

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS JOINVILLE

VICTOR DA SILVA FERREIRA

**ESTUDO DOS PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA EM SUBESTAÇÕES DE
ENERGIA EM CONFORMIDADE COM A IEC 61850**

JOINVILLE
2025

VICTOR DA SILVA FERREIRA

**ESTUDO DOS PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA EM SUBESTAÇÕES DE
ENERGIA EM CONFORMIDADE COM A IEC 61850**

Momografia submetido ao Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. M.e Stefano Zeplin
Co-orientador: M.e Mateus Alexandrino

Joinville

2025

Ferreira, Victor da Silva.

Estudo dos protocolos de redundância em subestações de energia em conformidade com a IEC 61850. – Joinville, SC, 2025.

81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Joinville, 2025.

Orientador: Prof. Me. Stefano Zeplin.

Co-orientador: Me. Mateus Alexandrino.

1. RSTP. 2. HSR; 3. PRP. I. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. II. Título.

VICTOR DA SILVA FERREIRA

**ESTUDO DOS PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA EM SUBESTAÇÕES DE
ENERGIA EM CONFORMIDADE COM A IEC 61850**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

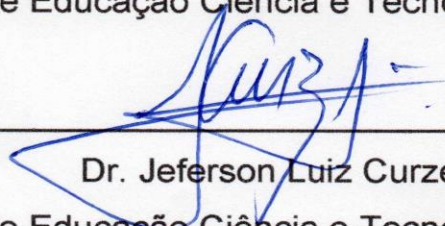
Joinville, 08 de dezembro de 2025.



Msc. Stefano Romeu Zeplin

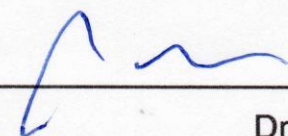
Orientador

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Dr. Jeferson Luiz Curzel

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Dr. Michael Klug

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Dedico este trabalho a Deus, minha família, e a amigos, por sempre estarem comigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por sempre me incentivarem aos estudos e educação. Também os agradeço por serem meus principais exemplos e por me mostrarem a importância dos estudos e valor do conhecimento.

Agradeço a minha irmã e amigos por acreditarem em mim e me apoiarem me mostrando que sempre podemos melhorar e fazer o nosso melhor em tudo.

“Se você não tiver disciplina, o seu talento
não vai servir de nada”

Cristiano Ronaldo

RESUMO

Nas Subestações de Energia (SE) os dispositivos gerenciados por meio do sistema de supervisão, proteção e controle dependem de uma infraestrutura de comunicação de rede, que deve ser padronizada, em conformidade com a norma IEC 61850. Com isso, é possível assegurar a operação adequada do sistema, garantindo a interoperabilidade da comunicação nos Sistemas de Proteção, Supervisão e Controle (SPSC). Portanto, este trabalho aborda os principais critérios técnicos e operacionais para a aplicação dos protocolos de redundância de rede definidos na norma IEC 62439, que são aplicados no barramento de processos à transmissão de mensagens GOOSE da SE. Na realização do estudo foi criada uma plataforma de testes com Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) simulados com o software IEDScout, interligados por switches industriais configurados com os protocolos de *redundância Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP)*, *High Availability Seamless Redundancy (HSR)* e *Parallel Redundancy Protocol (PRP)*. Para análise dos resultados, foram feitas capturas do tráfego de rede com o software *Wireshark* durante a desconexão do link principal de rede. Logo, com a observação do comportamento de cada mecanismo de redundância pode-se avaliar o restabelecimento da rede e a latência dos protocolos de redundância. Dessa forma, o estudo aponta para a importância da utilização correta dos protocolos de redundância em redes de SE, e para modernização do SPSC, em conformidade com a IEC 61850 e IEC 62439.

Palavras-chave: Subestação; IEC 61850; HSR; PRP; RSTP; SPSC, Switch, Dispositivos Eletrônicos Inteligentes.

ABSTRACT

In Electric Power Substations (EPS), the devices managed through the supervision, protection, and control system depend on a network communication infrastructure that must be standardized in accordance with the IEC 61850 standard. This standardization ensures the proper operation of the system, guaranteeing communication interoperability within the Protection, Automation and Control Systems (PACS). Therefore, this work addresses the main technical and operational criteria for the application of network redundancy protocols defined in the IEC 62439 standard, applied to the process bus for the transmission of GOOSE messages in electric power substations. For the development of the study, a test platform was created using simulated Intelligent Electronic Devices (IEDs) through the IEDScout software, interconnected by industrial switches configured with the redundancy protocols Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR), and Parallel Redundancy Protocol (PRP). To analyze the results, network traffic captures were performed using the Wireshark software during the disconnection of the main network link. Thus, by observing the behavior of each redundancy mechanism, it was possible to evaluate network recovery and the latency of the redundancy protocols. In this way, the study highlights the importance of the correct application of redundancy protocols in electric power substation networks, as well as their role in the modernization of PACS, in compliance with IEC 61850 and IEC 62439.

Keywords: Substation; IEC 61850; HSR; PRP; RSTP; PACS, Switch, Intelligent Electronic Devices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa Geoelétrico - Rede de Operação - Sul - 2029	19
Figura 2: Fluxo da energia elétrica	20
Figura 3: Sistema de Automação de Subestação	20
Figura 4: Transformador de potência	21
Figura 5: Transformador de corrente	22
Figura 6: Transformador de potencial	23
Figura 7: Disjuntor	23
Figura 8: Dispositivo Eletrônico Inteligente REC615	25
Figura 9: Merging Units	25
Figura 10: Switches em painel de Subestação com IEC61850	26
Figura 11: Tempo de recuperação de comunicação IEC TC57 WG10	28
Figura 12: Rede Redundante sem Spanning-Tree	29
Figura 13: Rede redundante com Spanning-Tree	30
Figura 14: Estados RSTP	31
Figura 15: Rede com RSTP	32
Figura 16: Características intrínsecas do PRP	33
Figura 17: Rede com PRP	34
Figura 18: Comunicação PRP com dois DANPs.	35
Figura 19: Frame PRP estendido por RCT	36
Figura 20: Rede com HSR	37
Figura 21: Estrutura do nó HSR	38
Figura 22: Formato do frame HSR	39
Figura 23: Software IEDScout interface de simulação de IED	40
Figura 24: Foto da rede de switches Hirschmann	41
Figura 25: Arquitetura de rede com RSTP	42
Figura 26: Arquitetura de rede com HSR	42
Figura 27: Arquitetura de rede com PRP	42
Figura 28: Transceptor óptico	43
Figura 29: Plataforma de teste	44
Figura 30: Simulação de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes	45
Figura 31: Comparação de Frame	46

Figura 32: Frame enviado e recebido.....	47
Figura 33: Frame Extensible Authentication Protocol (EAP)	49
Figura 34: Frames convergência de rede RSTP	51
Figura 35: Convergência de rede HSR	53
Figura 36: Convergência de rede HSR com MTU de 1530	54
Figura 37: Convergência de rede PRP.....	55
Figura 38: Convergência de rede PRP com MTU de 1530	56
Figura 39: Frame antes da mudança de porta	71
Figura 40: Frame BPDU com mudança de porta	72
Figura 41:Frame EAP captura RSTP	72
Figura 42: Frame BPDU após a mudança de porta	73
Figura 43: 2º Frame BPDU após a mudança de porta	73
Figura 44: Frame HSR rede B.....	74
Figura 45: Frame HSR rede A.....	74
Figura 46: Frame EAP.....	75
Figura 47: Frame rede B após falha.....	75
Figura 48: 2º Frame HSR rede B Após falha.....	76
Figura 49: 3º Frame HSR rede B após falha	76
Figura 50: Frame PRP rede B	77
Figura 51: Frame PRP rede B	77
Figura 52: Frame PRP rede B	78
Figura 53: Frame PRP rede A	78
Figura 54: Frame PRP rede A	79
Figura 55: Frame PRP rede A	79
Figura 56: Frame EAP rede PRP	80
Figura 57: Frame PRP rede B	80
Figura 58: Frame PRP rede B	81
Figura 59: Frame PRP rede B	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Intervalo de tempo RSTP	50
Tabela 2: Tempos mínimo, médio, máximo e desvio padrão com RSTP	50
Tabela 3: Intervalo de tempo HSR	52
Tabela 4: Tempos mínimo, médio, máximo e desvio padrão com HSR	52
Tabela 5: Intervalo de tempo PRP	55
Tabela 6: Tempos mínimo, médio, máximo e desvio padrão com PRP	55
Tabela 7: Instantes de envio e recepção frames RSTP	66
Tabela 8: Instantes de envio e recepção frames HSR	67
Tabela 9: Instantes de envio e recepção frames PRP	68

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

GOOSE	Evento de Subestação Orientado a Objeto Genérico (Generic Object Oriented Substation Event)
HSR	High Availability Seamless Redundancy
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission)
IED	Dispositivo Eletrônico Inteligente (Intelligent Electronic Device)
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IP	Protocolo de Internet (Internet Protocol)
MU	Merging Units
PRP	Parallel Redundancy Protocol
RSTP	Rapid Spanning Tree Protocol
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (Supervisory Control And Data Acquisition)
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPSC	Sistema Proteção, Supervisão e Controle
STP	Spanning Tree Protocol

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.3 OBJETIVO GERAL.....	17
1.4 OBJETIVO ESPECIFICO.....	17
2 COMUNICAÇÃO DE SUBESTAÇÕES.....	19
2.1 SISTEMA DE PROTEÇÃO, SUPERVISÃO E CONTROLE.....	24
2.1.1 IED.....	24
2.1.2 MERGING UNIT.....	25
2.1.3 SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	26
1.4 SWITCH.....	26
2.2 PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA.....	27
2.2.1 STP E RSTP	28
2.2.2 PRP.....	33
2.2.3 HSR.....	36
3 TESTES PRÁTICOS.....	40
3.1 AMBIENTE DE TESTES.....	41
3.2 PROCEDIMENTO DE TESTES.....	45
4 RESULTADOS.....	48
4.1 RESULTADOS DOS TESTES.....	49
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA.....	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
6 TRABALHOS FUTUROS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62
APÊNDICE A.....	66
APÊNDICE B.....	71

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é uma estrutura complexa sujeita a falhas nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Portanto, interrupções em subestações de energia podem causar apagões em extensas regiões, como o blecaute ocorrido em 1999 que afetou cerca de 76 milhões de pessoas em dez Estados e Distrito Federal, deixando essas localidades sem energia elétrica (DA, 1999). E como essas falhas afetam a sociedade no dia a dia? Quando esses distúrbios na rede elétrica atingem grandes centros comerciais, há danos financeiros, como no caso da falta de energia na cidade de São Paulo, que gerou prejuízos estimados em cerca de R\$ 2 bilhões, segundo levantamento da Fecomercio (FECOMERCIO, 2025).

Nesse contexto, o desenvolvimento e a atualização da norma IEC 61850 contribuem à modernização das diretrizes do Sistema de Proteção, Supervisão e Controle (SPSC). Isso se deve pela crescente adoção de tecnologia Ethernet na comunicação dos equipamentos de campo, como a comunicação entre Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – *Intelligent Electronic Devices*) e o sistema SCADA. Porém, com essa atualização surgiu a lacuna da ausência de um método de padronização oficial para a redundância das redes de comunicação das subestações de energia que garantisse disponibilidade e confiabilidade dessas redes.

Com isso, em 2012 a segunda edição da norma IEC 61850 (IEC 61850, 2012) teve a implementação dos protocolos *High Availability Seamless Redundancy* (HSR) e *Parallel Redundancy Protocol* (PRP), os quais garantem tempo de recuperação adequado para essas redes de comunicação. Com isso, os dispositivos que recebem dados com mecanismos de tempo nulo de recuperação permitem a possibilidade de falha em uma conexão redundante, mesmo que ocorra uma falha na rede. Portanto, para essa tecnologia de redundância, não se faz necessário um tempo de verificação de queda de link para reabilitar um link em *stand-by*, pois, sempre há duas rotas ativas garantindo a confiabilidade da comunicação.

1.1 JUSTIFICATIVA

A resiliência dos sistemas de controle e proteção de subestações de energia é essencial para impedir apagões e garantir a confiabilidade a múltiplas falhas em um sistema. Portanto, diante da crescente complexidade das subestações de energia e a gravidade dos impactos que essas interrupções causam, torna-se indispensável investir nas melhores técnicas de arquiteturas e redundâncias. Com isso, essas alterações implicam na integração eficiente entre os equipamentos e sistemas de comunicação da Subestação de Energia, como o sistema SCADA, switches, IEDs e as *Merging Units*. Dessa forma, o aumento do uso da comunicação Ethernet nas interligações dos sistemas e a falta de uma padronização clara para garantir a redundância da rede, torna a segurança e a continuidade dos serviços de comunicação críticos. A definição adequada para integração entre os elementos do Sistema de Proteção, Supervisão e Controle (SPSC) é essencial para que o sistema elétrico funcione de forma confiável, mesmo diante de falhas. Para que ele possa responder com rapidez e eficiência em situações de falta. Além disso, com a digitalização das subestações de energia é possível reduzir a quantidade de cabos interconectados diretamente aos equipamentos de leitura, tornando assim os protocolos de redundância e a arquitetura de rede fundamentais para o funcionamento adequado das subestações de energia.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os sistemas das Subestações de Energia (SE) passam por desafios de assegurar eficiência, segurança e padronização em todos os seus níveis. A aplicação inadequada ou escolha incorreta de protocolos de redundância de rede pode resultar no uso de mecanismos de comunicação ineficientes, que não asseguravam os tempos de convergência adequados. Portanto, sistemas de comunicação sem garantia do tempo de recuperação adequado se tornam um desafio crucial em casos de falha ou múltiplas falhas no sistema, que podem gerar o desligamento de uma Subestação de Energia (SE) ou perdas em partes do Sistema Proteção, Supervisão e Controle (SPSC). Ao analisar os tempos de comunicação de mensagens GOOSE e Sample Values, verifica-se, para aplicações de 4800 amostras, o intervalo entre elas é de 208,33 microssegundos, de modo que atrasos da ordem de um milissegundo ou superior podem causar falha no funcionamento de um IED. Já para aplicações com

amostras para 250 amostras por segundo, o tempo máximo de convergência admissível deve ser de no máximo quatro milissegundos ou menos de acordo com a criticidade da aplicação (KIRRMANN, 2010). Dessa forma, protocolos como o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), com tempo de recuperação superior ao de aplicações críticas, podem interferir no funcionamento adequado do sistema. Além do mais, até a segunda edição da norma IEC 61850 (IEC 61850, 2012), métodos proprietários de redundância eram utilizados nos equipamentos das Subestações de Energia (SE), como dual-homing e hot-standby. Esses protocolos, por serem proprietários de alguns fabricantes, impediam a interoperabilidade do sistema com diferentes fabricantes, acabando com a concorrência por dispositivos mais baratos. Portanto, redes anteriores a atualização da norma IEC 61850 (IEC 61850, 2012) podem estar vulneráveis a falhas devido a altos tempos de convergência ou impossibilidade de interoperabilidade com fabricantes diferentes.

1.3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar e comparar o desempenho dos protocolos de redundância Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP), aplicados ao barramento de processos da Subestação de Energia (SE), em conformidade com a norma IEC 61850 e IEC 62439. A análise foi feita a partir dos tempos de convergência e do comportamento da rede frente a falhas causadas propositalmente, considerando a comunicação de mensagens GOOSE. Para isso, foi utilizada uma plataforma de testes composta por Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) simulados e switches industriais, para captura e análise dos frames. Com a plataforma foi possível comparar o desempenho dos protocolos RSTP, HSR e PRP, em conformidade com os requisitos temporais exigidos para aplicações críticas das SE.

1.4 OBJETIVO ESPECIFICO

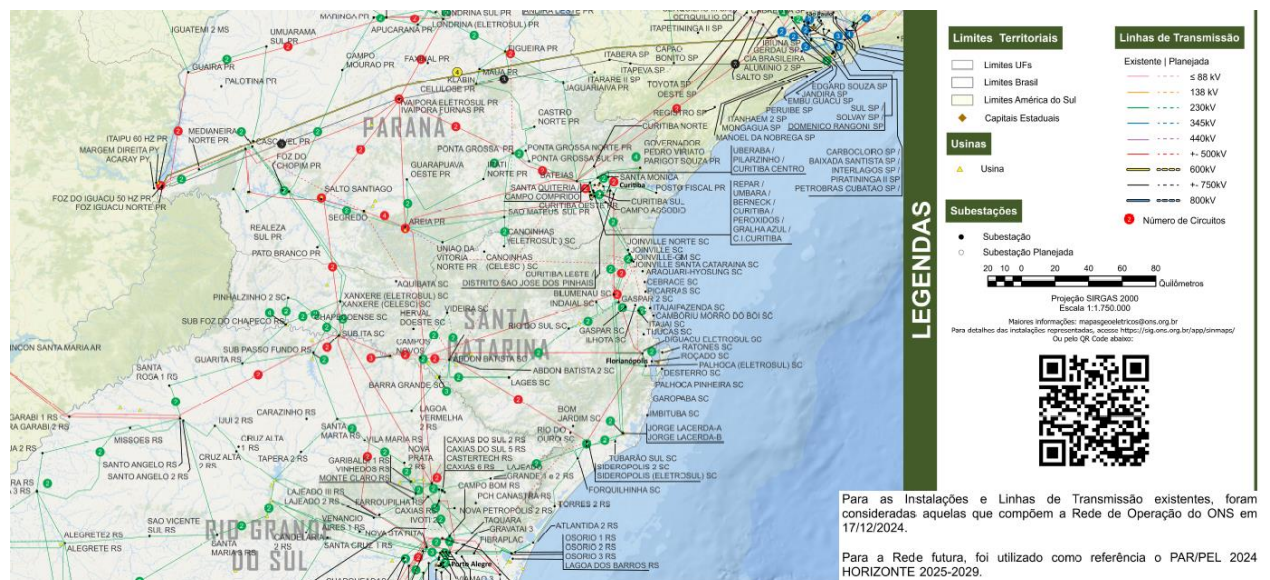
- Revisão bibliográfica sobre as tecnologias de rede em subestações;
- Simulação de dois Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs), com a utilização do software OMICRON IEDScout, para simular o tráfego de frames em uma rede de comunicação de Subestação de Energia (SE)

- Montagem de uma rede de switches implementando os protocolos de rede Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP);
- Captura dos frames enviados de um computador ao outro através do software Wireshark;
- Análise e comparação dos resultados obtidos nos testes de convergência de rede. E interpretação das estatísticas e comparação com os fundamentos teóricos.

