



Estudo de Caso: Topologias de Redes Paralelas entre Redes Redundantes de T.O. Implementadas com Diferentes Protocolos

Lucas Felipe Dias,
Otávio de Souza M. Gomes,
Luiz Lenarth Gabriel Vermaas

Universidade Federal de Itajubá/MG



Motivação

Sistemas Elétricos de Potência

- Confiabilidade, alta disponibilidade e alto desempenho para controle, proteção e supervisão.
- Subestações (SE) são pontos de controle e transferência do fluxo energético.
- IEC 61850 definiu requisitos ainda mais rigorosos de desempenho, confiabilidade e disponibilidade das SCN e dos IEDs.



Motivação

A estrutura de proteção deve ser rápida, segura e confiável, com a digitalização das subestações a rede de TO e os sistemas de automação devem assim ser também confiáveis, seguros e ágeis, de acordo com as normas.



Identificação do Problema

Necessidade de se desenvolver uma rede de comunicação redundante, segura e de alta disponibilidade interligando duas subestações com LANs projetadas em conformidade com as recomendações de diferentes edições da **IEC 61850**.

Identificação do Problema

Nível de Estação

SUPERVISÃO E CENTROS DE CONTROLE

Nível de Bay

IEDS E CONTROLADORES PARA PROTEÇÃO E CONTROLE

Nível de Processo

EQUIPAMENTOS DE CAMPO / INSTRUMENTAÇÃO

Barramento de Estação
(GOOSE, MMS)

Barramento de
Processo (SV)

Identificação do Problema

IEC 61850:

- Arquitetura de automação de subestações para interoperabilidade (digitalização) entre fabricantes;
- Os dispositivos (disjuntor, seccionadora, TP, TC) são modelados para serem processados pelos IEDs (*Intelligent Electronic Devices*);

Identificação do Problema

IEC 61850 - Protocolos:

- **GOOSE**: requisitos rígidos (4ms), somente com endereços MAC, comunicação horizontal (multicast);
- **MMS** (*Manufacturing Message Specification*): supervisão e controle (1-10 seg), TCP/IP, comunicação vertical (níveis 1 e 2);
- **SV** (*Sample values*): valores amostrados nas medições analógicas (merging unit), comunicação vertical.

NÍVEL DE ESTAÇÃO



BARRAMENTO DE ESTAÇÃO

NÍVEL DE BAY



BARRAMENTO DE PROCESSO

NÍVEL DE PROCESSO



Identificação do Problema

Modelo O.S.I.

Open System Interconnection

APLICAÇÃO

REDE

ENLACE DE DADOS

CAMADA FÍSICA

GOOSE

Generic Objects Oriented Substation Events

Eventos Genéricos de Subestações Orientados a Objetos

Protocolo apresentado pela IEC 61850

- Publicador/Assinante
- Mensagens rápidas e de Trip (1 e 1A)
- Requisitos rígidos (4ms)
- Somente com endereços MAC, sem IP
- CSMA/CD
- Redundância é opcional

