Nov 22 2005 19:11:34.470670	PUSHBUTTON 2 ON	
5	Nov 22 2005 19:11:34.170682	PUSHBUTTON 2 OFF	
4	Nov 22 2005 19:11:33.970690	PUSHBUTTON 2 ON	
3	Nov 22 2005 19:11:33.604038	PUSHBUTTON 2 OFF	
2	Nov 22 2005 19:11:33.404046	PUSHBUTTON 2 ON	
1	Nov 22 2005 19:11:25.800184	EVENTS CLEARED	

tempo da mens. GOOSE de bloqueio = 2.1 ms

tempo de trip no disjuntor de back-up = 154.2 ms

Carregamento da Rede de comunicação – IP Load



Função 68 – Com congestionamento da Rede

IED
usante



IED
montante



Event Record // L-PROT: L90-1 Relé 6: Actual Values: Records

File Name: C:\PROGRA~1\GEMULT~1\Data\Device Files\L90-1 Relé 6\EVT_254_20051208_170530.EVT

Date / Time of Last Clear: Thursday, December 08, 2005 17:05:30

Events Since Last Clear: 41 Shown Number of Events: 26

0 days 0 h : 0 m : 0.004166 s

Event Number	Date/Time	Cause	Data
8	Dec 08 2005 17:07:45.208629	L90 TRIP TOT On	
7	Dec 08 2005 17:07:45.208629	L90 TRIP 50 On	
6	Dec 08 2005 17:07:45.208629	L90 BLOCK On	
5	Dec 08 2005 17:07:45.208629	PHASE IOC2 OP A	
4	Dec 08 2005 17:07:45.208629	PHASE IOC2 PKP A	

L90-1 Relé 6 Actual Values: Records

Event Record // L-PROT: D60 Relé 5: Actual Values: Records

File Name: C:\PROGRA~1\GEMULT~1\Data\Device Files\D60 Relé 5\EVT_254_20051208_170530.EVT

Date / Time of Last Clear: Thursday, December 08, 2005 17:05:30

Events Since Last Clear: 15 Shown Number of Events: 14

0 days 0 h : 0 m : 0.022917 s

Event Number	Date/Time	Cause	Data
8	Dec 08 2005 17:07:45.214747	PHASE IOC1 DPO A	
7	Dec 08 2005 17:07:45.212661	L90 BLOCK On	
6	Dec 08 2005 17:07:45.210578	Rem O/P UserSt 1 On	
5	Dec 08 2005 17:07:45.210578	D60 BLOCK On	
4	Dec 08 2005 17:07:45.210578	PHASE IOC2 OP A	

tempo da mens. GOOSE = 17:07:45.212661 – 17:07:45.208629 = 4 ms

Função 50BF – Com congestionamento da Rede

File Name: C:\PROGRA~1\GEMULT~1\Data\Device Files\D60 Rele 5\EVT_254_20051208_174908.EVT

Date / Time of Last Clear: Thursday, December 08, 2005 17:49:08

Events Since Last Clear: 98 Shown Number of Events: 98

0 days 0 h : 0 m : 0.156246 s

Event Number	Date/Time	Cause	Data
84	Dec 08 2005 18:01:19.482948	LATCH 1 ON	
83	Dec 08 2005 18:01:19.480864	Rem O/P UserSt 5 On	
82	Dec 08 2005 18:01:19.480864	D60 ABRE 52A On	
81	Dec 08 2005 18:01:19.480864	D60 ABRE 52A On	
80	Dec 08 2005 18:01:19.480864	D60 ABRE 52A On	
79	Dec 08 2005 18:01:19.480864	D60 - 86 On	
78	Dec 08 2005 18:01:19.480864	D60 TRIP 50 On	
77	Dec 08 2005 18:01:19.480864	PHASE IOC1 OP A	
76	Dec 08 2005 18:01:19.430866	Rem O/P UserSt 2 Off	
75	Dec 08 2005 18:01:19.430866	PHASE IOC1 PKP A	
74	Dec 08 2005 18:01:19.428784	L90 BLOCK Off	
73	Dec 08 2005 18:01:19.328787	Rem O/P UserSt 2 On	
72	Dec 08 2005 18:01:19.328787	PHASE IOC1 DPO A	
71	Dec 08 2005 18:01:19.326704	L90 BLOCK On	
70	Dec 08 2005 18:01:19.324618	Rem O/P UserSt 1 On	
69	Dec 08 2005 18:01:19.324618	D60 BLOCK On	
68	Dec 08 2005 18:01:19.324618	PHASE IOC2 OP A	
67	Dec 08 2005 18:01:19.324618	PHASE IOC2 PKP A	
66	Dec 08 2005 18:01:19.324618	PHASE IOC1 PKP A	
65	Dec 08 2005 18:00:54.011046	D60 FECH 52A Off	
64	Dec 08 2005 18:00:54.011046	D60 FECH 52A Off	
63	Dec 08 2005 18:00:54.011046	D60 FECH INT Off	
62	Dec 08 2005 18:00:53.981881	Rem O/P UserSt 3 On	
61	Dec 08 2005 18:00:53.979734	DISJ 52-10A On	
60	Dec 08 2005 18:00:53.958967	FECHA 52-A Off	