2 COMUNICAÇÃO DE SUBESTAÇÕES

O Sistema Interligado Nacional (SIN) interliga a matriz elétrica brasileira em um único sistema coordenado, conforme Figura 1, do Mapa Geoelétrico brasileiro, Rede de Operação Sul, previsto para 2029. Nesse mapa estão “todas as usinas, subestações e linhas de transmissão que formam a Rede de Operação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)”. Dessa forma, o SIN é composto de unidades geradoras, subestações elevadoras ou abaixadoras, linhas de transmissão de energia, redes de distribuição em alta, média ou baixa tensão, e os consumidores que recebem a energia (ANEEL, 2010).

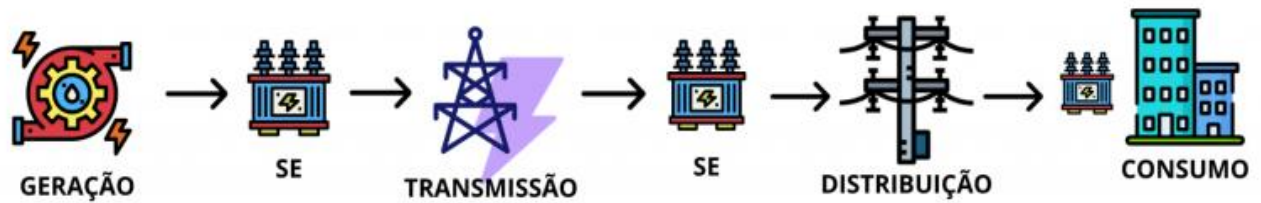
Figura 1: Mapa Geoelétrico - Rede de Operação - Sul - 2029



Fonte: Adaptado de ONS (2025)

Entre esses trechos estão as Subestações de Energia (SE), que são instalações elétricas que ajustam os níveis de tensão da rede elétrica, influenciando os valores de corrente conforme a demanda de carga. Dessa forma, garante-se o fluxo de potência pela transformação dos níveis de tensão, de acordo com os valores de entrada e saída necessários. Com isso, os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são integrados, por meio das Subestações de Energia (SE), conforme ilustrado na Figura 2.

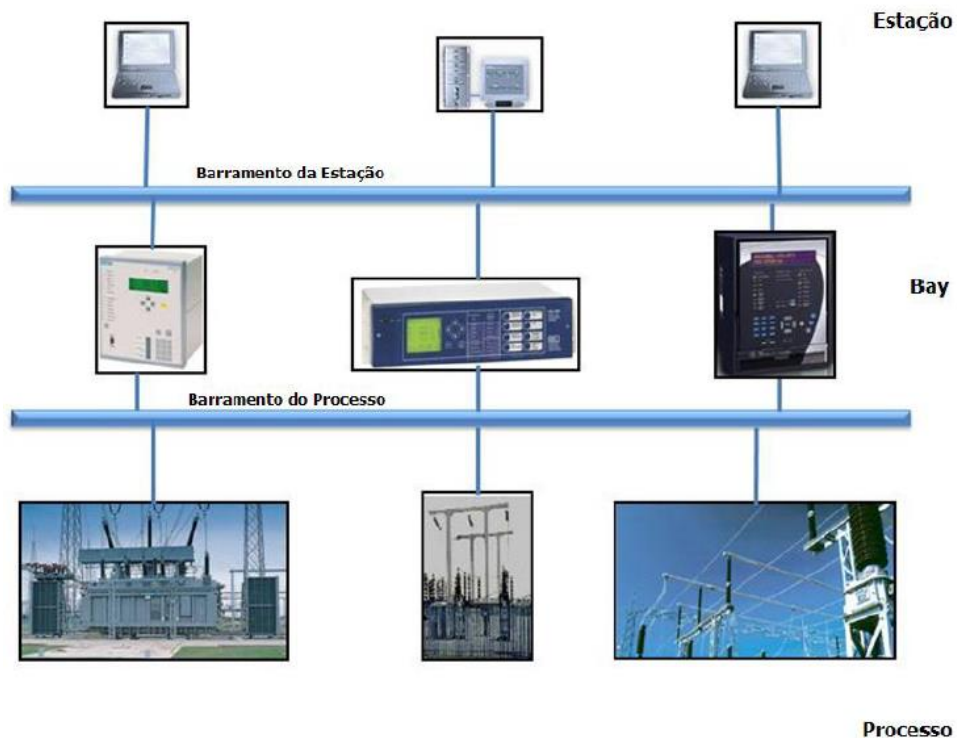
Figura 2: Fluxo da energia elétrica



Fonte: ENERGÊS (2021)

Na Subestação de Energia (SE) o Sistema de Automação de Subestação (SAS), representado na Figura 3, é dividido em três níveis: Nível de Processo; Nível de Bay; Nível de Estação. Portanto, em cada trecho deve-se verificar a intrinsecidade de cada um dos elementos e seu comportamento na rede para compreensão de como os protocolos de redundância e demais protocolos de rede devem atuar para garantir a disponibilidade da comunicação.

Figura 3: Sistema de Automação de Subestação



Fonte: PEREIRA, P (2017)

No Nível de Processo estão os transformadores, disjuntores, seccionadores, Merging Units e demais equipamentos do pátio. No Nível de Bay estão os equipamentos de controle e proteção como os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices), relés de proteção, controladores e reguladores de tensão. No Nível de Estação está o Sistema Supervisório e os equipamentos de gerenciamento, como Computadores, Interface Homem Máquina (IHM) e gateways. Os equipamentos do Nível de Estação são responsáveis por fazerem operações como ligar ou desligar disjuntores, analisar os status dos disjuntores, através dos computadores. Com isso, os dados do nível de estação são enviados para os Centros de Controle, para que possam ser enviados para gerenciamento e controle remoto da Subestação de Energia (SE), segundo McFadyen (2025).

No pátio da Subestação os transformadores de potência são os responsáveis pelo ajuste dos níveis de tensão de energia elétrica, dessa forma, ele pode elevar ou reduzir a tensão do trecho da Subestação de Energia (SE), conforme representado na Figura 4 abaixo. Essa máquina elétrica eleva ou rebaixa a tensão sem variação da frequência.

Figura 4: Transformador de potência



Fonte: ENERGÊS (2021)

Os transformadores de potência podem ter monitoramento remoto de suas variáveis elétricas e térmicas, que são elementos fundamentais para seu funcionamento. Com isso, para garantir a manutenção preventiva ou até atuação instantânea impedindo que ocorram incêndio no pátio e garantir o seu funcionamento de forma controlada deve-se obter alguns dados dos status do transformador, que

podem ser monitorados como: Monitoramento de Temperatura; Monitoramento de Gás no óleo; Monitoramento de Umidade no Transformador; Estado de operação (manual/automático, local/remoto); entre outros. Dessa forma, através de um Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) esses dados podem ser recebidos e verificados no Centro de Operação e Manutenção (E. G. ALVES , M).

Ainda a Nível de Processo da Subestação de Energia (SE) estão os transformadores de correntes (TC) e transformadores de potencial (TP), responsáveis por medir a corrente e tensão respectivamente, ao longo dos trechos da subestação, conforme Figuras 5 e 6. Eles permitem que relés de proteção e outros dispositivos operem com sinais aceitáveis, com isso, os relés podem detectar falhas de acordo com as condições elétricas (ENERGÊS, 2021).

Figura 5: Transformador de corrente



Fonte: ENERGÊS (2021)

Os transformadores de correntes (TC) operam com a corrente em seu enrolamento secundário proporcional à corrente do primário. Contudo, situações transitórias podem alterar momentaneamente seu comportamento por variações abruptas de grandezas elétricas, como faltas no sistema em que ele está inserido. Da mesma forma, os transformadores de potencial (TP) são responsáveis pela medição das tensões para os dispositivos de proteção.

Figura 6: Transformador de potencial

Fonte: ENERGÊS (2021)

Tanto os TCs e TP's enviam seus valores de medição às *Mergin Units (MUs)*, que realizam a conversão dos valores analógicos de corrente e tensão em digital por meio de mensagens de *Sampled Values (SV)*. Essas mensagens passam a ser disponibilizaas na rede Ethernet para os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices), que utilizam essas amostras para execução das funções do Sistema de Proteção, Supervisão e Controle (SPSC). Portanto, nas SEs os IEDs recebem fisicamente os sinais secundários dos TCs e TP's. Entretanto, com sincronismo de rede adequado e protocolos de redundância de rede, é realizada a recepção desses valores e analisados o comportamento oscilógrafo da corrente e tensão.

Figura 7: Disjuntor

Fonte: ENERGÊS (2021)

Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos, projetados para interromper o fluxo de corrente elétrica em uma linha ou circuito elétrico em casos de sobrecargas e falha, conforme Figura 7. São responsáveis pela interrupção do fluxo de corrente para proteção dos equipamentos, porém não tem uma “inteligência própria”. Esses dispositivos são utilizados para seccionamento dos trechos da subestação, para garantir a segurança dos operadores durante a manutenção da Subestação de Energia.

2.1 SISTEMA DE PROTEÇÃO, SUPERVISÃO E CONTROLE

No barramento de processo estão os dispositivos que compõe o Sistema de Proteção, Supervisão e Controle (SPSC), portanto nesse capítulo esses dispositivos serão apresentados. Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) são responsáveis fazer medição e coletar os dados dos transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP), por meio de comunicação por conexão digital entre controladores que meçam os valores de corrente e tensão, representado na Figura 8. Com isso, a comunicação Ethernet é feita entre os dispositivos, a nível de camada 2 (enlace) do modelo OSI. Dessa forma, os valores dos Transformadores de Corrente TCs e Transformadores de Potencial são lidos e distribuídos por valores conhecidos como valores analógicos amostrados a partir da Merging Unit. Esses dados são enviados para os IEDs e Sistema supervisórios, dessa forma, o Sistema Proteção, Supervisão e Controle (SPSC), pode garantir o funcionamento adequado e ininterrupto do sistema, através desses equipamentos.

2.1.1 IED

Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices), são equipamentos eletrônicos microprocessados controladores, que monitoram corrente, tensão e frequência do sistema, conforme Figura 8. Além do mais, monitoram parâmetros mecânicos e térmicos, como vibração e temperatura dos equipamentos da Subestação de Energia (SE), como o Transformador de potência e suas variáveis. Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) comandam os equipamentos do pátio, geralmente recebendo esses dados a partir de uma Merging Unit, TP TC e disjuntores.

Figura 8: Dispositivo Eletrônico Inteligente REC615



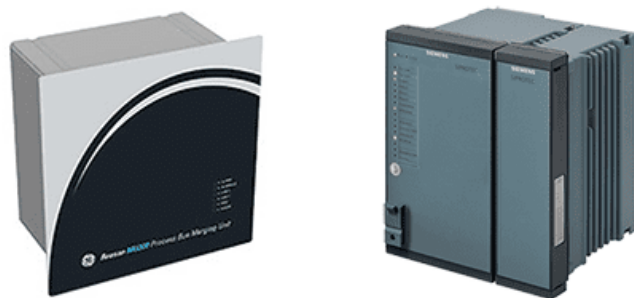
Fonte: COPYRIGHT ABB (2018)

Dessa forma, em caso de faltas ou anomalias, como casos de sobrecargas ou curtos-circuitos eles acionam a proteção. Ele pode atuar como um relé inteligente a partir dos valores provenientes dos sensores e demais equipamentos monitorados, realizando comandos de controle e proteção de acordo com valores de tensão, corrente ou frequência analisados. Portanto, valores de medidas inadequadas causam o disparo de disjuntores, para redução ou aumento do nível de tensão ou corrente necessária.

2.1.2 MERGING UNIT

A Merging Unit é um dispositivo que, a partir das conexões dos TCs e TPs a nível de processo, transforma sinais analógicos em digitais, o dispositivo está ilustrado na Figura 9. Dessa forma, ela transforma sinais analógicos em digitais e os pública na rede de comunicação (barramento de processo), para que os IEDs possam fazer a leitura de corrente e tensão do sistema elétrico.

Figura 9: Merging Units



Fonte: CONPROVE ENGENHARIA (2024)

2.1.3 SISTEMA SUPERVISÓRIO

O Sistema Supervisório SCADA – Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (Supervisory Control And Data Acquisition) integra e centraliza os dados, praticamente em tempo real, com as informações de estado e operacionais. Com isso, permite a aquisição dos valores como tensão, corrente, frequência, do nível de bay, por meio dos dados de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices), CLPs (Controlador Lógico Programável) e RTUs (Unidade Terminal Remota). Portanto, é necessário que haja uma infraestrutura de telecomando e telemedição por uma rede de switches, para se estabelecer o controle e aquisição de dados e controle do sistema, garantindo a operação do sistema elétrico. O SCADA possui módulos digitais de entradas e saídas analógicas e/ou digitais.

1.4 SWITCH

O Switch é um dispositivo de rede utilizado para comutar frames de um ou mais equipamentos para outros, conforme Figura 10. O switch trabalha na camada 2 do modelo OSI, camada de enlace, comutando pacotes, mas também podem trabalhar na camada 3 de roteamento. Além disso, pode ser utilizado para segregação de rede, através de Redes de Área Local Virtual (VLAN – Virtual Local Area Network) e assegurar múltiplas rotas de conexão redundante através dos protocolos de redundância.

Figura 10: Switches em painel de Subestação com IEC61850



Fonte: FERNÁNDEZ (2016)

Nas subestações os switches são os principais equipamentos responsáveis pela interligação de todos os dispositivos do sistema em rede. Porém, não se pode utilizar switches corporativos, pois o ambiente de instalação de Subestação de Energia (SE) possui interferência eletromagnética, poeira, e em parte do território nacional altas temperaturas. Dessa forma, é mandatório o uso de switches industriais, que não possuem ventilação forçada e que estejam em conformidade com a norma IEC 61850.

2.2 PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA

Ambientes corporativos e de automação não apresentam o mesmo nível de criticidade para o tempo de convergência após uma perda de conexão redundante de rede, em comparação a uma Subestação de Energia (SE). Em sistemas de Proteção, Automação e Controle (PA), as Merging Units (MU) podem transmitir dados de Sample Values (SV) a uma taxa de 4800 frames por segundo para sistemas de 60 Hz. Esta taxa implica que um novo frame de amostras de tensão ou corrente seja enviado a cada 208,33 microssegundos, logo, a base de dados para a reconstrução exata da forma de onda utilizada pelo Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices).

De acordo com a criticidade do IED ao fluxo contínuo de dados, qualquer interrupção de comunicação se torna inadmissível. A perda de apenas dois frames de Sampled Values, por exemplo, representa um intervalo de tempo de 416,66 microssegundos de dados para o IED. Este intervalo é suficiente para que o IED perca o sincronismo e a coerência das informações de medição, portanto, isso compromete a funcionalidade do dispositivo para proteção e o diagnóstico da falta no sistema elétrico. Com isso, é recomendado o uso de protocolos de que garantam um tempo de restabelecimento de rede com taxas inferiores a esses 208,33 microssegundos ou 416,66 microssegundos, de forma que garantam a integridade e o desempenho exigido para a proteção em tempo real.

Ao analisar a necessidade dos tempos de recuperação do tráfego de mensagens em uma Subestação de Energia (SE), pode-se observar a necessidade de tecnologias de redundância de rede mais precisas. Dessa forma, apesar da comunicação entre SCADA para IED ter um tempo de recuperação de cem milissegundos, a comunicação entre dois IEDs é de quatro milissegundos e dados de

Sampled Values às Station Bus e Process Bus é de zero milissegundos, o que evidencia a criticidade dos processos, conforme Figura 11. Essa severidade impõe a utilização de mecanismos na rede de comunicação da Subestação de Energia (SE), dentre eles estão Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP).

Figura 11: Tempo de recuperação de comunicação IEC TC57 WG10

Communicating partners	Communicating partners	Recovery Time
SCADA to IED client-server	station bus	100 ms
IED to IED interlocking	station bus	4 ms
IED to IED reverse blocking	station bus	4 ms
bus bar protection	station bus	0 ms
sampled values	process bus	0 ms

Fonte: KIRRMANN (2010)

2.2.1 STP E RSTP

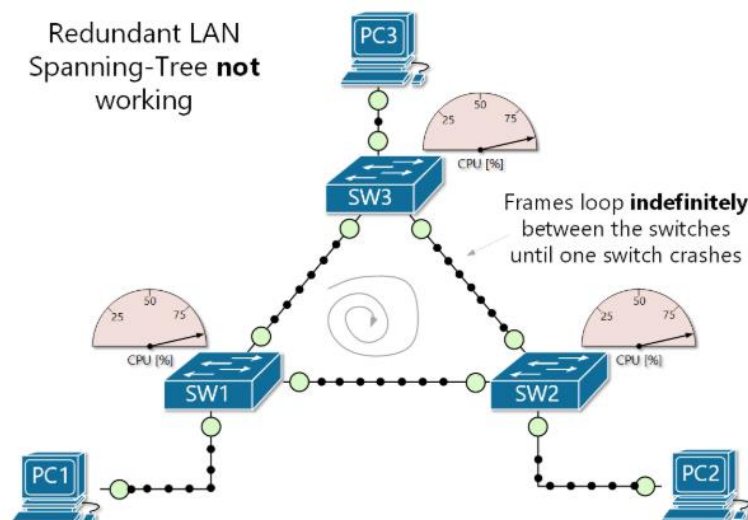
O Protocolo Spanning Tree (STP Spanning Tree Protocol – IEEE 802.1D) foi baseado no algoritmo inventado por Radia Perlman para evitar a formação de loops (múltiplos caminhos entre dois dispositivos numa rede, fazendo com que os dados sejam transmitidos em um ciclo infinito), em redes em 1985. A partir desse algoritmo, o IEEE publicou o 802.1D e o consolidou, com isso, o protocolo foi publicado em 1990 como seu primeiro padrão de redundância para redes locais Ethernet.