Desafio

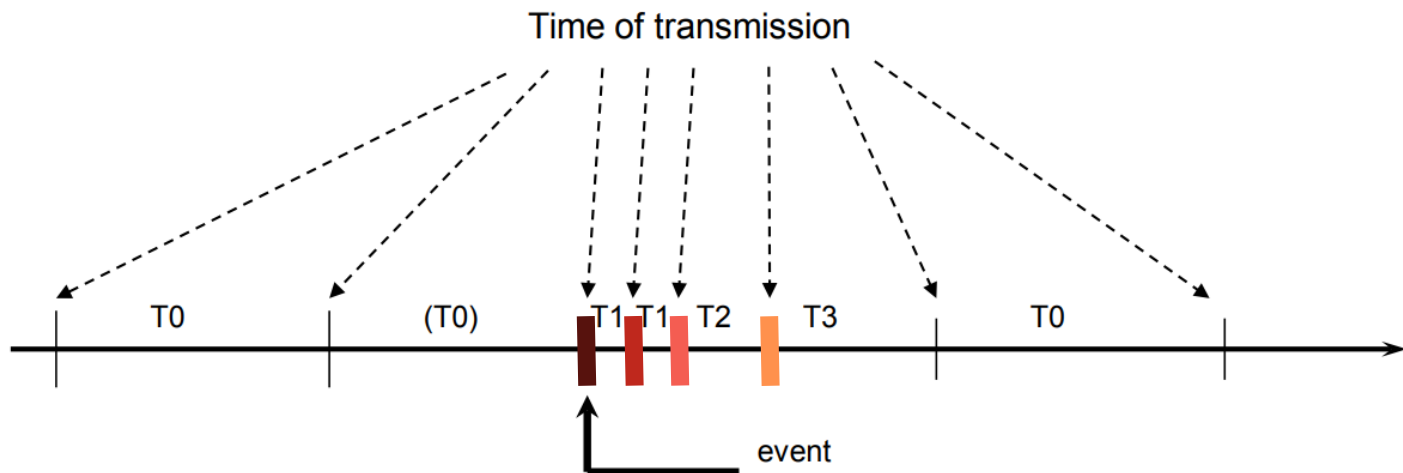
Modelo de Transmissão

Para mensagens do tipo 1 e 1A a norma padroniza o protocolo GOOSE e define os seguintes requisitos para serviço da camada 2 (Enlace de Dados) do modelo OSI (*Open System Interconnection*):

- É mandatório o uso de *tags* prioritárias - VLAN, para identificar e classificar a
- Prioridade das mensagens GOOSE;
- É obrigatório o Controle de Colisão de Acesso Múltiplo (CSMA/CD);
- É opcional a implementação de redundância de link, através dos protocolos **PRP**, **RSTP** e HSR (*High-availability Seamless Redundancy*).

Identificação do Problema

Modelo de Transmissão



IEC 818/11

T0 é o tempo de retransmissão em condições estáveis;

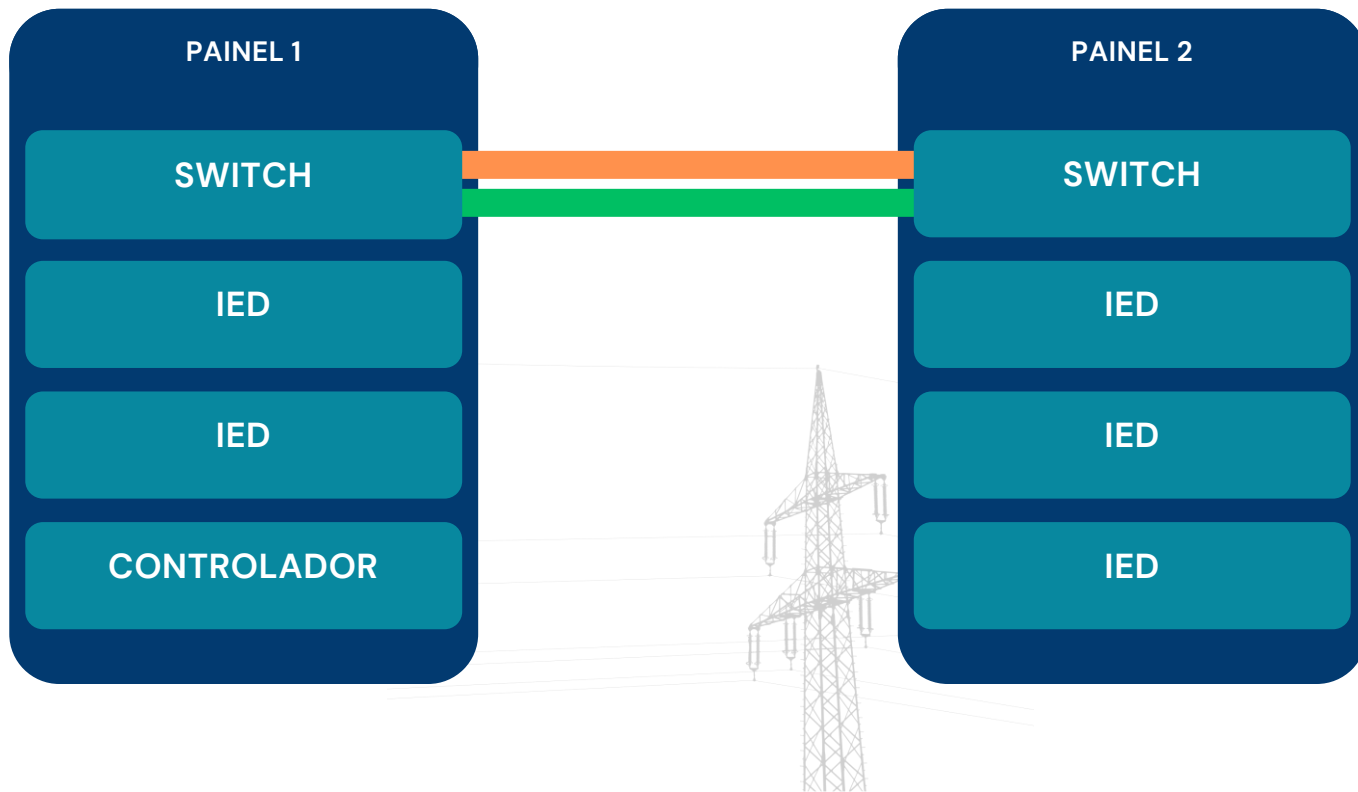
(T0) é o tempo de retransmissão interrompido por evento;