D60 Rele 5 Actual Values: Records

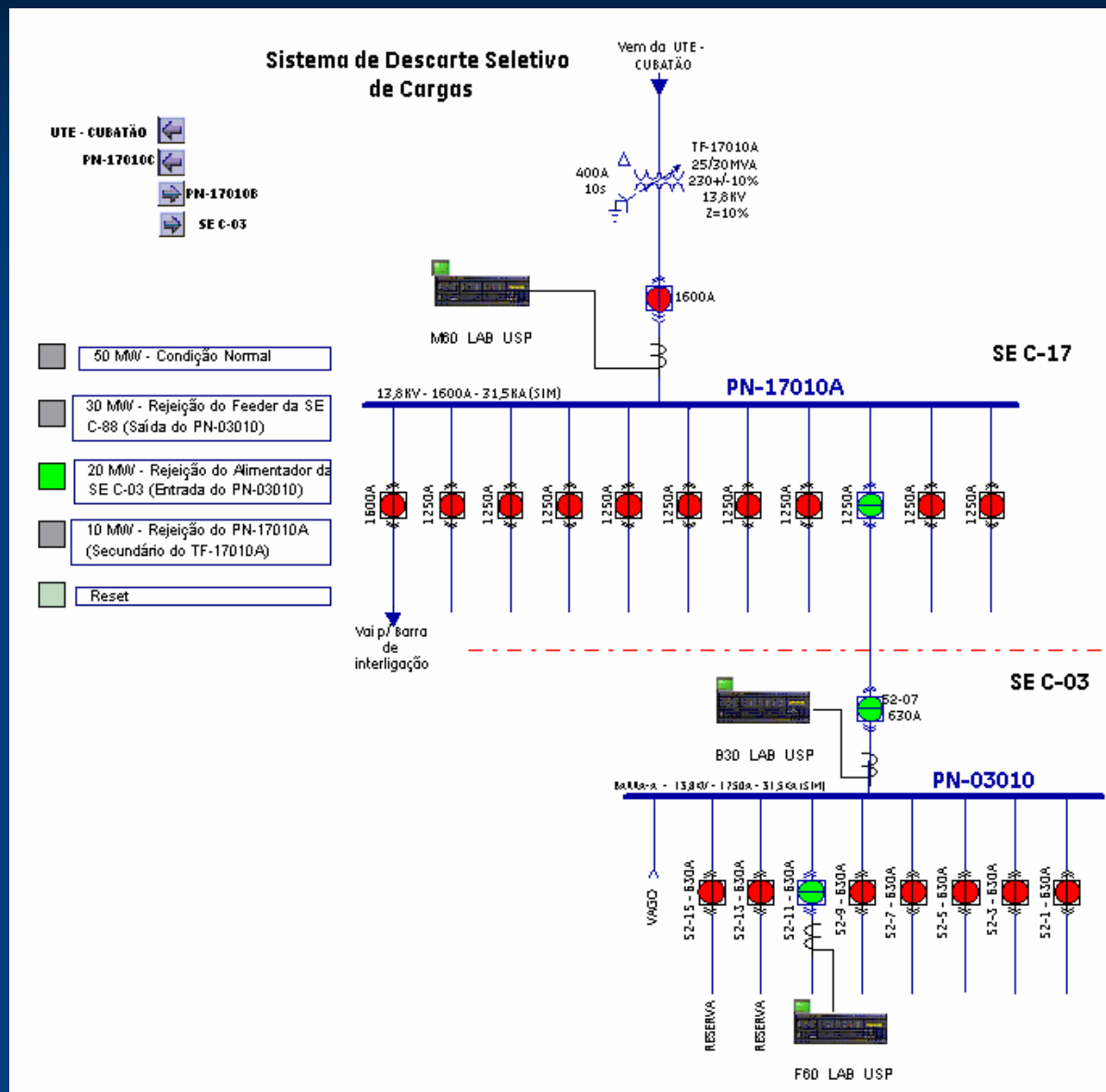
tempo da mens. GOOSE de bloqueio = 2.1 ms

tempo de trip no disjuntor de back-up = 156.2 ms

Comparação da Performance com e sem congestionamento da rede

	Seletividade de lógica	Paralelismo Momentâneo	Falha de disjuntor
Sem IP Load (Tráfego normal)	3.1 ms	0.9 ms	154.2 ms
Com IP Load (congestionado)	4.0 ms	1.2 ms	156.2 ms
Delay adicional	0.9 ms	0.3 ms	0.3 ms

Atuação da Lógica de Descarte de Cargas



Comentários Finais e Conclusões

- A simulação demonstrou a viabilidade de implementação de todas as lógicas de proteção, intertravamento e controle para um sistema de automação, diretamente nos relés digitais, sem a utilização de UTRs e protocolos proprietários.
- O trabalho propiciou a verificação e medição, em uma plataforma de hardware de última geração, dos tempos de atuação e desempenho das mensagens prioritárias GOOSE.
- Foram observados tempos de transmissão das mensagens GOOSE da ordem de 3 ms.
- Em situações de tráfego de dados extremas, observou-se uma degradação dos tempos de transmissão da ordem de 1 ms, o que atesta o mecanismo de priorização das mensagens GOOSE.

- Os resultados mostram que, com o uso da IEC 61850, podem ser otimizados os tempos de atuação e de seletividade dos relés, mesmo quando localizados fisicamente em subestações diferentes .
- A redução nos tempos de atuação da proteção podem impactar os critérios de projeto, levando a uma redução dos requisitos de limites térmicos de cabos e painéis elétricos.

Obrigado.

Eduardo Cesar Senger

Lprot – Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

senger@pea.usp.br - (11) 30915316