O Spanning Tree Protocol (STP) garante que uma Rede de Área Local (Local Area Network - LAN) com links (conexão física ou lógica entre dois nós, dispositivos, na rede) redundantes fiquem em loop por tempo indeterminado, com os frames Ethernet. Dessa forma, com o STP ativo, algumas portas são bloqueadas, impedindo o encaminhamento de frames, conforme (ODOM, 2016, p. 19–33). O STP faz as melhores escolhas para definir quais portas serão bloqueadas, portanto:

- Qualquer dispositivo de uma VLAN (Virtual Local Area Network ou Rede Local Virtual) pode enviar frames para os demais dispositivos da mesma VLAN, porém, o STP não bloqueia outras portas, limitando apenas às conexões redundantes.
- Os frames possuem vida curta e não entram em loop pela rede indefinitivamente.

Em redes sem um protocolo de redundância lógica, os frames seriam indefinidamente enviados pela rede e o processo seria refeito ininterruptamente, conforme a Figura 12. Dessa forma, o processamento dos switches seria elevado a valores próximos a cem por cento, o que causaria muitos loops e quedas constantes em toda a rede, a tornando incomunicável.

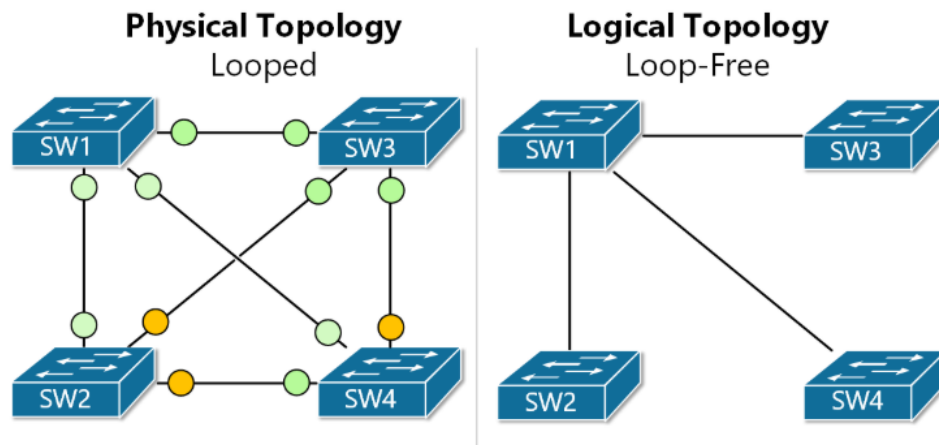
Figura 12: Rede Redundante sem Spanning-Tree



Fonte: CISCO CCNA 200-301 (2025)

O Spanning Tree Protocol (STP), tem como base funções (roles) e estados (states) às bridges e suas portas. Com isso, ele define os caminhos principais lógicos e mantém os links físicos desnecessários em *standby* (estado de espera, disponível para operação imediata), conforme Figura 13. Segundo o Guia oficial de certificação Cisco CCNA (ODOM, 2016, p. 19–33), em uma rede STP, há uma bridge raiz (root bridge), que atua como centro de rota na topologia. Já as outras bridges são definidas como não raiz e auxiliam na construção de um caminho sem loops até essa raiz.

Figura 13: Rede redundante com Spanning-Tree



Fonte: CISCO CCNA 200-301 (2025)

No STP, as portas podem assumir diferentes estados, conforme abaixo:

- **Blocking:** a porta não participa do encaminhamento de quadros e não aprende endereços. Essa porta ouve BPDUs (Bridge Protocol Data Units) para definição de sua função na topologia.
- **Listening:** nesse estado a porta avalia a topologia, ouve e enviando BPDUs, porém, não aprende os endereços e não encaminhar quadros.
- **Learning:** a porta começa a aprender os endereços MAC, mas não envia os dados.
- **Forwarding:** é o estado ativo, onde a porta encaminha quadros e continua aprendendo endereços.
- **Disabled:** a porta administrativamente desativada, sem participação na topologia.

Dessa forma, as funções das portas no STP irão depender de sua posição na rede:

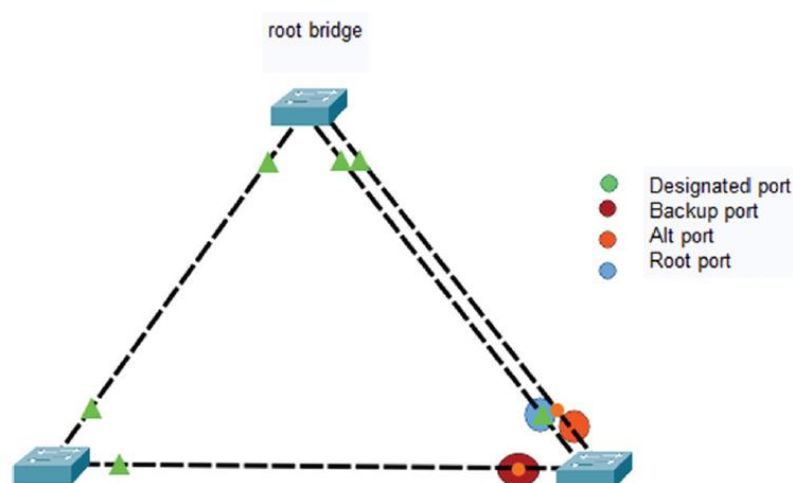
- **Root Port:** é a porta que fornece o melhor caminho (menor custo) até a bridge raiz, presente em todas as bridges que não são a raiz.
- **Designated Port:** é a porta designada para encaminhar quadros em um segmento de rede específico.
- **Non-Designated Port:** permanece em estado de bloqueio (blocking) para evitar loops.

- Disabled Port: não participa da árvore de abrangência, por estar desativada manualmente ou devido a falhas.

A variação do estado blocking para forwarding envolve um intervalo fixo de temporização (como os 15 segundos do forward delay). Isso torna o STP menos responsivo a falhas, mas ainda confiável para eliminar loops em topologias redundantes.

O Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) foi publicado em 2001 pelo IEEE como 802.1w, que fornece um cálculo significativamente mais rápido de caminhos livres de loop, em resposta a uma mudança de topologia. O Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) é um protocolo de redundância de nível dois, que garante redundância de rede ao mesmo tempo que evita a formação de loops na rede, da mesma forma que o Spanning Tree Protocol (STP). O protocolo define as ligações em estado bloqueado e um segmento de rede fica inacessível. Dessa forma, o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) reconfigura a rede e define as ligações bloqueadas, isto acontece automaticamente, com os resultados variando de acordo com os parâmetros definidos.

Figura 14: Estados RSTP



Fonte: ASAAD RASHID (2024)

Para seu funcionamento o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) define as funções e estados, para definir as portas bridge. Conforme a Cisco (CISCO, 2025), em uma rede RSTP, haverá uma “ponte raiz” (root bridge), que define a rota principal

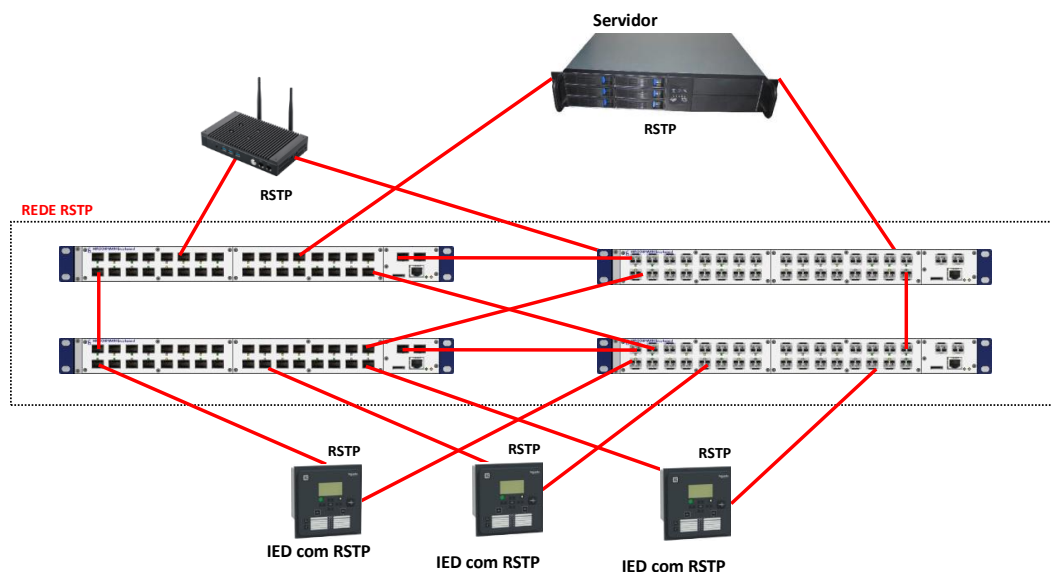
dos frames que trafegam na rede. Todas as bridges trabalham como designadas (designated), auxiliando na comunicação entre os dispositivos. As portas podem assumir os estados:

- Discarding: nesse estado a porta apenas observa o tráfego RSTP, sem encaminhar quadros;
- Learning: a porta aprende os endereços MAC presentes na rede, preparando para encaminhar frames, mas não envia dados;
- Forwarding: a porta está em estado ativo e participa da comunicação e encaminha quadros ao aprender os endereços.

As portas Discarding, Learning e Forwarding terão diferentes funções na rede, de acordo com sua interligação de rede em relação a “ponte raiz” (root bridge):

- Root Port: é o melhor caminho de uma bridge até o bridge principal, raiz;
- Designated Port: a melhor porta para um segmento da LAN;
- Alternate Port: é o caminho alternativo para a root port e assume sua função em caso de falha, ou seja, só atua quando a designated port cai;
- Backup Port: é a porta reserva à designada, utilizada quando há mais de um link entre duas bridges;
- Disabled Port: é uma porta desativada manualmente ou automaticamente, que não participa da topologia ativa.

Figura 15: Rede com RSTP



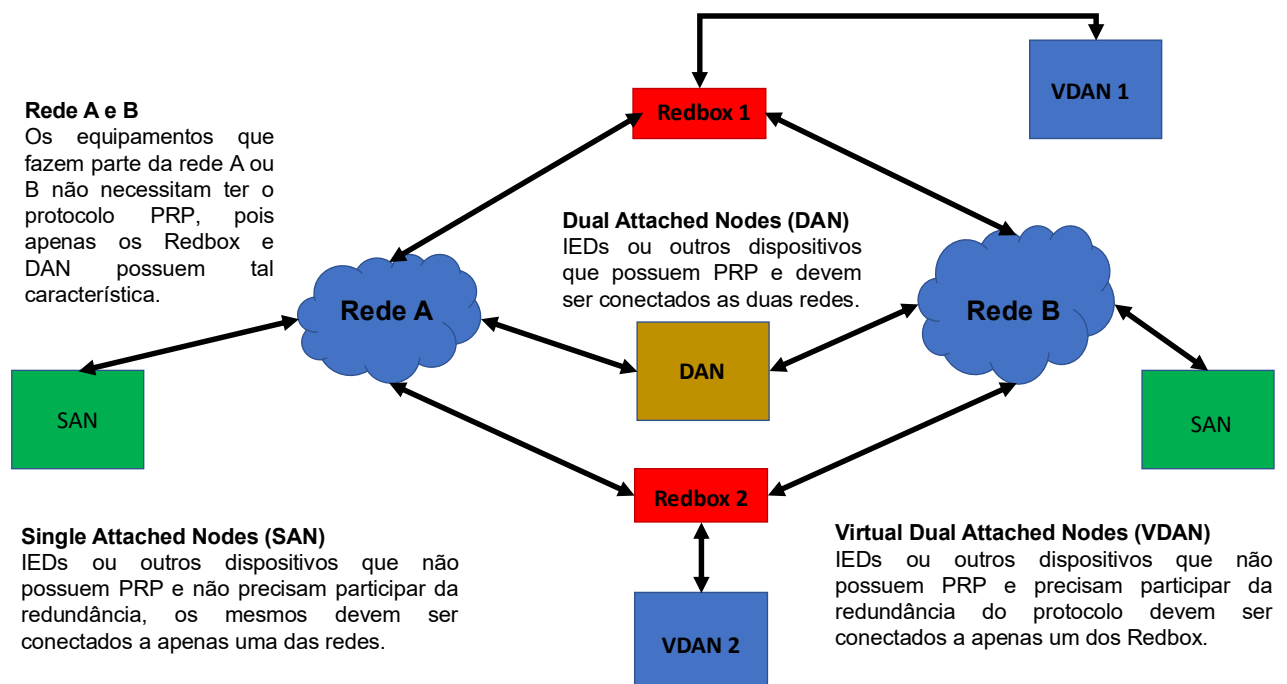
Fonte: Elaboração própria (2025).

Essa organização permite que o RSTP ofereça respostas rápidas a falhas na rede, assegurando continuidade na comunicação com mínima interrupção. Com isso, no Sistema Proteção, Supervisão e Controle (SPSC), a comunicação entre os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) e SCADA, garante múltiplos pontos de conexões redundantes, garantindo disponibilidade na rede. Porém, no funcionamento da redundância o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) o tempo de convergência pode levar até dois segundos para reestabelecer um link perdido, enquanto o Spanning Tree Protocol (STP) o tempo de convergência pode levar até quinze segundos (ODOM, 2016).

2.2.2 PRP

O Parallel Redundancy Protocol (PRP) é um protocolo de redundância de rede, que consiste na conexão dos dispositivos a duas redes paralelas, com interfaces de Ethernet duplas. Os dispositivos conectados entre essas redes paralelas não precisam ter esse mecanismo de redundância, considerando que eles estejam integrados ou na Rede A ou na Rede B, conforme Figura 16.

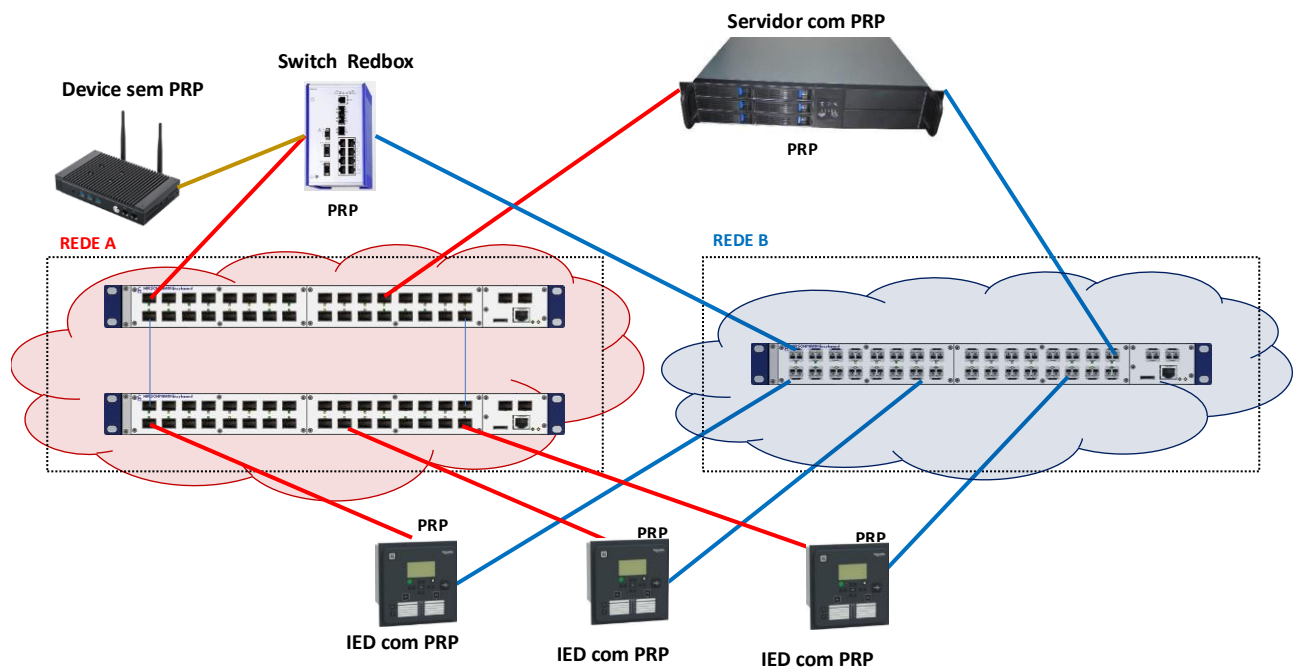
Figura 16: Características intrínsecas do PRP



Fonte: Elaboração própria (2025).

Porém todos dispositivos que se conectam nas redes A e B, devem possuir essa redundância nativa no equipamento físico, pois, não se trata de uma tecnologia de *software* e sim de *hardware* (STEFANKA, 2020). O Parallel Redundancy Protocol (PRP) é um dos protocolos padronizados pela norma IEC 62439, que passou a ser utilizado na segunda edição da IEC 61850 como padrão. Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices), servidores e demais equipamentos com esse mecanismo de redundância de rede, enviam frames duplicados simultaneamente às redes A e B, conforme figura 17. O equipamento com essa tecnologia é conhecido como Dual Attached Nodes (DAN), que é um nó de rede com duas interfaces de rede que permitem a conexão às duas redes segregadas. Com isso, o dispositivo destinatário do pacote que também possua Parallel Redundancy Protocol (PRP) receberá ambos os *frames*, que possuem sufixos PRP distintos. Porém, a porta de rede que recebe essas mensagens duplicadas descarta o segundo *frame* a chegar em suas portas.