T1 é o tempo de retransmissão após o evento;

T2, T3 são os tempos de retransmissão até atingir o tempo de condições estáveis.

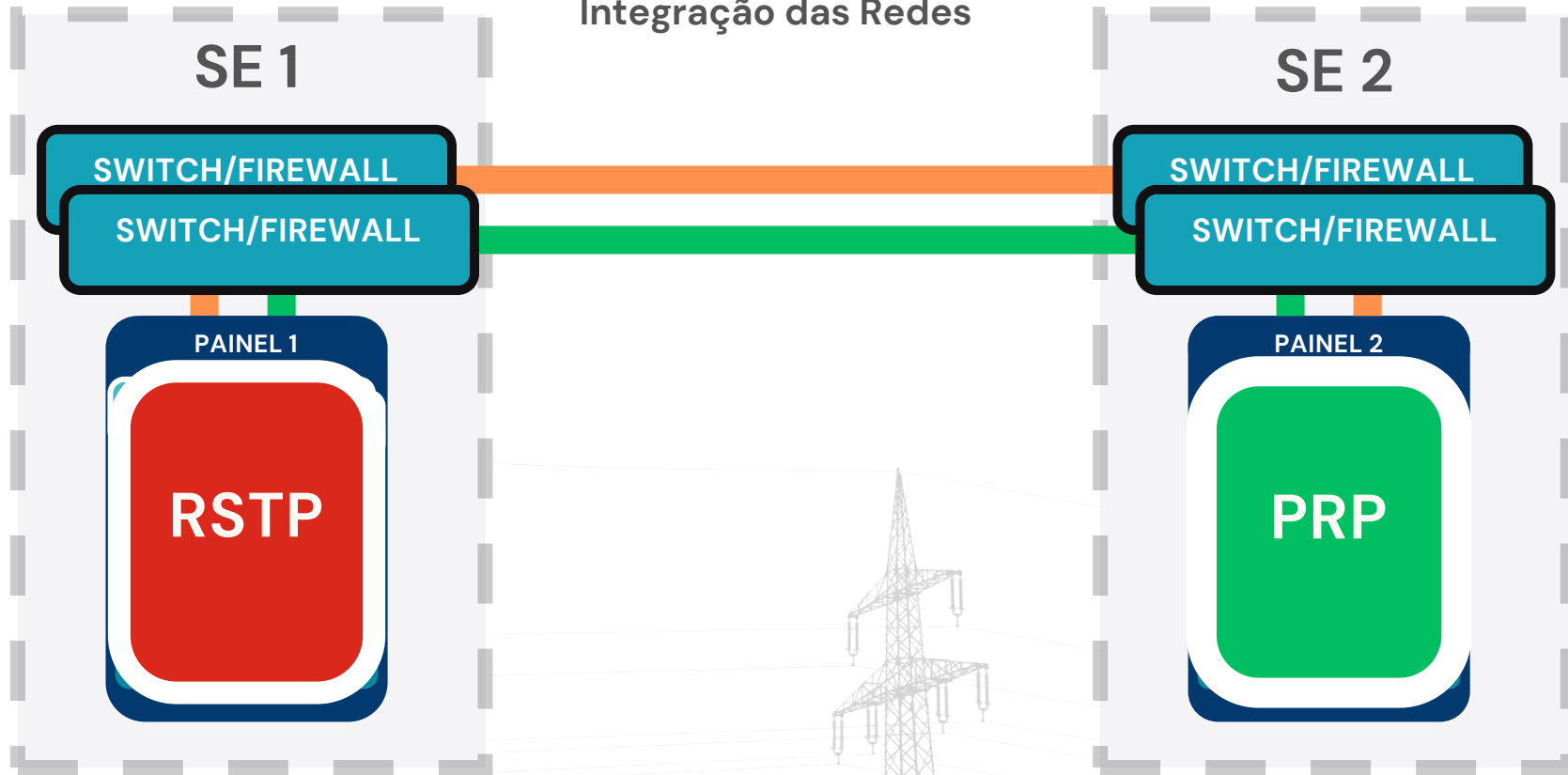
DESAFIO

Integração das Redes



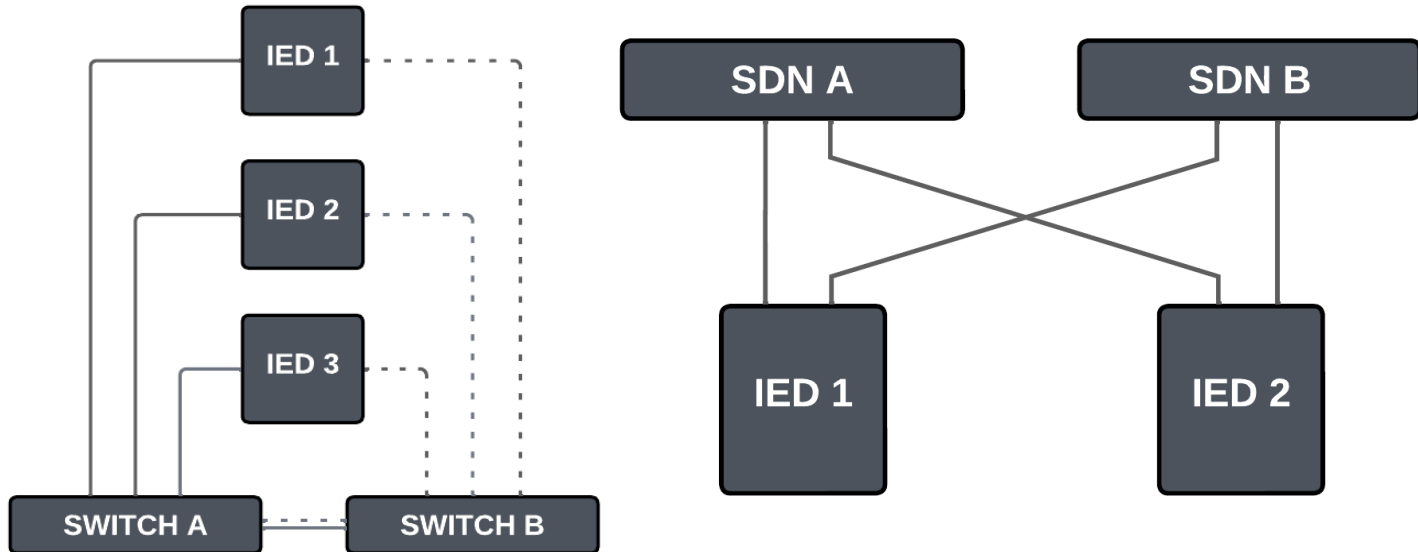
DESAFIO

Integração das Redes



1ª Solução Proposta

Uma aplicação contendo duas redes de comunicação de subestações, em acordo com diferentes versões da IEC 61850. Uma delas utiliza o protocolo **RSTP** para gerenciamento de uma rede de cura e seus loops, e outra possui o protocolo **PRP** com redes paralelas.



1ª Solução Proposta

Arquitetura de rede RSTP proposta

330	12/07/2023	03:25:21.943	VB012		Deasserted
329	12/07/2023	03:25:21.951	LT02		Asserted
328	12/07/2023	03:25:21.960	PortA	RSTP Role Disabled	
327	12/07/2023	03:25:21.961	PortA	RSTP State Discarding	
326	12/07/2023	03:25:22.001	PortB	RSTP Role Rootport	
325	12/07/2023	03:25:22.002	PortB	RSTP State Learning	
324	12/07/2023	03:25:22.022	PortB	RSTP State Forwarding	
323	12/07/2023	03:25:22.985	VB012		Asserted
322	12/07/2023	03:25:22.993	LT02		Deasserted

_ 22,022

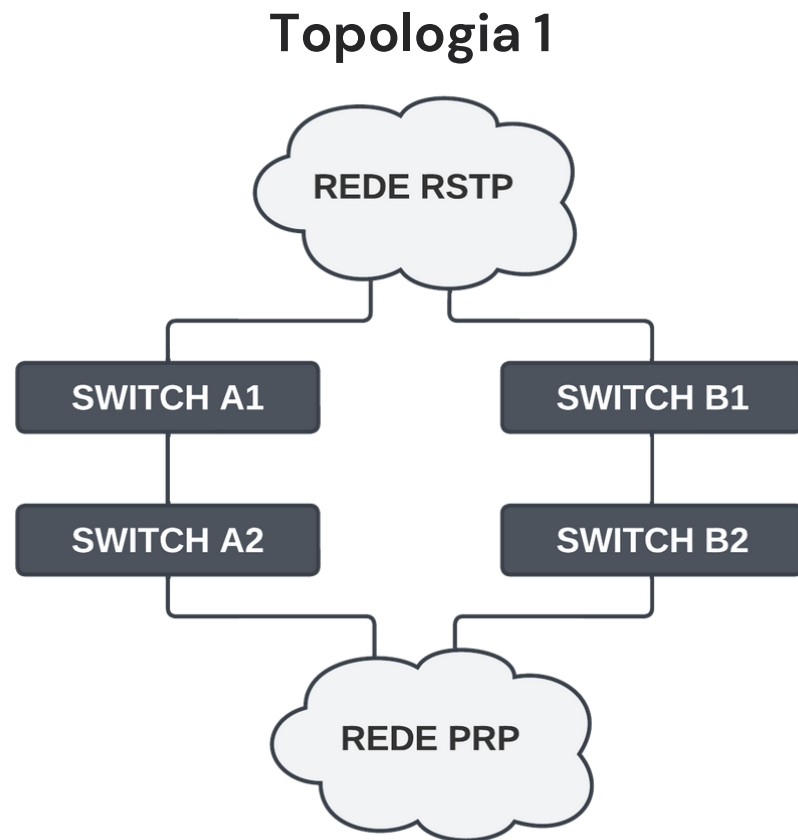
_ 21,960

62 ms

---> Tempo de
Recomposição

1ª Solução Proposta

- Fragilidades de segurança;
- O RSTP não pode ser usado na rede integradora, pois as redes são independentes/paralelas;
- QoS: Out Of Sequence;



Avaliação (1ª)

Out Of Sequence

GOOSE Transmit Status

MultiCastAddr	Ptag:Vlan	AppID	StNum	SqNum	TTL	Code

SEL_710_PRPCFG/LLN0\$G0\$PP_Resp_GOOSEMessage						
01-0C-CD-01-00-05	4:5	5	2	10066	936	
Data Set: SEL_710_PRPCFG/LLN0\$DTS_PPTeste_Resp						