Figura 17: Rede com PRP



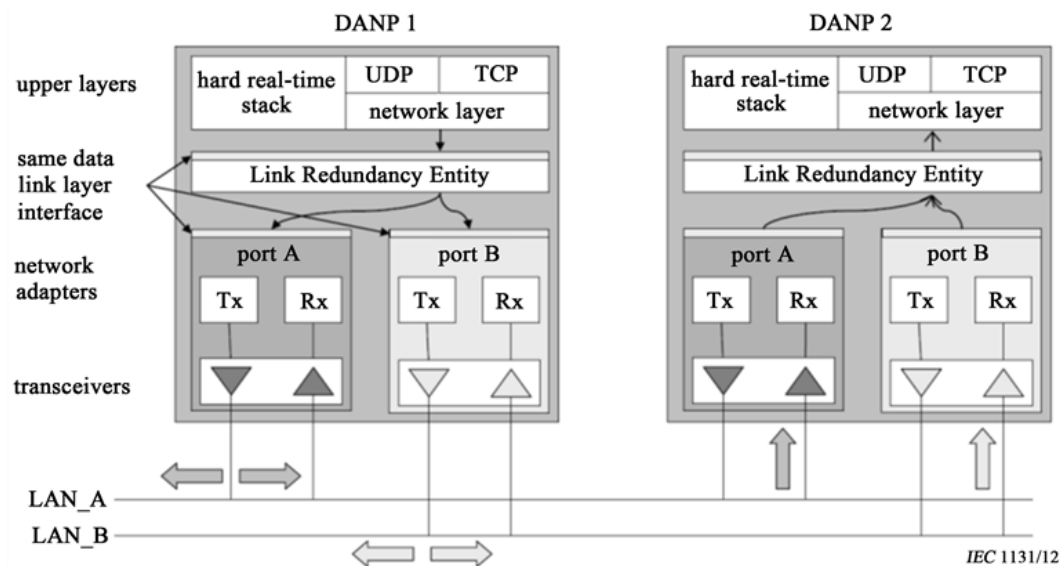
Fonte: Elaboração própria (2025).

Diferentemente dos demais protocolos de redundância como o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), que mantêm uma ou mais portas redundantes desabilitadas

eletronicamente, através de mecanismos de rede, o Parallel Redundancy Protocol (PRP) tem sua mudança de rota principal imperceptível. Isso ocorre, pois, mesmo se uma das redes ou conexões falhar, o pacote chegará para o destinatário e a comunicação permanecerá ininterrupta. Essa é uma característica popularmente conhecida como “zero recovery time”, ou seja, tempo nulo de recuperação de rede redundante.

O Parallel Redundancy Protocol (PRP) adiciona uma subcamada acima da camada MAC, conhecida como Link Redundancy Entity (LRE). Dessa forma, é feita a interface entre a camada de rede (camada 3) e a camada de enlace (camada 2) do modelo OSI. Esse procedimento de alteração do frame é feito através da inserção de um campo Redundancy Check Trailer (RTC), por meio do LRE que duplica cada cópia e envia pelas duas portas físicas do dispositivo designadas para cada uma das redes. Esse Redundancy Check Trailer (RTC) utiliza sufixos para identificação de pacote de Rede A e B, garantido a comunicação contínua e sem perda de pacotes, conforme representado na Figura 18.

Figura 18: Comunicação PRP com dois DANPs.



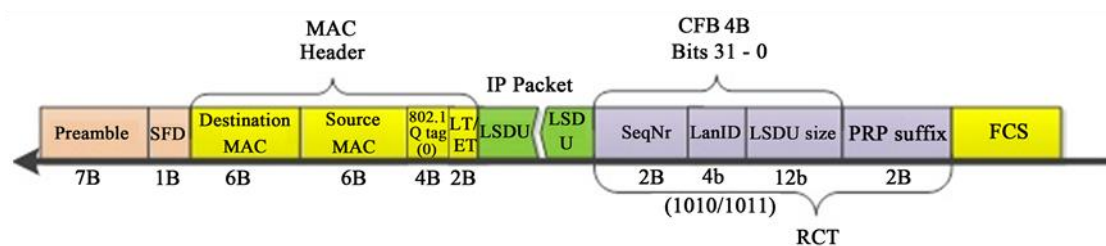
Fonte: STEFANKA (2020)

Na recepção do frame duplicado o receptor do LRE é verificado o endereço MAC de origem e o número RCT. Com isso, o LRE opera de dois modos para tratamento dos quadros:

- modo duplicate accept, as duas cópias são entregues e a aplicação, nas camadas superiores, descartará o quadro redundante;
- modo duplicate discard, apenas o primeiro quadro recebido será enviado e o segundo descartado.

Dessa forma, para não sobrecarregar o processamento dos dispositivos Dual Attached Nodes (DAN), os modos duplicate accept e duplicate discard são implementados em hardware dedicado. Geralmente, nos switches industriais, o dispositivo possui duas portas específicas que possuem essa redundância com processamento dedicado, para operação de envio dos *frames* duplicados para as portas da Rede A e B separadamente. Com isso, a comunicação do protocolo PRP se torna mais determinística.

Figura 19: Frame PRP estendido por RCT.



Fonte: STEFANKA (2020)

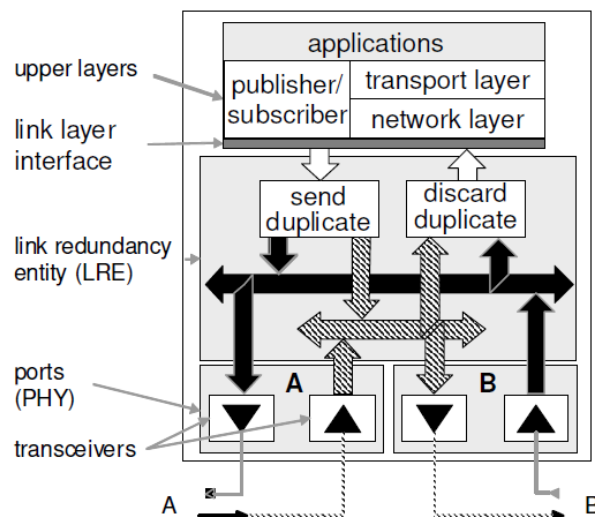
Dessa forma, quando a comunicação passa por um roteador o frame perde o endereço MAC de origem que é substituído pelo MAC do roteador ou switch de camada 3. Com isso, quando o frame volta à rede destinada o MAC de origem já não é o do dispositivo que enviou a mensagem e sim do roteador ou switch de camada 3. Portanto, esse protocolo, geralmente, será utilizado na comunicação dentro da Subestação de Energia (SE) entre os equipamentos do Barramento de Processo, para dispositivos a Nível de Bay e a Nível de Processo ou nos demais níveis em trechos onde não haja roteamento.

2.2.3 HSR

O High-availability Seamless Redundancy (HSR) é um protocolo de redundância de rede projetado para topologias em Anel e aplica o princípio do *Parallel Redundancy Protocol* (PRP) nesse anel. Em seu funcionamento o High-availability Seamless Redundancy (HSR) envia os frames duplicados em direções opostas do anel, com

Analogamente ao PRP o High-availability Seamless Redundancy (HSR) possui o Link Redundancy Entity (LRE), que duplica e envia os frames simultaneamente em ambas portas e também descarta a segunda cópia de um frame que chega no dispositivo. Além disso, o dispositivo que atua como origem do envio do frame, adiciona uma Tag HSR, a qual identifica a redundância do Link Redundancy Entity (LRE) para camadas superiores. Quando o destinatário recebe um frame o Link Redundancy Entity (LRE) recebe as duas cópias e encaminha apenas a que chegou primeiro e descarta a segunda. Com isso, os IEDs ou switches, com o mecanismo de redundância, evitam a criação de loops, garantindo a comunicação ininterrupta.

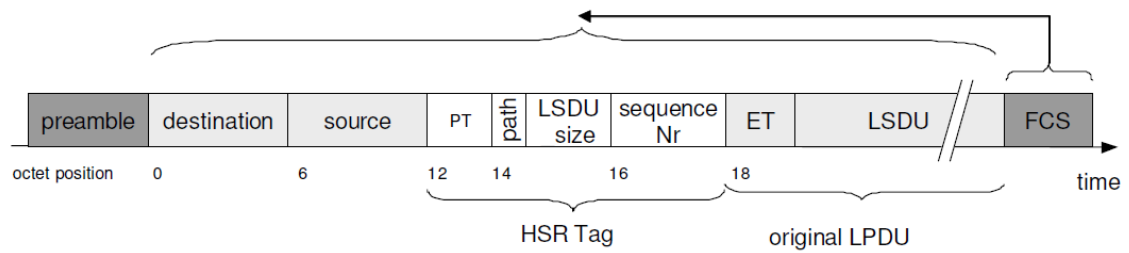
Figura 21: Estrutura do nó HSR



Fonte: KIRRMANN (2009)

Os frames HSR possuem o formato representado na Figura 22, os quais possuem os elementos abaixo:

- PT (Protocol Type): campo utilizado para identificação do protocolo, tem o valor 0x88FB reservado para o HSR;
- Path: aponta qual caminho o frame percorreu, para diagnósticos;
- LSDU Size: define o tamanho da unidade de dados de serviço do link;
- Sequence Number: é o número adicionado a cada frame enviado pela origem, responsável por detectar e eliminar duplicações.

Figura 22: Formato do frame HSR

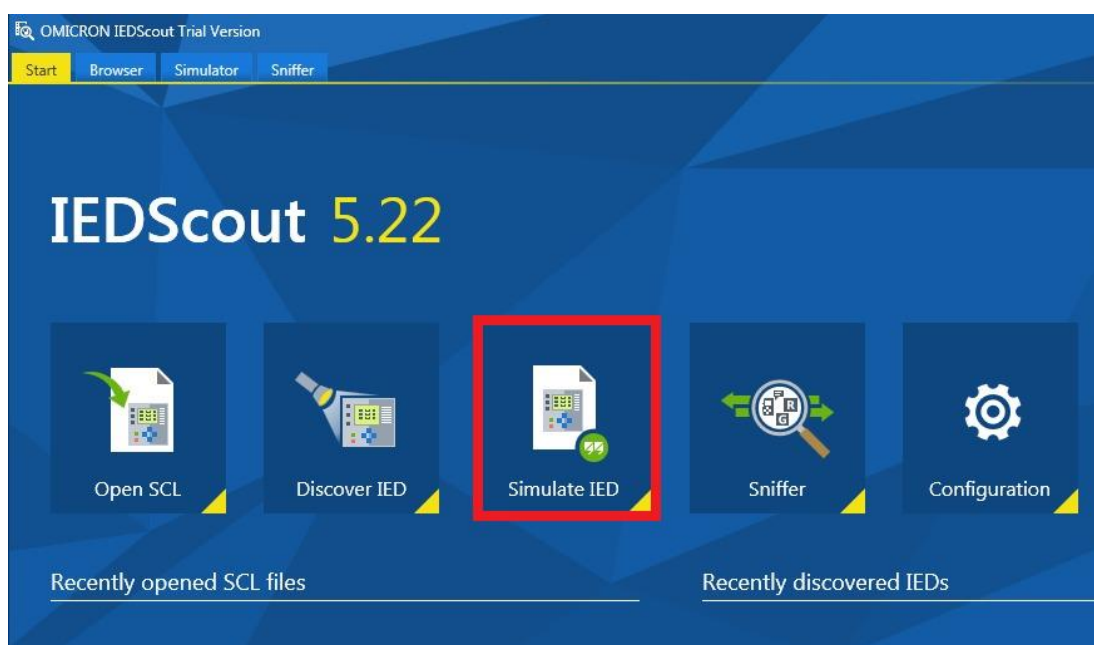
Fonte: KIRRMANN (2009)

Além disso, dispositivos como IEDs e Merging Units, que não possuem o High-availability Seamless Redundancy (HSR) em suas placas de rede, podem utilizar switches RedBoxes (Redundancy Boxes), para acesso aos dados dos demais dispositivos inseridos em uma topologia em anel com a redundância. Dessa forma, o High-availability Seamless Redundancy (HSR) disponibiliza uma redundância com tempo de recuperação nulo, para restabelecimento de links, o qual, é indicado para sistemas críticos de Subestações de Energia (SE).

3 TESTES PRÁTICOS

O estudo das funcionalidades foi desenvolvido em uma plataforma de teste de laboratório. Foram realizadas avaliações do comportamento e funcionalidade dos protocolos de redundância com computadores e switches industriais. Por meio da simulação dos cenários de redes de dados, equivalentes ao de uma Subestação de Energia (SE), foi criado um ambiente de testes para monitorar a latência e convergência de rede.

Figura 23: Software IEDScout interface de simulação de IED



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para simular o comportamento de dois Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) foi utilizado o software de simulação IEDScout da Omicron instalado em dois computadores, conforme Figura 23. Para análise dos tempos de comunicação foi utilizado o software Wireshark. De acordo com os protocolos de redundância disponíveis nos dispositivos da Subestação de Energia (SE), podemos utilizar diferentes arquiteturas de rede. Porém, como as placas de rede dos computadores convencionais não possuem a tecnologia das redundâncias abordadas neste trabalho, as configurações de redundância foram desenvolvidas apenas nos switches industriais.

3.1 AMBIENTE DE TESTES

A realização dos testes foi feita por meio de dois computadores com 8 GB RAM, 256 GB de armazenamento via SSD e processador Intel Core i5 de nona geração. Os softwares para simulação e análise de rede foram instalados nesses computadores, bem como o software de simulação de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs – Intelligent Electronic Devices).

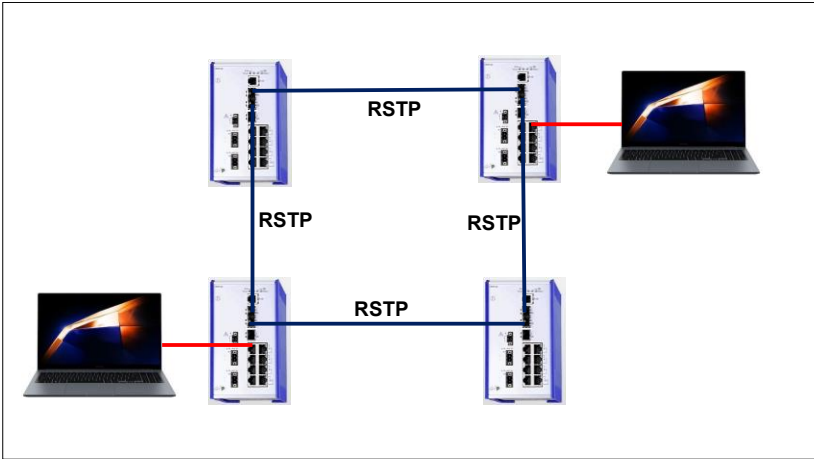
Figura 24: Foto da rede de switches Hirschmann



Fonte: Elaboração própria (2025).

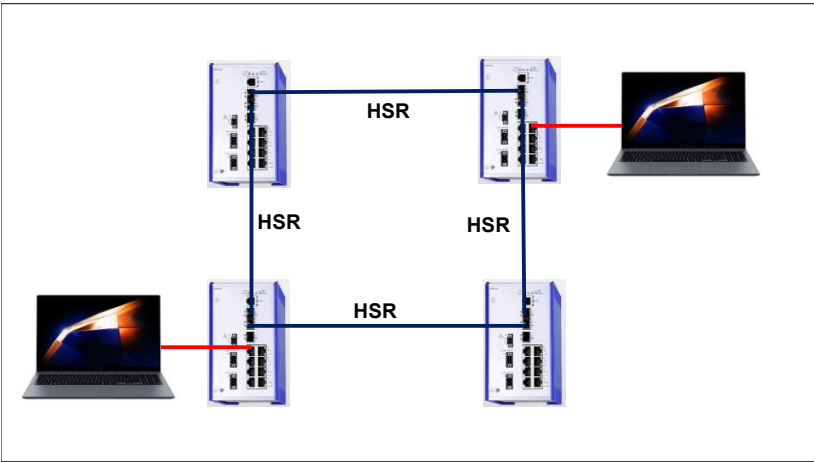
O objetivo do uso dos computadores foi enviar frames com protocolo Goose, da maneira equivalente ao que ocorre em uma rede de automação de uma Subestação de Energia (SE). As conexões entre os computadores foram feitas por quatro switches gerenciáveis de camada 2 (modelo OSI) com capacidades de configuração das três redundâncias estudadas. O modelo de switch utilizado foi o RSP35-08033O6ZT-SK9V9HHE2A09.0.10 do fabricante Hirschmann. O switch possui três portas Uplink slot SFP com comunicação em Fast Ethernet (100 Mbps) e Gigabit Ethernet (1000 Mbps), somado a oito portas RJ-45 em Fast Ethernet (100 Mbps), conforme Figura 24. Os switches foram ligados em anel para os testes das redundâncias de rede com Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), representado na Figura 25 e High Availability Seamless Redundancy (HSR), representado na Figura 26. E os switches foram ligados por uma rede paralela à redundância Parallel Redundancy Protocol (PRP), conforme Figura 27.