GOOSE Receive Status

MultiCastAddr	Ptag:Vlan	AppID	StNum	SqNum	TTL	Code

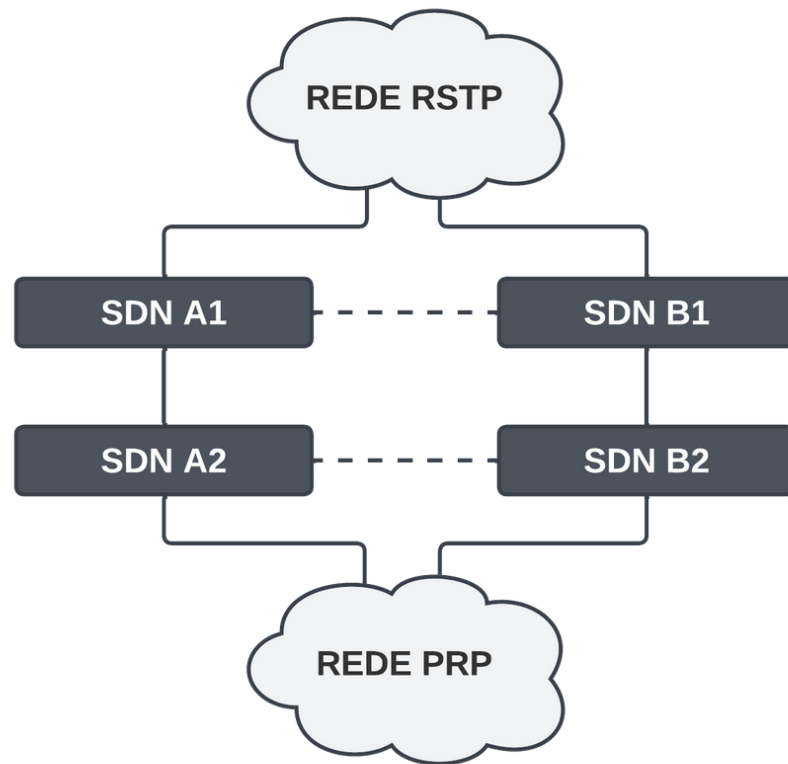
SEL_710_RSTPCFG/LLN0\$G0\$GOOSE_MGS_Test						
01-0C-CD-01-00-01	4:1	1	1	10146	2000	OUT OF SEQUENC
Data Set: SEL_710_RSTPCFG/LLN0\$DS_GOOSETest						
SEL_700G_RSTPCFG/LLN0\$G0\$MSG_GOOSE_Test						
01-0C-CD-01-00-02	4:2	2	1	10137	2000	OUT OF SEQUENC
Data Set: SEL_700G_RSTPCFG/LLN0\$DS_GOOSE_Test						
SEL_787_RSTPCFG/LLN0\$G0\$MSG_GOOSE_Test						
01-0C-CD-01-00-03	4:3	3	2	10071	2000	OUT OF SEQUENC
Data Set: SEL_787_RSTPCFG/LLN0\$GOOSE_Test						
SEL_787_PRPCFG/LLN0\$G0\$PP_GOOSEMessage						
01-0C-CD-01-00-04	4:4	4	2	10066	2000	
Data Set: SEL_787_PRPCFG/LLN0\$TestePP_Digitais						

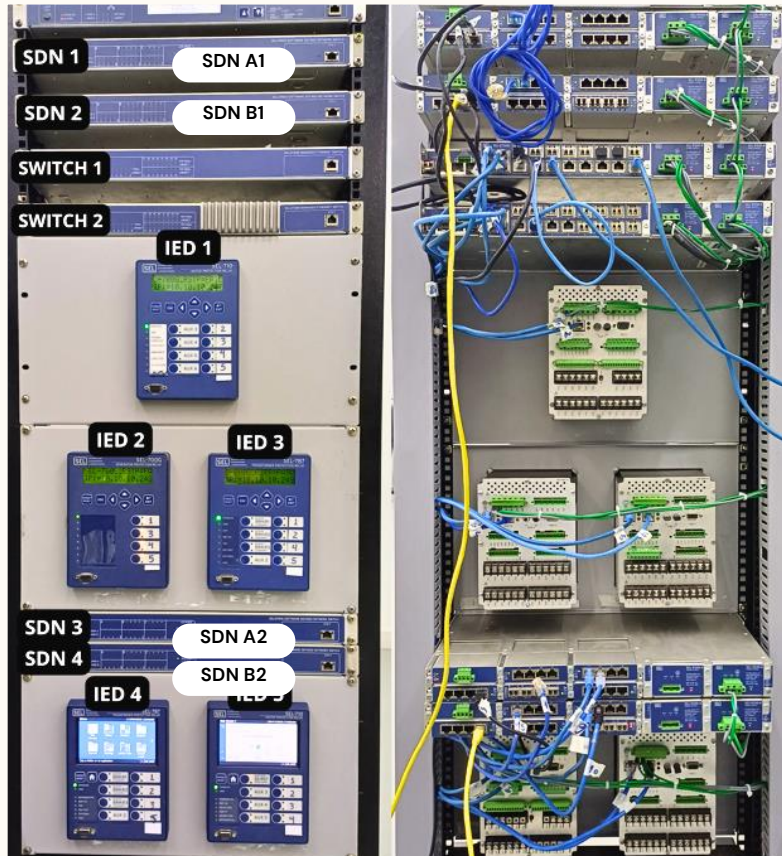
IEC 61850 Mode/Behavior On
IEC 61850 Simulation Mode Off

2ª Solução Proposta

- Controle dos fluxos por restrição de tráfego;
- Segurança melhorada – *Denied By Default*;
- Controle centralizado em cada SE, ou em apenas uma delas.

Topologia 2





Topologia 2

Dispositivo	IP/Mask
REDE T.O. (SDN)	
SDN_1	10.10.10.242/28
SDN_2	10.10.10.243/28
SDN_3	10.10.10.244/28
SDN_4	10.10.10.245/28
Controlador	10.10.10.246/28
REDE RSTP	
SEL-710_1	10.10.10.247/28
SEL-700G	10.10.10.248/28
SEL-787_1	10.10.10.249/28
REDE PRP	
SEL-787_2	10.10.10.250/28
SEL-710_2	10.10.10.251/28
SWITCH	
SEL-2730M_1	10.10.10.252/28
SEL-2730M_2	10.10.10.253/28
GPS	
SEL-2488	10.10.10.254/28

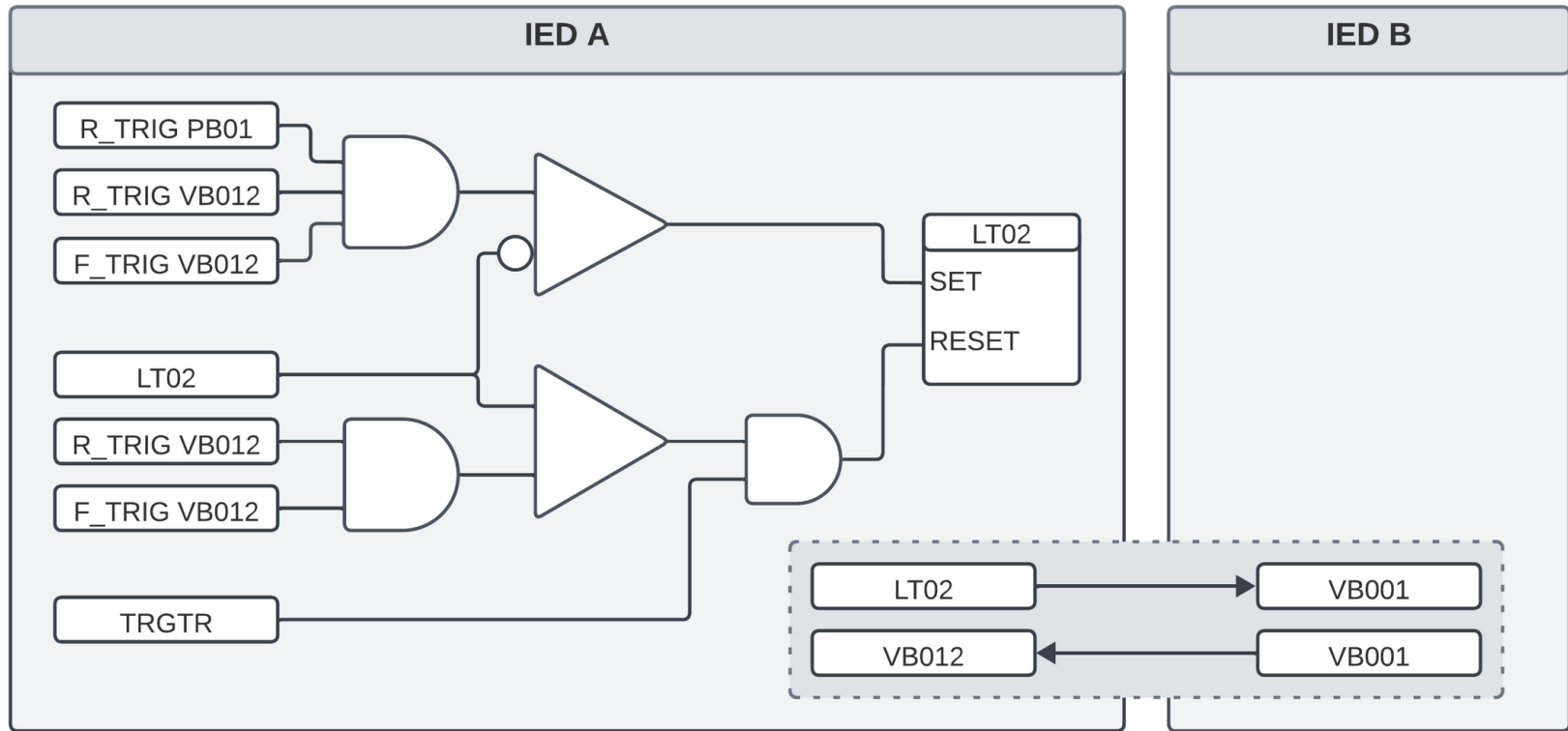
Avaliação(2ª)