Figura 25: Arquitetura de rede com RSTP



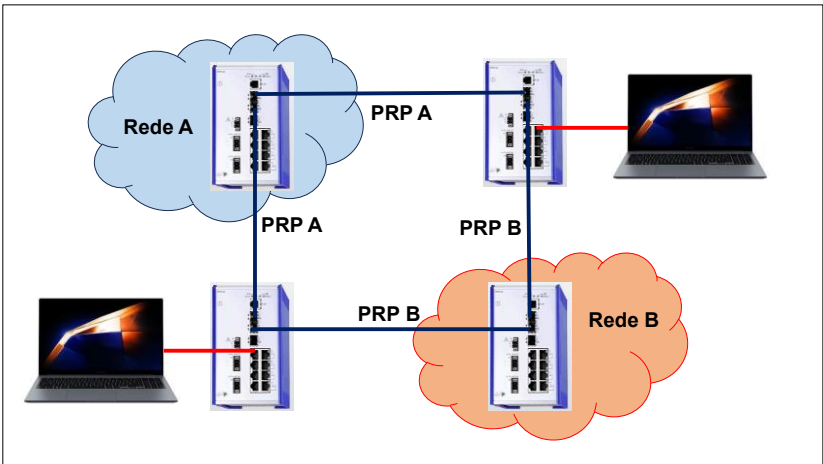
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 26: Arquitetura de rede com HSR



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 27: Arquitetura de rede com PRP



Fonte: Elaboração própria (2025).

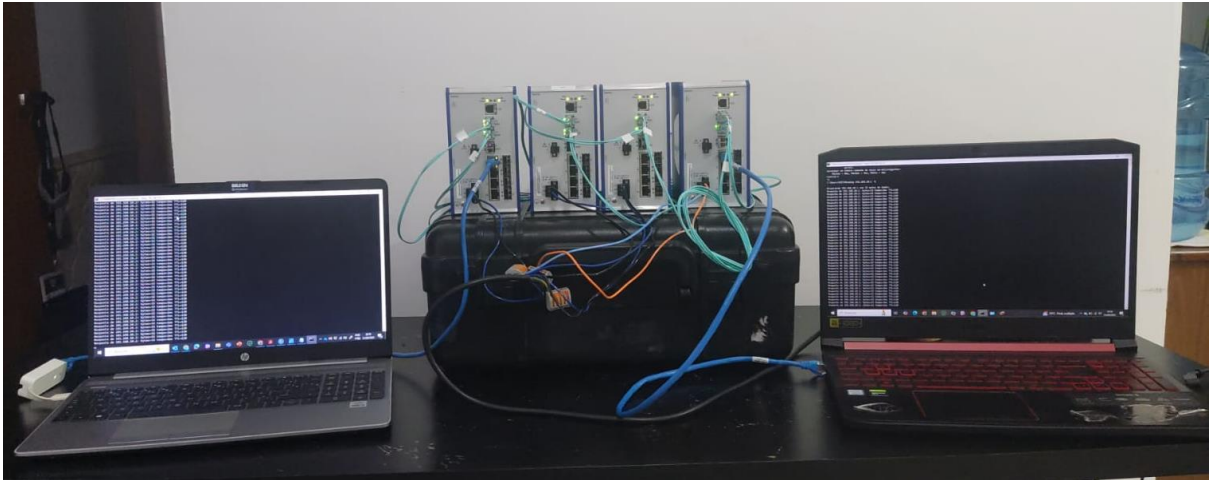
Além disso, um computador foi ligado na porta seis do switch 1 e o outro na porta seis do switch 4. Com a interligação, os equipamentos foram configurados com a mesma faixa de endereçamento IP de rede. Um terceiro computador foi ligado na porta dez do switch 4 e foi feito o espelhamento das portas um, dois e quatro do switch 4, para captura de frames da comunicação entre switches e comunicação entre computadores, através do software Wireshark. Na topologia todos protocolos de redundância têm as mesmas ligações físicas, porém, logicamente cada redundância tem seu comportamento intrínseco, de acordo com as informações do Tópico 2.4.

Figura 28: Transceptor óptico



Fonte: Elaboração própria (2025).

As portas que suportam todos os protocolos de redundâncias são apenas as portas um e dois dos switches, que são portas slot SFP. Portanto, foram utilizados transceptores de fibra óptica multimodo em Fast Ethernet nas portas slot SFP dos switches, conforme a Figura 28. Para interconexão dessas portas ópticas foram usados cabos de fibra óptica do tipo OM4, que podem ser utilizados tanto para fibra óptica em Fast Ethernet (100 Mbps) como em Gigabit Ethernet (1000 Mbps). O computador foi utilizado simulando os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) por meio da comunicação de frames com protocolo GOOSE. Isso os tornou aptos à disponibilização de dados, como se estivessem lendo medidas status e eventos dos equipamentos de campo de uma Subestação de Energia (SE). Com isso, os equipamentos simulados poderiam interagir com Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) reais, para validação da interoperabilidade de equipamentos. Por meio do IEDScout foi possível configurar e modificar os dados dos dispositivos simulados e analisar as respostas da rede no sistema de automação.

Figura 29: Plataforma de teste

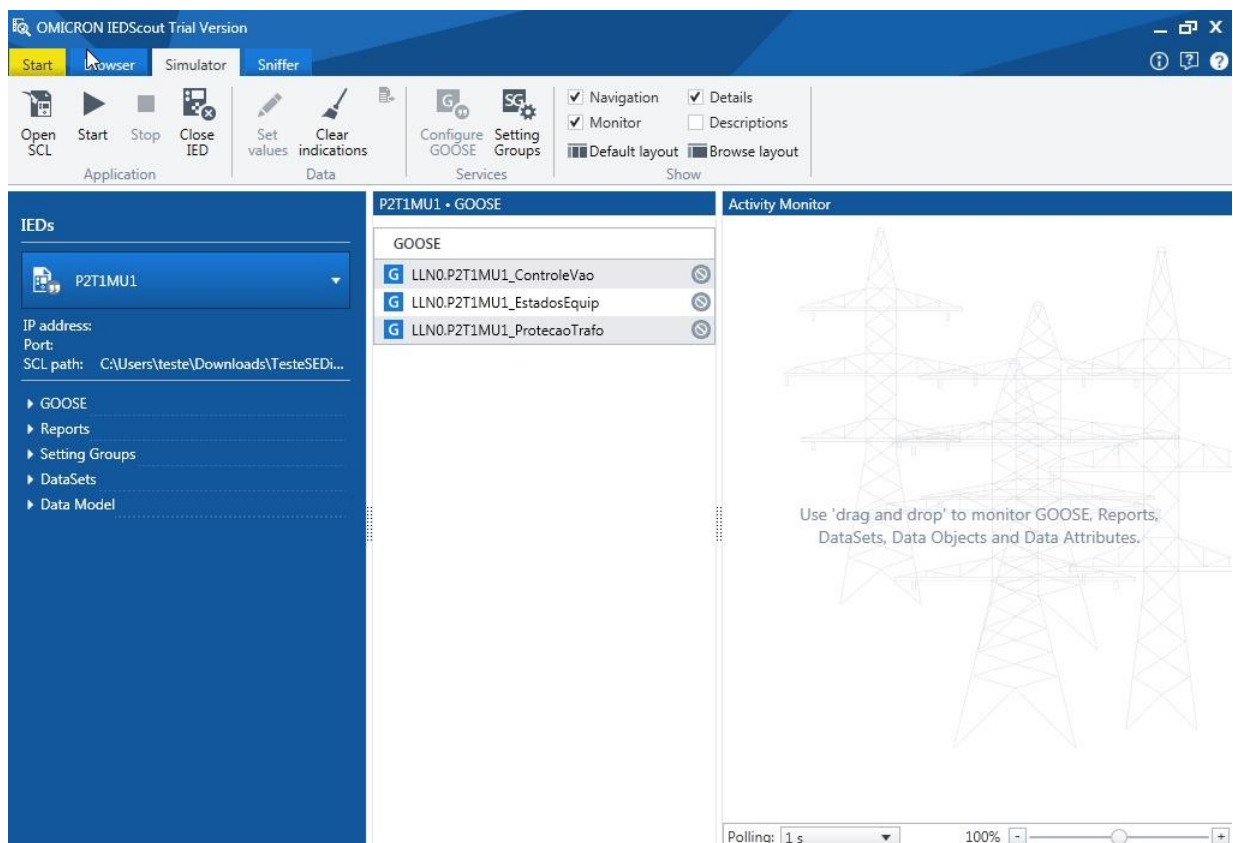
Fonte: Elaboração própria (2025).

O software Wireshark foi utilizado para captura e análise do tráfego da rede e oferece alta confiabilidade na captura e inspeção detalhada de *frames*, tornando possível analisar os tempos de envio e recebimentos de frames entre switch e computador. Também foi feito o monitorando dos frames que foram enviados de um computador ao outro, por meio desse software. Esse procedimento foi realizado através do espelhamento de portas do switch com a configuração Port Mirroring. Com isso, foi possível filtrar e identificar a comunicação e captura dos dados de GOOSE, por meio dos IPs, portas e diferença de tempo de envio dos frames. Dessa forma, pode-se identificar atraso ou perdas de pacotes, portanto, através dessa ferramenta pode-se verificar a atuação de cada protocolo de redundância e certificar o comportamento da rede. A plataforma de testes completa utilizou a mesma estrutura para os ensaiar as três redundâncias, conforme a Figura 29.

3.2 PROCEDIMENTO DE TESTES

Inicialmente foi realizada a instalação do software IEDScout utilizada a funcionalidade “Simulate IED”. Com isso, foi possível utilizar os computadores para operarem como Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices), na plataforma de testes.

Figura 30: Simulação de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes



Fonte: Elaboração própria (2025).

Após acessar o software IEDScout foi carregado um arquivo SCD de uma subestação real de 230 kV do SIN e selecionado uma MU do lado de alta de um transformador de potência para simulação, conforme Figura 30. Nas configurações do equipamento foram definidas as variáveis de Controle de vão, Estado do equipamento e Proteção do Trafo, das mensagens GOOSE. Dessa forma, ao iniciar o funcionamento do dispositivo simulado, ele compartilha seus dados via GOOSE na rede. Em um segundo computador, para captura dos dados de forma constante, utilizou-se um segundo Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) simulado. No segundo computador utilizou-se a função “Discover

IED” para identificação do IED simulado na rede e validação das condições das variáveis.

Além disso, foi aplicada a configuração “Subscribe” no IEDScout, para assinar as mensagens GOOSE do computador simulado. Com isso, o computador Subscriber passou a atuar como receptor das mensagens publicadas do outro computador, com um modelo de Publisher/Subscriber. Assim, o computador assinante monitora as mensagens GOOSE transmitidas e atualiza internamente as variáveis correspondentes e permite uma resposta imediata em casos de eventos críticos.

Figura 31: Comparação de Frame

No.	Time	Source	Destination	Protoc	Leng	Info
693	13.5134	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:46,067044
694	13.5143	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:19	GOOSE	199	17:06:46,067986
701	13.5994	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:10	GOOSE	181	17:06:46,153119
780	14.0142	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:46,567849
782	14.0149	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:19	GOOSE	199	17:06:46,568582
912	14.5145	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:47,068163
913	14.5155	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:19	GOOSE	199	17:06:47,069288
946	14.6003	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:10	GOOSE	181	17:06:47,153965
1101	15.0149	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:47,568571
1102	15.0157	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:19	GOOSE	199	17:06:47,569397
1190	15.5160	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:19	GOOSE	199	17:06:48,069641
1191	15.5161	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:48,069759
1212	15.6010	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:10	GOOSE	181	17:06:48,154647
1279	16.0164	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:48,570070

No.	Time	Source	Destination	Protoc	Leng	Info
1414	21.2591	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:46	GOOSE	358	17:06:47,548072
1455	21.5212	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:4f	GOOSE	176	17:06:47,810172
1464	21.6057	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:18	GOOSE	361	17:06:47,894694
1465	21.6107	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	183	17:06:47,899683
1466	21.6110	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:19	GOOSE	203	17:06:47,900065
1474	21.6584	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:4e	GOOSE	239	17:06:47,947418
1523	22.0221	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:4f	GOOSE	176	17:06:48,311150
1530	22.1060	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:18	GOOSE	361	17:06:48,395047
1532	22.1111	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:19	GOOSE	203	17:06:48,400125
1533	22.1112	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	183	17:06:48,400233
1541	22.1587	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:4e	GOOSE	239	17:06:48,447692
1550	22.1955	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:10	GOOSE	185	17:06:48,484512
1554	22.2596	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:46	GOOSE	358	17:06:48,548500
1587	22.5230	ASUSTekCOMPU_c8:75:88	IecTc57_01:20:4f	GOOSE	176	17:06:48,812008

Fonte: Elaboração própria (2025).

Com a leitura das variáveis de um dispositivo no outro, iniciou-se a captura das mensagens das portas do switch por meio do software Wireshark, para analisar as portas um e dois da redundância do switch e a porta seis, utilizada para conexão entre computador que publicava os frames e o switch. Além disso, para avaliar a latência entre o envio e recebimento dos frames, foi utilizado o Wireshark no computador Subscriber. Com isso, através da identificação do intervalo de saída de um computador e recebimento no outro foi possível analisar os tempos de comunicação, conforme Figura 31. Além disso, à análise da comunicação, foram filtradas apenas os frames GOOSE e analisados de acordo com:

- Tamanho do frame (length);
- Origem do frame (Source);
- Destino do frame (Destination);
- O horário em que a mensagem GOOSE foi gerada, de acordo com o tempo em goosePdu.

A partir da comparação das variáveis acima, a análise dos tempos de envio e recepção dos frames pode ser verificada e analisada, conforme Figura 32. Dessa forma, na ocorrência de perda de frames ou uma maior latência entre envio e recebimento dessas mensagens pode-se analisar o desempenho de cada protocolo de redundância. Com as informações específicas dos frames, foi possível verificar a latência da comunicação, desconsiderando-se os pacotes duplicados, devido ao espelhamento de portas. Para tratar os dados aplicou-se um filtro e foram gerados arquivos em bloco de notas, para comparação dos frames compatíveis.

Figura 32: Frame enviado e recebido

No.	Time	Source	Destination	Protoc	Leng	Info
313	11.0099	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:43,563621
316	11.0121	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	199	17:06:43,565779
384	11.5114	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:44,065056
385	11.5124	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	199	17:06:44,066085
393	11.5980	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	181	17:06:44,151718
454	12.0118	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:44,565444
455	12.0129	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	199	17:06:44,566592
564	12.5121	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:45,065746
566	12.5132	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	199	17:06:45,066893
586	12.5984	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	181	17:06:45,152087
669	13.0125	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:45,566138
670	13.0136	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	199	17:06:45,567240
693	13.5134	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:46,067944
694	13.5143	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	199	17:06:46,067986

No.	Time	Source	Destination	Protoc	Leng	Info
1409	5.951295	192.168.10.200	192.168.10.100	COTP	1082	17:06:46,022156
1410	5.951295	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	1086	17:06:46,022156
1411	5.994087	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	60	17:06:46,064948
1412	5.994087	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	64	17:06:46,064948
1413	5.994087	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	521	17:06:46,064948
1414	5.994087	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	525	17:06:46,064948
1415	6.004884	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	361	17:06:46,075745
1416	6.007786	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	213	17:06:46,078647
1417	6.007786	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	217	17:06:46,078647
1418	6.008815	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	284	17:06:46,079676
1419	6.008815	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	288	17:06:46,079676
1420	6.008815	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	179	17:06:46,079676
1421	6.008815	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	183	17:06:46,079676
1422	6.008815	ASUSTekCOMPU_c8	IecTc57_01:20:1a	GOOSE	183	17:06:46,079676

Fonte: Elaboração própria (2025).

Dessa forma, com referência dos frames GOOSE que saiam do computador que publicava seus estados de variáveis foi verificado o que chegava na porta do computador leitor das variáveis. Portanto, foram verificados e analisados cinquenta pacotes que saiam do computador *Publisher* GOOSE e verificado o instante em que o frame saia da porta do switch para o segundo computador *Subscriber* GOOSE.

4 RESULTADOS

Para cálculo da latência e identificação do comportamento dinâmico da rede com uso dos protocolos de redundância exigiram a utilização do software Wireshark. Essa ferramenta foi utilizada na plataforma de teste para detecção e captura de frames que trafegaram na rede. Em cada um dos três protocolos de redundância, Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP), foi determinado o tempo de convergência e analisado o comportamento da comunicação GOOSE, por meio da perda de comunicação do link ao retirar o cabo principal de comunicação do switch entre os dois cabos redundantes.

Ao configurar o intervalo de envio mínimo em 200 milissegundos na comunicação no software IEDScout, o intervalo de envio de frames GOOSE capturados pelo Wireshark, teve uma média de 211 milissegundos, com valor máximo de 500 milissegundos. Essa limitação para o intervalo de envio de frames restringiu a execução dos ensaios, com isso, esse intervalo impediu a geração de perda de frames, e consequentemente, inviabilizou a geração de latências maiores durante o instante exato da falha. Para um dispositivo de campo real o intervalo de tempo durante a ocorrência da mudança de estado, os frames GOOSE são retransmitidos em intervalos curtos podendo começar em 4 milissegundos, mas caso não ocorra um evento os dados são enviados periodicamente a cada 1 segundo (Silva, 2021).

A perda de frames GOOSE não ocorreu, pois, funcionalidades do switch como Store and Forward, garantiram o tráfego de maneira ordenada. Porém, caso fosse possível gerar frames com essas mensagens em um intervalo de tempo menor seria possível gerar propositalmente perda de frames e maior latência na convergência da rede com a redundância Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP). Além disso, outro motivo para o switch não descartar os frames se deve a condição de baixo volume de tráfego, o que impossibilitou sobrecarga no equipamento. Ainda assim, pode-se analisar o comportamento de cada protocolo medindo o tempo de reestabelecimento de rede. Dessa forma, a análise dos tempos de recomposição de rede foi verificada com referência ao instante em que ocorreu a queda do link principal para o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP). Já às redundâncias High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP) foram verificados os frames que chegam primeiro, que passam a ser os da porta alternativa com uma

pequena diferença de tempo de latência. Assim, foi possível identificar o comportamento dos protocolos de redundância durante a convergência entre o enlace principal e o enlace redundante, permitindo determinar de forma precisa os intervalos de indisponibilidade, por meio da análise dos arquivos do software Wireshark.