Controlador SDN: Links Físicos e Fluxos do GOOSE

Objeto	Restrição
EtherType	GOOSE
MAC de destino	01-0C-CD-01-00-05
VLAN	0x005
Porta/Grupo de ingresso	C1
Porta/Grupo de egresso	Failover: C2 D1

Tabela 1: Regras e restrições de fluxo aplicadas a uma das portas do SDN A1

Avaliação (2ª)



Lógica de ping-pong (RTT)

Avaliação Geral

Rede	Δt Máximo	Δt Médio
PRP	4,5	4,168
RSTP	4,5	4,168
Recomp. PRP	6,5	5,210
Recomp. RSTP	517	5,906

Tabela 2: Dados experimentais referentes ao desempenho das mensagens GOOSE nas redes vazias - tempo em milisegundos

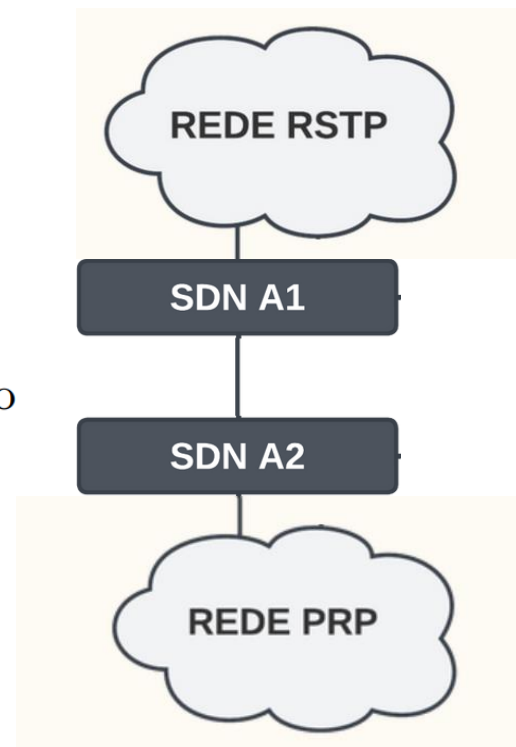
Avaliação Geral

Rede	Δt Máximo	Δt Médio
PRP - RSTP	6,5	4,17844
RSTP - PRP	4,5	4,16793

Tabela 4: LAN integradora sem adição de tráfego - tempo em mili-segundos

Rede	Δt Máximo	Δt Médio
PRP - RSTP	10,5	4,75429
RSTP - PRP	10,5	5,26044

Tabela 5: LAN integradora com adição de tráfego - tempo em mili-segundos



Considerações finais

- A topologia não é aplicável com a tecnologia disponível para o estudo;
- O desempenho não deve ser considerado sem a qualidade das mensagens;
- No caso estudado, o mais adequado é que todos os IEDs tenham PRP.

Considerações finais

- A proposição ideal de aplicação do PRP em todos os dispositivos finais (adequação), juntamente com o uso de switches SDN como porta de entrada de cada LAN, se apresenta como a solução mais adequada para atuais projetos de engenharia de redes de comunicação em um SAS.

Trabalhos futuros

Analisar o uso de **RedBox** para tratar redundâncias do PRP na rede **RSTP**, por exemplo, e com tráfegos de igual ou maior prioridade, como o **SV (*Sampled Values*)**, concorrendo com o GOOSE na rede.

Obrigado!

Lucas Felipe Dias

lucasfelipedias25@unifei.edu.br

Otávio de Souza M. Gomes

otavio.gomes@unifei.edu.br

Luiz Lenarth Gabriel Vermaas

lenarth@unifei.edu.br