4.1 RESULTADOS DOS TESTES

Os tempos de convergência foram verificados com a análise de tempo de restabelecimento de rede para cada um dos protocolos de redundância. O primeiro protocolo de redundância analisado foi o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP). A análise foi feita a partir de cinquenta frames GOOSE enviados e recebidos entre o momento que se iniciou a captura de frames e o instante em que o link principal da rede foi retirado. Após a desconexão física do cabo da Root Port, pôde-se observar que o switch passou a enviar o tráfego pela Alternated Port, essa alteração pode ser observada no frame 1400, conforme Figura 33, por meio do protocolo Extensible Authentication Protocol (EAP), também conhecido como Extensible Authentication Protocol over LAN (EAPOL).

O protocolo Extensible Authentication Protocol (EAP) é o mecanismo de redes Ethernet responsável pela autenticação baseada em IEEE 802.1X. Apesar de não fazer parte do funcionamento do Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), sua transmissão ocorre quando o switch tem uma transição de estado de rede em uma porta que se torna ativa. Dessa forma, quando a Root Port foi fisicamente desligada, por protocolo a Alternated Port foi ligada, com isso, por conta de haver uma nova rota anteriormente desabilitada, foi gerado o frame Extensible Authentication Protocol (EAP), conforme Figura 33. Ele ocorreu no instante em que a porta Alternated Port se tornou a porta Forwarding na convergência da rede. Com isso, a emissão do frame EAP evidencia a perda do enlace principal, pois ocorre sistematicamente quando é redefinida a rota dos frames STP.

Figura 33: Frame Extensible Authentication Protocol (EAP)

1396	5.626390	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	443	17:06:45,697251
1397	5.626390	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	447	17:06:45,697251
1398	5.645391	HirschmannAu_7e...	Nearest-Custome...	STP	60	17:06:45,716252
1399	5.658163	HirschmannAu_7e...	Nearest-Custome...	STP	60	17:06:45,729024
1400	5.668582	HirschmannAu_7e...	Nearest-non-TPM...	EAP	60	17:06:45,739443
1401	5.841510	HirschmannAu_7e...	Nearest-Custome...	STP	60	17:06:45,812371

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os valores de latência foram obtidos a partir de cinquenta frames equivalentes entre a captura de frames do Wireshark simulando o Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) no computador 1, e o arquivo de captura do Wireshark espelhando a porta do switch. No Apêndice A estão as cinquenta amostras de frames GOOSE que saíram do computador 1 e chegaram na porta de saída do switch para o computador 2. Dez das cinquenta medidas são apresentadas na Tabela 1. Os tempos analisados estão em torno de treze milissegundos, com isso, a proximidade dos valores de amostra demonstra como o tráfego de frames GOOSE é replicável e sem oscilações significativas. Além disso, com os valores de latência analisados, foram verificados os tempos mínimo, médio e máximo e desvio padrão, conforme Tabela 2.

Tabela 1: Intervalo de tempo RSTP

PC2 Frame	PC2 Time (s,ms)	Switch Frame	Switch Time (s,ms)	Length	Latência (ms)
42	40,06133	2	40,07438	179	13,052
43	40,06141	5	40,07438	199	12,975
44	40,15017	9	40,16322	181	13,056
45	40,56155	21	40,57503	179	13,474
46	40,56177	24	40,57503	199	13,251
47	41,06223	34	41,07527	199	13,037
48	41,06223	37	41,07527	179	13,037
49	41,15051	41	41,16389	181	13,379
50	41,56284	49	41,57582	199	12,982
51	41,56284	52	41,57582	179	12,982

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 2: Tempos mínimo, médio, máximo e desvio padrão com RSTP

Tempo Mínimo (ms)	Tempo Médio (ms)	Tempo Máximo (ms)	Desvio Padrão (ms)
12,615	13,261	13,518	0,221

Fonte: Elaboração própria (2025).

Dessa forma, foi possível verificar se antes, durante e depois do instante de falha se a rede permaneceu funcional com o acionamento do mecanismo de redundância do switch. Portanto, com a baixa variação entre tempo mínimo, máximo

e desvio padrão, pode-se concluir que apesar da perda de alguns pacotes, apenas frames enviados no instante de convergência de portas seriam afetados e frames enviados antes e depois não teriam interferência na confiabilidade da rede.

Figura 34: Frames convergência de rede RSTP

1404	5.929838	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	846	17:06:46,000699
1403	5.929838	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	842	17:06:46,000699
1402	5.920242	ASUSTekCOMPU_c8...	IecTc57_01:20:4f	GOOSE	176	17:06:45,991103
1401	5.841510	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	17:06:45,912371
1400	5.668582	HirschmannAu_7e...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	17:06:45,739443
1399	5.658163	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	17:06:45,729024
1398	5.645391	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	17:06:45,716252
1397	5.626390	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	447	17:06:45,697251
1396	5.626390	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	443	17:06:45,697251
1395	5.622309	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	846	17:06:45,693170
1394	5.622309	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	842	17:06:45,693170
1393	5.615549	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	397	17:06:45,686410
1392	5.615549	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	393	17:06:45,686410
1391	5.608940	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	548	17:06:45,679801
1390	5.608940	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	544	17:06:45,679801
1389	5.607715	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	331	17:06:45,678576
1388	5.607715	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	327	17:06:45,678576
1387	5.602241	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	403	17:06:45,673102
1386	5.602241	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	399	17:06:45,673102
1385	5.600664	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	413	17:06:45,671525
1384	5.600664	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	409	17:06:45,671525
1383	5.595602	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	825	17:06:45,666463
1382	5.595602	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	821	17:06:45,666463
1381	5.594317	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	331	17:06:45,665178
1380	5.594317	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	327	17:06:45,665178
1379	5.590323	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	457	17:06:45,661184
1378	5.590323	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	453	17:06:45,661184
1377	5.581981	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	383	17:06:45,652842
1376	5.581981	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	379	17:06:45,652842
1375	5.576048	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	439	17:06:45,646909
1374	5.576048	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	435	17:06:45,646909
1373	5.574766	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	331	17:06:45,645627
1372	5.574766	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	327	17:06:45,645627
1371	5.557328	ASUSTekCOMPU_c8...	IecTc57_01:20:4e	GOOSE	239	17:06:45,628189
1370	5.555397	192.168.10.200	192.168.10.100	TCP	1317	17:06:45,626258

Fonte: Elaboração própria (2025).

Além disso, foi identificado que o último frame GOOSE transmitido antes da interrupção do link ocorreu às 17:06:45,628189, enquanto o primeiro pacote após a convergência foi registrado às 17:06:45,991103. A diferença entre esses instantes resultou em 0,362914 segundos (aproximadamente 362 milissegundos), conforme Figura 34. Esse tempo representa o intervalo total em que a rede permaneceu sem transmissão efetiva de mensagens GOOSE devido à atuação do Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP). Esse intervalo de tempo de indisponibilidade de rede demonstra a

coerência com o comportamento característico do protocolo, em conformidade com a teoria estudada.

Após a análise dos arquivos do Wireshark para o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) foram analisados os frames para o High Availability Seamless Redundancy (HSR). Os testes foram realizados seguindo o mesmo procedimento do primeiro ensaio. A análise de latência foi feita a partir da comparação direta entre os instantes de envio dos frames GOOSE em relação aos frames recebidos. Os cálculos de latência foram realizados exatamente da mesma forma para ambos os protocolos de redundância. Portanto, com os tempos de latência pode-se verificar a comparabilidade entre os resultados e avaliar o desempenho dos dois mecanismos de redundância.

Tabela 3: Intervalo de tempo HSR

PC2 Frame	PC2 Time (s,ms)	Switch Frame	Switch Time (s,ms)	Length	Latência (ms)
408	9,471547	31	9,48157	199	10,023
410	9,479998	34	9,490242	179	10,244
458	9,904857	85	9,91509	181	10,233
471	9,971735	101	9,981392	199	9,657
473	9,980788	104	9,991086	179	10,298
539	10,47189	178	10,48164	199	9,753
542	10,48095	191	10,491273	179	10,324
639	10,90586	305	10,916203	181	10,347
655	10,97203	329	10,981415	199	9,388
657	10,98131	338	10,991392	179	10,085

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 4: Tempos mínimo, médio, máximo e desvio padrão com HSR

Tempo Mínimo (ms)	Tempo Médio (ms)	Tempo Máximo (ms)	Desvio Padrão (ms)
9,388	10,472	10,225	0,237

Fonte: Elaboração própria (2025).

No High Availability Seamless Redundancy (HSR), pode-se observar um comportamento distinto do Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), pois os tempos de latência se mostraram inferiores, devido às diferenças entre os mecanismos de redundância. A partir dos frames GOOSE, observou-se um tempo de latência em torno

de dez milissegundos, conforme dez medidas apresentadas na Tabela 3. Além disso, de forma análoga a Tabela 2 do RSTP, na tabela 4 estão os valores de tempos mínimo, médio e máximo de latência e o Desvio Padrão dos frames na rede High Availability Seamless Redundancy (HSR). Na análise do momento de queda de enlace no High Availability Seamless Redundancy (HSR) as duas portas do protocolo enviam e recebem os frames, diferentemente do Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), onde uma porta desabilitada é habilitada no instante de queda da Port Root. Outrossim, ao desconectar um dos cabos de rede não foi gerado frame Extensible Authentication Protocol (EAP). Com isso, pode-se provar a ausência de perdas de frames GOOSE, pois para determinar o momento de falha não ocorreram perdas de frames e o mecanismo de redundância não ocupou parte do tempo do tráfego em sua convergência.

Figura 35: Convergência de rede HSR

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1642	8.710702	192.168.10.51	192.168.10.30	TLSv1.3	405	17:31:18,027313
1643	8.718064	192.168.10.30	192.168.10.51	TCP	199	17:31:18,034675
1644	8.718064	ASUSTekCOMPU_c8...	IecTc57_01:20:4e	GOOSE	239	17:31:18,034675
1645	8.718133	192.168.10.51	192.168.10.30	TCP	66	17:31:18,034744
1646	8.724547	192.168.10.30	192.168.10.51	TCP	60	17:31:18,041158
1647	8.725777	192.168.10.30	192.168.10.51	TCP	60	17:31:18,042388

Fonte: Elaboração própria (2025).

Dessa forma, à validação da redundância foi identificado o momento de convergência de enlace, pela falha no anel, por meio do tráfego TCP junto ao GOOSE. No frame 1643, último frame com dados duplicados, o sistema operava cópias de mensagens GOOSE, isso por conta de os frames trafegarem em ambos os sentidos do anel. A partir dos frames 1645 e 1646 não há mais duplicidade GOOSE, passando a ser recebida apenas uma das cópias da mensagem, conforme Tabela 5. Além disso, o frame 1646 representa a perda de um dos caminhos redundantes, com isso, ele atuou como um mecanismo de verificação da continuidade da sessão. Portanto, essa sequência de pacotes permite identificar o instante exato da falha e demonstrar a atuação do High Availability Seamless Redundancy (HSR), com ininterrupção imperceptível.

Após a análise das capturas de dados pelo Wireshark com os protocolos Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) e High Availability Seamless Redundancy (HSR), foi realizado o mesmo procedimento para análise da redundância Parallel Redundancy Protocol (PRP), com a mesma metodologia de testes. Dessa forma, também foram verificados cinquenta frames compatíveis entre computador e porta espelhada do switch, dos quais dez estão representados na Tabela 5. E analogamente aos outros protocolos de redundância, também foram verificados os tempos mínimo, médio e máximo, e o Desvio Padrão, conforme Tabela 6.

Figura 36: Convergência de rede HSR com MTU de 1530

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4814	88.1773...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4815	88.6126...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4816	88.6126...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4817	88.7310...	ASIXElectron_dd...	Nearest-Bridge	LLDP	169	Nearest-Bridge
4818	88.7310...	ASIXElectron_dd...	Nearest-Bridge	LLDP	169	Nearest-Bridge
4819	88.7310...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
4820	89.4557...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4821	89.7600...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4822	90.0234...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
4823	90.3036...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4824	90.4213...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
4825	90.5508...	192.168.10.51	192.168.10.20	SNMP	177	192.168.10.20
4826	90.5508...	192.168.10.51	192.168.10.20	SNMP	177	192.168.10.20
4827	90.5666...	192.168.10.20	192.168.10.51	SNMP	177	192.168.10.51
4828	90.6431...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4829	90.9737...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge

Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao analisar as configurações do switch verificou-se, que apesar das configurações High Availability Seamless Redundancy (HSR) já terem a Unidade Máxima de Transmissão (Maximum Transmission Unit - MTU) de 1530, no campo de configuração das portas do switch também se fazia necessário alterar o tamanho do frame. Portanto, apenas com o objetivo de analisar o funcionamento do mecanismo de redundância, foram feitas capturas dos frames com essa alteração, com isso, as portas 1 e 2 espelhadas, onde os protocolos de redundância de “tempo nulo” estão, puderam ser lidas e verificado que após a convergência apenas uma das LANs permaneceu funcional, conforme Figura 36 e Apêndice B.

Tabela 5: Intervalo de tempo PRP

PC2 Frame	PC2 Time (s,ms)	Switch Frame	Switch Time (s,ms)	Length	Latência (ms)
185	36,66773	2	36,681929	181	14,199
186	37,10015	6	37,11443	199	14,28
187	37,11021	9	37,124511	179	14,297
188	37,60054	15	37,61481	199	14,266
189	37,61011	18	37,624476	179	14,368
190	37,66824	21	37,68263	181	14,39
269	38,10146	103	38,116079	199	14,619
270	38,10992	106	38,12448	179	14,558
341	38,60274	180	38,617178	199	14,439
342	38,61059	183	38,625105	179	14,517

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 6: Tempos mínimo, médio, máximo e desvio padrão com PRP

Tempo Mínimo (ms)	Tempo Médio (ms)	Tempo Máximo (ms)	Desvio Padrão (ms)
13,741	14,798	14,497	0,234

Fonte: Elaboração própria (2025).

Desse modo, ao analisar o Parallel Redundancy Protocol (PRP), foi possível identificar o instante de falha verificado no frame 446, conforme Figura 36. Até o frame 445 pode-se analisar a duplicação das mensagens GOOSE, mas a partir dos frames 446 ocorre alteração no tráfego de rede e o surgimento de frames ARP Request. Esse é um comportamento da rede quando a alteração de rota principal, de forma que a tabela de endereços MAC é atualizada e os dispositivos ligados em rede permanecem sendo identificados. Portanto, o ARP do frame 446 atuou como um marcador de tempo de convergência de rede.

Figura 37: Convergência de rede PRP

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
445	3.585052	192.168.10.100	192.168.10.200	TCP	60	16:49:40,246054
446	3.594016	ASIXElectron_dd...	HirschmannAu_7e:32:a0	ARP	42	16:49:40,255018
447	3.594444	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	119	16:49:40,255446
448	3.595606	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	263	16:49:40,256608
449	3.597102	HirschmannAu_7e...	ASIXElectron_dd:23:c8	ARP	60	16:49:40,258104
450	3.611730	192.168.10.100	192.168.10.200	PRES	306	16:49:40,272732
451	3.612822	192.168.10.200	192.168.10.100	PRES	403	16:49:40,273824

Fonte: Elaboração própria (2025).

Analogamente ao que foi percebido nas configurações do switch nos testes da redundância High Availability Seamless Redundancy (HSR), para a redundância Parallel Redundancy Protocol (PRP) também foi necessário configurar a Unidade Máxima de Transmissão (Maximum Transmission Unit - MTU) para 1530, no campo de configuração das portas do switch 1 e 2 do switch. Dessa forma, pode-se verificar através do espelhamento de portas, conforme Figura 38 e Apêndice B.

Figura 38: Convergência de rede PRP com MTU de 1530

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
584	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA

A partir dos resultados e comportamentos obtidos pode-se realizar a análise comparativa entre os protocolos Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP). Para manter equidade nos testes o procedimento de coleta de dados foi uniformizado para os três protocolos de redundância, com todos os resultados sendo feitos a partir da captura de cinquenta frames GOOSE enviados entre os computadores simulando o Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices). A partir da latência desses *frames*, pôde-se quantificar e comparar o desempenho dos três protocolos de redundância. Dessa forma, pode-se compreender como cada protocolo se comporta no instante de interrupção física de enlace de rede e o impacto de cada um deles no processo de continuidade de comunicação de rede.

Para o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) notou-se a dependência da convergência lógica da rede para o reestabelecimento do enlace redundante de rede, por conta da Alternated Port depender da detecção da queda de rede pelo Root Bridge para porta ser ativa. O comportamento ficou evidenciado pelo frame Extensible

Authentication Protocol (EAP), que é enviado quando a porta redundante anteriormente desabilitada assume a função de Root Port. Com isso, foi mensurado o tempo de indisponibilidade de rede de aproximadamente 362 milissegundos, intervalo que não seriam encaminhados frames GOOSE, caso o intervalo de envio de frames dos computadores fosse de menor tempo. Apesar disso, o protocolo demonstrou estabilidade ao longo da transmissão, com aproximadamente treze milissegundos na média de latência de frames, com pouca variação entre tempos de latência mínimo, máximo e médio. No entanto, mesmo com a estabilidade na comunicação, o tempo de convergência demonstra que o protocolo Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) não é adequado para o Barramento de Processo (Process Bus), pois a perda de comunicação por centenas de milissegundos resulta na inoperância do IED. Essa ocorrência impediria que o dispositivo recebesse dados críticos de medição em tempo hábil, causando à falha na atuação em casos de falta ou uma atuação incorreta, comprometendo a segurança e a seletividade da proteção da SE.

O protocolo de redundância High Availability Seamless Redundancy (HSR) manteve o tráfego sem interrupções, o que evidenciou o comportamento esperado. Devido a sua característica de envio e recepção de mensagens duplicadas simultaneamente, a desconexão do cabo principal não causou frame Extensible Authentication Protocol (EAP), nem sinais de transição de estado de porta. A identificação do rompimento do enlace pode ser verificada pelo Wireshark e não pelos atrasos de pacotes, portanto o protocolo desempenhou a comunicação continua conforme o esperado, com ausência de perdas ou falhas. O protocolo de redundância Parallel Redundancy Protocol (PRP) apresentou comportamento semelhante ao High Availability Seamless Redundancy (HSR), para ambos os protocolos a convergência foi praticamente imperceptível, devido a duplicação de frames. Porém, o Parallel Redundancy Protocol (PRP) não precisa que a topologia seja em anel desobrigando a necessidade do protocolo de redundância na placa de rede em dispositivos que estão entre os Dual Attached Nodes (DAN).

Com a análise gráfica da Figura 37, pode-se observar a influência direta entre os tempos de convergência e comportamento da rede devido a disparidade entre os tempos de convergência dos protocolos Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP). Enquanto o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) tem o tempo de convergência na

casa dos milissegundos, os tempos dos protocolos High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP) são praticamente nulos. Portanto, o resultado gráfico aponta à importância da escolha correta dos protocolos de redundância em aplicações críticas, para garantia de comunicação estável cumprindo os requisitos da norma IEC 61850 para os sistemas da Subestação de Energia (SE).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a formulação deste trabalho foi possível avaliar e analisar o comportamento dos protocolos de redundância, para redes de automação de Subestações de Energia (SE), em conformidade com as normas IEC 61850 e IEC 62439. O desenvolvimento da plataforma de testes práticos permitiu a verificação da latência e dos tempos de convergência das mensagens GOOSE. Os testes da plataforma foram realizados de serem realizados com a utilização de switches industriais e Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) simulados em computadores com o software IEDScout. Para norma IEC 61850, as aplicações de proteção que utilizam mensagens GOOSE estão associadas a requisitos rigorosos de desempenho temporal, nos quais o tempo de transferência fim a fim deve ocorrer na ordem de poucos milissegundos. Apesar disso, não há um tempo específico para todas aplicações, mas para aplicações críticas pode ser adotado um valor de referência em torno de 4 milissegundos como critério para avaliação do desempenho dos protocolos de redundância implementados na rede (Silva, 2021).

Os resultados obtidos nos testes apontaram à necessidade da escolha correta dos protocolos de redundância de acordo com a criticidade das aplicações de rede do Sistema de Proteção, Supervisão e Controle (SPSC) deve ser. Com isso, a partir da análise do protocolo Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), verificou-se que seu tempo de convergência foi de aproximadamente 362 milissegundos. Esse protocolo de redundância mostrou-se insuficiente para aplicações com tempos inferiores a 100 milissegundos, como a comunicação entre Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED – Intelligent Electronic Devices) e o SCADA. Consequentemente, pode-se observar que o protocolo de redundância não é adequado para aplicações onde às mensagens GOOSE possuem criticidade de tempo de convergência. Portanto, aplicações para o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) devem ser limitadas ao nível de tolerância de atraso de convergência de rede.

Os testes realizados com os protocolos High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP) demonstraram a confiabilidade destas tecnologias de redundância, o que confirmou o tempo de convergência de rede ininterrupto. Com isso, a transição de frames duplicados garantiu que não ocorressem falhas de recepção de informação nos dispositivos finais, devido as características intrínsecas desses protocolos de redundância. Os resultados demonstram que estes

protocolos de redundância são adequados para aplicações críticas de redes em Subestações de Energia (SE) garantindo disponibilidade em modernizações e digitalizações desses sistemas. Outrossim, a análise individual desses protocolos de redundância demonstrou a eficiência de uma rede de topologia em anel com o High Availability Seamless Redundancy (HSR) e a flexibilidade para topologias de rede com Parallel Redundancy Protocol (PRP).

Por fim, o estudo demonstrou a importância das diretrizes à modernização das Subestações de Energia (SE), através do ponto de vista das redes de comunicação redundantes, com o objetivo de alcançar a crescente necessidade dos sistemas elétricos mais seguros e eficientes. Com a definição correta das arquiteturas e tecnologias de redes de comunicação às Subestações de Energia (SE) é possível manter a disponibilidade dessas redes mantendo os sistemas operando mesmo quando ocorrem falhas. Além disso, o comparativo entre os protocolos de redundância fornece subsídios para que profissionais da área possam se orientar na tomada de decisão de como e quais protocolos usar de acordo com a criticidade e arquitetura de rede. Este trabalho apresentou o papel dos protocolos de redundâncias e arquitetura à continuidade operacional dos sistemas elétricos e aponta os caminhos para pesquisas futuras voltadas às melhorias de desempenho e integração nas Subestações de Energia (SE).

6 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, pode-se dar continuidade no aprofundamento no estudo das tecnologias de rede à norma IEC 61850, com ênfase nos mecanismos de redundância definidos pelo IEC 62439. Consequentemente, o aprofundamento nas demais características e protocolos a serem utilizados nas Subestações de Energia (SE), podem auxiliar a definição de arquiteturas com protocolos ajustados para maior robustez e confiabilidade.

Além do mais, para análise do comportamento mais próximo do que ocorreria em uma Subestação de Energia (SE), poderiam ser realizados testes com Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED) e Merging Units ligados a Transformadores de Potencial (TP) e Transformadores de Corrente (TC). Dessa forma, seria possível replicar falhas e compreender o quão relevantes os protocolos de redundância são para a recomposição dos sistemas em casos de falhas.

Durante a realização dos testes uma dificuldade foi o sincronismo dos tempos, que estavam relacionados a rede Wireless do ambiente de teste. Na análise dos frames do Wireshark, pode-se observar que o servidor NTP da rede Wi-Fi, tinha alguns milissegundos em relação ao instante que o frame saia da porta do switch e o instante em que o mesmo foi registrado na captura do computador. Portanto, uma alternativa para maior precisão dos resultados seria usar um relógio GPS como servidor de tempo de todos os dispositivos de rede.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília, DF: ANEEL, 2010. Disponível em: <https://website.amazonasenergia.com/wp-content/uploads/2021/01/Resolu%C3%A7%C3%A3o-414-da-ANEEL.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ALVES, E. G. , M. Experiência de Campo com a Monitoração On-Line de Dois Transformadores 150MVA 230kV com Comutadores Sob Carga. Disponível em: https://treetech.com.br/wp-content/uploads/2015/01/Cigre_Eletrosul_Itajai_MonitoracaoComutadores_2007.pdf. Acesso em: set. 14DC.

ASAAD RASHID, R. et al. Performance Evaluation using Spanning Tree Protocol, Rapid Spanning Tree Protocol, Per-VLAN Spanning Tree, and Multiple Spanning Tree. 2024. Disponível em: <https://journals.uhd.edu.iq/index.php/uhdjst/article/view/1254>. Acesso em: 2025.

BELDEN. High Availability Seamless Redundancy (HSR). Disponível em: <https://www.belden.com/solutions/high-availability-seamless-redundancy>. Acesso em: 26 maio 2025

CISCO CCNA 200-301.2025. Why do we need Spanning-Tree? 2025. Disponível em: <https://www.networkacademy.io/ccna/spanning-tree/why-do-we-need-stp>. Acesso em: 25 maio. 2025.

CONPROVE ENGENHARIA. Testes em Merging Units. 2024 Disponível em: <https://conprove.com/teste-da-comunicacao-em-sistema-de-potencia/testes-em-merging-units/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

COPYRIGHT ABB. Grid Automation REC615 and RER615 Engineering Guide. 2018
Disponível em:
[https://library.e.abb.com/public/1e4143355a5e4a82aa9d33a3a3cddebb/RECR615_I
EC61850eng_757809_ENc.pdf](https://library.e.abb.com/public/1e4143355a5e4a82aa9d33a3a3cddebb/RECR615_I
EC61850eng_757809_ENc.pdf). Acesso em: 4 jun. 2025.

CRESWELL, J. W.; CLARK, V. L. Pesquisa de métodos mistos. Porto Alegre: Penso, 2013.

DA. 12/03/1999: Blecaute deixa dez Estados e o DF sem luz e afeta 76 milhões.
Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/redacao/1999/03/12/12399-blecaute-deixa-dez-estados-e-o-df-sem-luz-e-afeta-76-milhoes.htm>. Acesso em: 24 maio. 2025.

ENERGÊS. O que você Precisa Saber sobre subestações em Média Tensão. 2021.
Disponível em: <https://energes.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-subestacoes-em-media-tensao/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

FECOMERCIO. Prejuízos com falta de energia em São Paulo estão perto de somar R\$ 2 bilhões. 2025. Disponível em: <https://www.fecomercio.com.br/noticia/prejuizos-com-falta-de-energia-em-sao-paulo-estao-perto-de-somar-r-2-bilhoes?>>. Acesso em: 27 ago. 2025.

FERNÁNDEZ, G. Industrial Ethernet Switches Update Substations to IEC 61850. 2016. Disponível em: <https://www.belden.com/blog/industrial-ethernet-switches-update-substations-to-iec-61850>. Acesso em: 5 jun. 2025.

HINKLEY, K.; MISTRY, C. First Digital Substation: A journey, business case, lessons. Pac World Magazine, p. 39–43, Setembro, 2018. Disponível em: <https://www.pacw.org/previous-magazines-2018-flippable>. Acesso em: 2 maio 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 62439-3:2012 – Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 3:

Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). 2nd ed. Geneva: IEC 62439-3, 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC TR 61850-90-4:2020 – Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-4: Network engineering guidelines. Geneva: IEC, 2020. Technical Report.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62439-3: Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). Geneva: IEC, 2021. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64423>. Acesso em: 20 setembro 2025

KIRRMANN, H. Bumpless Ethernet redundancy for substations with IEC 61850. ABB Review — Special Report IEC 61850, 2010, p. 57–61. Disponível em: https://library.e.abb.com/public/a55cbfca01e44aa9c1257784003acea0/57-61%20SA056_72dpi.pdf. Acesso em: 2025.

KIRRMANN, H. et al. HSR: Zero recovery time and low-cost redundancy for Industrial Ethernet (High availability Seamless Redundancy, IEC 62439-3). (IEEE, Ed.)2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2009). Anais... In: IEEE CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION (ETFA 2009). Piscataway, NJ, USA: IEEE, out. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ETFA.2009.5347037>. Acesso em: 12 out. 2025

MCFADYEN, S. How a Digital Substation Works. Disponível em: <https://myelectrical.com/notes/entryid/245/how-a-digital-substation-works>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ODOM, Wendell. Guia oficial de certificação Cisco CCNA: Routing e Switching ICND2 200-101. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016. p. 19-33.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Mapa Brasil horizonte 29. 2025 Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: set. 14DC

PEREIRA, P. et al. EXPERIÊNCIA DE INTEROPERABILIDADE NO BARRAMENTO DE PROCESSO (PROCESS BUS) DA IEC 61850/IEC61869-9 E AS QUESTÕES RELATIVAS À SINCRONIZAÇÃO. 2017. Disponível em: https://conprove.com/wp-content/uploads/2020/05/2017_SNPTEE_EXPERIENCIA_INTEROPERABILIDADE_BARRAMENTO_DE_PROCESSOS_IEC_61850_ARTIGO.pdf. Acesso em: jun. 1DC.

SILVA, Robson Gomes da. Metodologia de documentação do protocolo GOOSE da norma IEC 61850 em subestações. 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-03022022-130817/publico/RobsonGomesdaSilvaCorr21.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2025.

STEFANKA, M. The Parallel Redundancy Protocol over Wide Area Networks. 2020. IEC61850 and Ethernet Redundancy Introduction and Application. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/8be6095b929546ff890222c19604b701/IEC%2061850%20webinar.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

Understand Rapid Spanning Tree Protocol (802.1w). Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/24062-146.html?dtid=osscdc000283&linkclickid=srch>. Acesso em: 26 maio. 2025.

APÊNDICE A

A partir da captura dos frames dos protocolos Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP), foi gerada uma tabela para cada um dos três protocolos de redundância com cinquenta frames enviados e recebidos. Portanto, por meio dessas tabelas, foi possível gerar os valores médios das Tabelas 2, 4 e 6, e nas Tabelas 1, 3 e 5 estão representados os dez primeiros valores de cada protocolo de redundância para compreensão das faixas de valores de latência.

Tabela 7: Instantes de envio e recepção frames RSTP

PC2 Frame	Tempo PC2 (s)	Switch Frame	Tempo Switch (s)	Length	Latência (ms)
42	40,06133	2	40,074382	179	13,052
43	40,061407	5	40,074382	199	12,975
44	40,150167	9	40,163223	181	13,056
45	40,561551	21	40,575025	179	13,474
46	40,561774	24	40,575025	199	13,251
47	41,062232	34	41,075269	199	13,037
48	41,062232	37	41,075269	179	13,037
49	41,150514	41	41,163893	181	13,379
50	41,56284	49	41,575822	199	12,982
51	41,56284	52	41,575822	179	12,982
89	42,062749	134	42,075939	179	13,19
90	42,062885	137	42,075939	199	13,054
100	42,15057	159	42,163884	181	13,314
164	42,563566	293	42,576907	179	13,341
165	42,563733	296	42,576907	199	13,174
242	43,06362	470	43,076961	179	13,341
243	43,06469	473	43,078066	199	13,376
249	43,151071	487	43,164402	181	13,331
313	43,563621	621	43,576917	179	13,296
316	43,565779	626	43,579297	199	13,518
384	44,065056	770	44,078444	179	13,388
385	44,066085	773	44,079486	199	13,401
393	44,151718	791	44,165184	181	13,466
454	44,565444	919	44,578799	179	13,355
455	44,566592	922	44,579846	199	13,254
564	45,065746	1144	45,079042	179	13,296
566	45,066893	1149	45,080322	199	13,429
586	45,152087	1191	45,16544	181	13,353

669	45,566138	1361	45,579642	179	13,504
670	45,56724	1364	45,580628	199	13,388
693	46,067044	1420	46,079676	179	12,632
694	46,067986	1423	46,081395	199	13,409
701	46,153119	1439	46,166479	181	13,36
780	46,567849	1603	46,581335	179	13,486
782	46,568582	1608	46,581335	199	12,753
912	47,068163	1871	47,081589	179	13,426
913	47,069208	1876	47,082662	199	13,454
946	47,153965	1944	47,167474	181	13,509
1101	47,568571	2259	47,582012	179	13,441
1102	47,569397	2262	47,582012	199	12,615
1190	48,069641	2561	48,083007	199	13,366
1191	48,069759	2564	48,083007	179	13,248
1212	48,154647	2618	48,168143	181	13,496
1279	48,57007	2885	48,583522	179	13,452
1280	48,570439	2888	48,583522	199	13,083
1343	49,07057	3179	49,083815	199	13,245
1344	49,070606	3182	49,083815	179	13,209
1360	49,154927	3252	49,168426	181	13,499
1406	49,571209	3455	49,584514	199	13,305
1407	49,571452	3458	49,584514	179	13,062

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 8: Instantes de envio e recepção frames HSR

PC2 Frame	PC2 Time (s,ms)	Switch Frame	Switch Time (s,ms)	Length	Latência (ms)
408	9,471547	31	9,48157	199	10,023
410	9,479998	34	9,490242	179	10,244
458	9,904857	85	9,91509	181	10,233
471	9,971735	101	9,981392	199	9,657
473	9,980788	104	9,991086	179	10,298
539	10,471887	178	10,48164	199	9,753
542	10,480949	191	10,491273	179	10,324
639	10,905856	305	10,916203	181	10,347
655	10,972027	329	10,981415	199	9,388
657	10,981307	338	10,991392	179	10,085
740	11,472189	458	11,481735	199	9,546
742	11,48258	461	11,492872	179	10,292
793	11,906593	515	11,916928	181	10,335
805	11,972788	530	11,983164	199	10,376
811	11,983108	537	11,993437	179	10,329
922	12,4728	723	12,483198	199	10,398

924	12,483118	729	12,493535	179	10,417
1065	12,907364	889	12,917716	181	10,352
1090	12,973663	917	12,98381	199	10,147
1095	12,983738	923	12,993945	179	10,207
1193	13,473888	1061	13,484338	199	10,45
1194	13,483837	1063	13,494308	179	10,471
1289	13,908556	1163	13,918876	181	10,32
1307	13,975103	1184	13,985492	199	10,389
1310	13,984656	1188	13,995128	179	10,472
1370	14,47615	1263	14,486536	199	10,386
1372	14,484852	1266	14,495246	179	10,394
1424	14,908693	1331	14,919112	181	10,419
1430	14,976989	1340	14,987413	199	10,424
1433	14,985105	1344	14,995513	179	10,408
1489	15,478003	1429	15,488383	199	10,38
1491	15,485986	1432	15,496346	179	10,36
1544	15,909377	1488	15,919287	181	9,91
1547	15,978581	1494	15,988914	199	10,333
1548	15,98637	1496	15,996789	179	10,419
1549	16,478646	1545	16,489026	199	10,38
1550	16,487595	1547	16,497696	179	10,101
1551	16,909665	1570	16,920046	181	10,381
1552	16,97931	1589	16,989326	199	10,016
1553	16,98756	1591	16,997796	179	10,236
1554	17,479453	1621	17,489532	199	10,079
1555	17,488066	1623	17,498313	179	10,247
1556	17,910406	1629	17,920477	181	10,071
1557	17,97928	1633	17,989614	199	10,334
1558	17,988646	1635	17,998738	179	10,092
1559	18,479614	1656	18,490019	199	10,405
1560	18,488821	1658	18,498963	179	10,142
1561	18,910638	1668	18,920745	181	10,107
1562	18,980618	1675	18,99077	199	10,152
1563	18,98954	1679	18,999788	179	10,248

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 9: Instantes de envio e recepção frames PRP

PC2 Frame	PC2 Time (s,ms)	Switch Frame	Switch Time (s,ms)	Length	Latência (ms)
185	36,66773	2	36,681929	181	14,199
186	37,10015	6	37,11443	199	14,28
187	37,110214	9	37,124511	179	14,297

188	37,600544	15	37,61481	199	14,266
189	37,610108	18	37,624476	179	14,368
190	37,66824	21	37,68263	181	14,39
269	38,10146	103	38,116079	199	14,619
270	38,109922	106	38,12448	179	14,558
341	38,602739	180	38,617178	199	14,439
342	38,610588	183	38,625105	179	14,517
351	38,668336	194	38,682863	181	14,527
422	39,103573	270	39,117674	199	14,101
423	39,110731	273	39,125344	179	14,613
493	39,60385	346	39,61843	199	14,58
495	39,611162	350	39,625816	179	14,654
500	39,668868	357	39,683456	181	14,588
559	40,104659	419	40,119348	199	14,689
562	40,111576	424	40,126165	179	14,589
651	40,605124	518	40,619596	199	14,472
655	40,612239	523	40,626791	179	14,552
668	40,669405	539	40,683906	181	14,501
759	41,10599	633	41,12056	199	14,57
760	41,112984	636	41,127472	179	14,488
829	41,606272	709	41,620557	199	14,285
830	41,613366	712	41,62798	179	14,614
834	41,670243	718	41,684908	181	14,665
921	42,106973	809	42,121528	199	14,555
923	42,113653	813	42,127463	179	13,81
1046	42,607433	966	42,622004	199	14,571
1050	42,614207	972	42,628042	179	13,835
1074	42,670416	999	42,685044	181	14,628
1235	43,107583	1183	43,122216	199	14,633
1236	43,11492	1186	43,12958	179	14,66
1325	43,607741	1318	43,622322	199	14,581
1329	43,615934	1324	43,629675	179	13,741
1346	43,670793	1343	43,685466	181	14,673
1416	44,107988	1416	44,122713	199	14,725
1419	44,116791	1421	44,1314	179	14,609
1482	44,608168	1522	44,622762	199	14,594
1485	44,617224	1527	44,631905	179	14,681
1495	44,671372	1539	44,686069	181	14,697
1546	45,108303	1600	45,123101	199	14,798
1549	45,118095	1604	45,132753	179	14,658
1609	45,609482	1681	45,624155	199	14,673
1612	45,618885	1686	45,633571	179	14,686
1616	45,671778	1692	45,686442	181	14,664
1618	46,110097	1710	46,124394	199	14,297

1619	46,120193	1713	46,134605	179	14,412
1620	46,610241	1717	46,624773	199	14,532
1621	46,62119	1720	46,635902	179	14,712

Fonte: Elaboração própria (2025).

APÊNDICE B

A análise da convergência dos protocolos de redundância Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), High Availability Seamless Redundancy (HSR) e Parallel Redundancy Protocol (PRP) foi feita de acordo com a variação dos frames capturados durante os testes de plataforma. O primeiro mecanismo analisado foi o Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), com frames entre as Figuras 40 e 44.

Figura 39: Frame antes da mudança de porta

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1398	5.645391	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1399	5.658163	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1401	5.841510	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1586	6.467578	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge


```

> Frame 1398: Packet, 60 bytes on wire (480 bits), 60 bytes captured (480 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0
> IEEE 802.3 Ethernet
> Logical-Link Control
> Spanning Tree Protocol
  Protocol Identifier: Spanning Tree Protocol (0x0000)
  Protocol Version Identifier: Rapid Spanning Tree (2)
  BPDU Type: Rapid/Multiple Spanning Tree (0x02)
  > BPDU flags: 0x78, Agreement, Forwarding, Learning, Port Role: Root
  > Root Identifier: 32768 / 0 / 74:0b:b0:7e:32:a0
  Root Path Cost: 200000
  > Bridge Identifier: 32768 / 0 / 74:0b:b0:7e:32:c0
  Port identifier: 0x8002
  Message Age: 1
  Max Age: 20
  Hello Time: 2
  Forward Delay: 15
  Version 1 Length: 0
  
```

Fonte: Elaboração própria (2025).

O primeiro frame do Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), frame 1398, na Figura 40, os switches estão trocando Bridge Protocol Data Units (BPDUs), com as informações de ID, Bridge ID e Port Role, confirmando a comunicação contínua e estabilidade. Com a desconexão da porta principal a falha foi detectada, capturado no Frame 1399, na Figura 41, o BPDU envia notificação para mudança e inicia o processo de convergência. Portanto, temos o Topology Change, buscando a redefinição de porta, ocorre o mecanismo de Handshake, com a detecção de mudança do frame 1399, o switch propõe a alteração de estado e o vizinho responde com Agreement, conforme Figura 42. Logo, a porta redundante mudou o estado para Forwarding e o switch reestabelece a nova topologia, conforme Figura 43 com o frame 1401, que contém o BPDU como nova porta (Designated), confirmando a alteração. A alteração definitiva é confirmada com o frame 1506, da Figura 44, a qual as informações já

Figura 42: Frame BPDU após a mudança de porta

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1398	5.645391	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1399	5.658163	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1401	5.841510	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1586	6.467578	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
> Frame 1401: Packet, 60 bytes on wire (480 bits), 60 bytes captured (480 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0 > IEEE 802.3 Ethernet > Logical-Link Control > Spanning Tree Protocol Protocol Identifier: Spanning Tree Protocol (0x0000) Protocol Version Identifier: Rapid Spanning Tree (2) BPDU Type: Rapid/Multiple Spanning Tree (0x02) > BPDU flags: 0xfc, Topology Change Acknowledgment, Agreement, Forwarding, Learning, Port Role: Designated > Root Identifier: 32768 / 0 / 74:0b:b0:7e:32:a0 Root Path Cost: 0 > Bridge Identifier: 32768 / 0 / 74:0b:b0:7e:32:a0 Port identifier: 0x8002 Message Age: 0 Max Age: 20 Hello Time: 2 Forward Delay: 15 Version 1 Length: 0						

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 43: 2º Frame BPDU após a mudança de porta

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1398	5.645391	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1399	5.658163	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1401	5.841510	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
1586	6.467578	HirschmannAu_7e...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
> Frame 1586: Packet, 60 bytes on wire (480 bits), 60 bytes captured (480 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0 > IEEE 802.3 Ethernet > Logical-Link Control > Spanning Tree Protocol Protocol Identifier: Spanning Tree Protocol (0x0000) Protocol Version Identifier: Rapid Spanning Tree (2) BPDU Type: Rapid/Multiple Spanning Tree (0x02) > BPDU flags: 0x7c, Agreement, Forwarding, Learning, Port Role: Designated > Root Identifier: 32768 / 0 / 74:0b:b0:7e:32:a0 Root Path Cost: 0 > Bridge Identifier: 32768 / 0 / 74:0b:b0:7e:32:a0 Port identifier: 0x8004 Message Age: 0 Max Age: 20 Hello Time: 2 Forward Delay: 15 Version 1 Length: 0						

Fonte: Elaboração própria (2025).

No protocolo High-availability Seamless Redundancy (HSR) foram analisados os frames das Figuras 45 a 50. O princípio de funcionamento do protocolo se dá ao envio de duplicação de frames, para que um único ponto de falha resulte em um tempo nulo. Pode se observar o comportamento de frame duplicado nas Figuras 45 e 46, nos frames 4815 trafegando pela Rede A e 4816 trafegando pela Rede B. Além disso, o Sequence Number de ambos de 227 confirma que são uma duplicação exata.

Ao retirar o cabo de rede da porta da Rede A surgiu o frame Extensible Authentication Protocol (EAP), sua presença na captura é incidental, contudo, o protocolo permanece funcionando normalmente. Com isso, os frames passaram a chegar apenas por uma das redes e o Rede B, o que fica evidente nos frames 4828

na Figura 48, frame 4862 na Figura 49 e frame 4893 na Figura 50, com Sequence Nuber distintos e todos da rede B. A convergência é imperceptível na rede, confirmando a funcionalidade da comunicação ininterrupta do High-availability Seamless Redundancy (HSR).

Figura 44: Frame HSR rede B

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4814	88.1773...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4815	88.6126...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4816	88.6126...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4817	88.7310...	ASIXElectron_dd...	Nearest-Bridge	LLDP	169	Nearest-Bridge
4818	88.7310...	ASIXElectron_dd...	Nearest-Bridge	LLDP	169	Nearest-Bridge
4819	89.3989...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
4820	89.4557...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4821	89.7600...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4822	90.0234...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
4823	90.3036...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4824	90.4213...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
4825	90.5508...	192.168.10.51	192.168.10.20	SNMP	177	192.168.10.20
4826	90.5508...	192.168.10.51	192.168.10.20	SNMP	177	192.168.10.20
4827	90.5666...	192.168.10.20	192.168.10.51	SNMP	177	192.168.10.51
4828	90.6431...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4829	90.9737...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4830	01.4429...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast

> Frame 4815: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0
 > Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)
 > High-availability Seamless Redundancy (IEC62439 Part 3 Chapter 5)
 0001 = Path: 1
 000. = Network id: 0
 ...1 = Lane id: Lane B (1)
 0000 0011 0100 = LSDU size: 52 [correct]
 Sequence number: 227
 Type: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and HSR Supervision (IEC62439 Part 3) (0x88fb)
 > HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 45: Frame HSR rede A

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4814	88.1773...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4815	88.6126...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4816	88.6126...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4817	88.7310...	ASIXElectron_dd...	Nearest-Bridge	LLDP	169	Nearest-Bridge
4818	88.7310...	ASIXElectron_dd...	Nearest-Bridge	LLDP	169	Nearest-Bridge
4819	89.3989...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
4820	89.4557...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4821	89.7600...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4822	90.0234...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
4823	90.3036...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4824	90.4213...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
4825	90.5508...	192.168.10.51	192.168.10.20	SNMP	177	192.168.10.20
4826	90.5508...	192.168.10.51	192.168.10.20	SNMP	177	192.168.10.20
4827	90.5666...	192.168.10.20	192.168.10.51	SNMP	177	192.168.10.51
4828	90.6431...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4829	90.9737...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4830	01.4429...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast

> Frame 4816: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0
 > Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)
 > High-availability Seamless Redundancy (IEC62439 Part 3 Chapter 5)
 0000 = Path: 0
 000. = Network id: 0
 ...0 = Lane id: Lane A (0)
 0000 0011 0100 = LSDU size: 52 [correct]
 Sequence number: 227
 Type: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and HSR Supervision (IEC62439 Part 3) (0x88fb)
 > HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 48: 2º Frame HSR rede B Após falha

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4821	89.7600...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4823	90.3036...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4828	90.6431...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4829	90.9737...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4830	91.4429...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4831	91.4429...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4832	91.4864...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4833	91.4864...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4857	92.1941...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4858	92.4811...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4859	92.4811...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4860	92.5621...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4861	92.5621...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4862	92.6272...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4887	93.5212...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4888	93.5212...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4889	93.6023...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast

> Frame 4862: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFB0E1B5}, id 0
 > Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)
 > High-availability Seamless Redundancy (IEC62439 Part 3 Chapter 5)
 0001 = Path: 1
 000. = Network id: 0
 ...1 = Lane id: Lane B (1)
 0000 0011 0100 = LSDU size: 52 [correct]
 Sequence number: 233
 Type: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and HSR Supervision (IEC62439 Part 3) (0x88fb)
 > HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 49: 3º Frame HSR rede B após falha

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4832	91.4864...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4833	91.4864...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4857	92.1941...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4858	92.4811...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4859	92.4811...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4860	92.5621...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4861	92.5621...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4862	92.6272...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4887	93.5212...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4888	93.5212...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4889	93.6023...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4890	93.6023...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
4891	93.7154...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4893	94.6391...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
4894	94.8763...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	74	Nearest-Bridge
4904	95.8243...	HirschmannAu_7e...	ASIXElectron_dd:23:c8	ARP	66	ASIXElectron_dd:23:c8
4905	95.8243...	HirschmannAu_7e...	ASIXElectron_dd:23:c8	ARP	66	ASIXElectron_dd:23:c8

> Frame 4893: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFB0E1B5}, id 0
 > Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)
 > High-availability Seamless Redundancy (IEC62439 Part 3 Chapter 5)
 0001 = Path: 1
 000. = Network id: 0
 ...1 = Lane id: Lane B (1)
 0000 0011 0100 = LSDU size: 52 [correct]
 Sequence number: 236
 Type: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and HSR Supervision (IEC62439 Part 3) (0x88fb)
 > HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

Fonte: Elaboração própria (2025).

Analogamente ao HSR o Parallel Redundancy Protocol (PRP) é uma redundância que envia frames duplicados por duas portas para duas redes independentes, Rede A e Rede B. Esse comportamento pode ocorrer entre os frames 565 a 567, nas Figuras 51 a 53, que possuem seus equivalentes nos frames entre os frames 568 a 569, nas Figuras 54 a 56. Com a desconexão do cabo da Rede A, ocorre

o frame EAP, na Figura 57, sinalizando a convergência. A partir de então apenas os frames da Rede B são recebidos conforme Figuras de 58 a 60.

Figura 50: Frame PRP rede B

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
565	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
566	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
567	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00

<

> Frame 565: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0
 > Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)
 > HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)
 > Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)
 [PRP Version: PRP-1]
 Sequence number: 111
 1011 = LAN: LAN B (11)
 LDU size: 52 [correct]
 Suffix: 0x88fb

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 51: Frame PRP rede B

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
565	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
566	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
567	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00

<

> Frame 566: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0
 > Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)
 > HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)
 > Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)
 [PRP Version: PRP-1]
 Sequence number: 111
 1011 = LAN: LAN B (11)
 LDU size: 52 [correct]
 Suffix: 0x88fb

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 52: Frame PRP rede B

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
565	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
566	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
567	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00

<

> Frame 567: Packet, 70 bytes on wire (560 bits), 70 bytes captured (560 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFB0E1B5}, id 0

> Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)

> 802.1Q Virtual LAN, PRI: 0, DEI: 0, ID: 1

> HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

▼ Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)

[PRP Version: PRP-1]

Sequence number: 111

1011 = LAN: LAN B (11)

LSDU size: 52 [correct]

Suffix: 0x88fb

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 53: Frame PRP rede A

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
565	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
566	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
567	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00

<

> Frame 568: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFB0E1B5}, id 0

> Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)

> HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

▼ Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)

[PRP Version: PRP-1]

Sequence number: 111

1010 = LAN: LAN A (10)

LSDU size: 52 [correct]

Suffix: 0x88fb

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 54: Frame PRP rede A

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
565	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
566	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
567	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00

<

> Frame 569: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0

> Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)

> HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

▼ Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)

[PRP Version: PRP-1]

Sequence number: 111

1010 = LAN: LAN A (10)

LSDU size: 52 [correct]

Suffix: 0x88fb

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 55: Frame PRP rede A

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
565	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
566	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
567	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00

<

> Frame 570: Packet, 70 bytes on wire (560 bits), 70 bytes captured (560 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0

> Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)

> 802.1Q Virtual LAN, PRI: 0, DEI: 0, ID: 1

> HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)

▼ Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)

[PRP Version: PRP-1]

Sequence number: 111

1010 = LAN: LAN A (10)

LSDU size: 52 [correct]

Suffix: 0x88fb

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 56: Frame EAP rede PRP

[illegible]

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 57: Frame PRP rede B

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XMML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XMML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XMML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XMML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XMML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XMML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
584	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
<						
>	Frame 583: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0					
>	Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)					
>	HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)					
>	Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)					
	[PRP Version: PRP-1]					
	Sequence number: 112					
	1011 LAN: LAN B (11)					
	LSDU size: 52 [correct]					
	Suffix: 0x88fb					

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 58: Frame PRP rede B

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
571	21.2099...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
572	21.2138...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
573	21.3886...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
574	22.8537...	HirschmannAu_8a...	Nearest-Customer-Bridge	STP	60	Nearest-Customer-Bridge
575	22.8703...	HirschmannAu_8a...	Nearest-non-TPMR-Bridge	EAP	60	Nearest-non-TPMR-Bridge
576	23.0453...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
577	23.0454...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1160	ff02::c
578	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
579	23.0456...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1126	239.255.255.250
580	23.0457...	fe80::cf39:7069...	ff02::c	UDP/XML	1164	ff02::c
581	23.0459...	192.168.10.51	239.255.255.250	UDP/XML	1130	239.255.255.250
582	23.0639...	HirschmannAu_7e...	Nearest-Bridge	PTPv2	68	Nearest-Bridge
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
584	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
<						
> Frame 584: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0						
> Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)						
> HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)						
▼ Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)						
[PRP Version: PRP-1]						
Sequence number: 112						
1011 = LAN: LAN B (11)						
LSDU size: 52 [correct]						
Suffix: 0x88fb						

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 59: Frame PRP rede B

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
538	18.9398...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
539	18.9398...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
565	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
566	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
567	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
568	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
569	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
570	21.0990...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	70	Iec_00:01:00
583	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
584	23.0667...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
778	24.1195...	192.168.10.10	192.168.10.51	SNMP	140	192.168.10.51
779	24.1195...	192.168.10.10	192.168.10.51	SNMP	140	192.168.10.51
783	24.1693...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
784	24.1693...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
793	24.9382...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
794	24.9382...	HirschmannAu_7e...	Iec_00:01:00	HSR/PRP	66	Iec_00:01:00
797	25.2450...	HirschmannAu_7e...	Broadcast	ARP	66	Broadcast
<						
> Frame 793: Packet, 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface \Device\NPF_{3B6E84F5-8432-42FD-8DE7-229FFBD0E1B5}, id 0						
> Ethernet II, Src: HirschmannAu_7e:32:e0 (74:0b:b0:7e:32:e0), Dst: Iec_00:01:00 (01:15:4e:00:01:00)						
> HSR/PRP Supervision (IEC62439 Part 3)						
▼ Parallel Redundancy Protocol (IEC62439 Part 3)						
[PRP Version: PRP-1]						
Sequence number: 115						
1011 = LAN: LAN B (11)						
LSDU size: 52 [correct]						
Suffix: 0x88fb						

Fonte: Elaboração própria (2025).