



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTL/10  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – XV**

**GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL**

**UTILIZAÇÃO DOS PROTOCOLO DE REDUNDÂNCIA HSR E PRP EM REDES COM REQUISITOS DE ALTA DISPONIBILIDADE**

SANTOS, C.R.R.D.  
SIEMENS

KIEFER, A.  
SIEMENS

JUNIOR, P. R. A. D. S.  
SIEMENS

HOKAMA, W.  
CPFL

FAVARO, D  
ENTE

**RESUMO**

Mecanismos responsáveis pela reconfiguração de Redes Ethernet durante falhas de comunicação são largamente utilizados atualmente. É o caso dos protocolos de Redundância Rapid Spanning Tree Protocol e Media Redundancy Protocol. Todavia, para algumas aplicações críticas, previstas e detalhadas na norma IEC61850, o tempo de reconfiguração oferecido por tais protocolos aos sistemas de Automação compromete a funcionalidade das aplicações que dependem da Rede Ethernet para operação. Neste cenário, dois protocolos descritos na norma IEC62439-3 e que garantem a alta disponibilidade da Rede Ethernet sem tempo de reconfiguração surgem como opção: HSR (High Availability Seamless Redundancy) e PRP (Parallel Redundancy Protocol).

**PALAVRAS-CHAVE**

Redundância, Resiliência, Ethernet, Redes e IEC 61850

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Com o aumento da utilização das redes Industriais Ethernet, considerando principalmente sua utilização em Sistemas de Automação de Energia que façam uso dos conceitos da norma IEC-61850, surge a necessidade garantir a máxima disponibilidade e consistência dos serviços que dependem destas infraestruturas. Isso ocorre principalmente devido às funcionalidades de automatismos distribuídos hoje facilitados pelo uso de serviços definidos no padrão IEC-61850. Pode-se afirmar que o MTBF da Rede Ethernet de um Sistema de Automação de Energia é tão importante quanto o MTBF de um IED responsável pela proteção do Sistema Elétrico.

O padrão de Rede Ethernet, adotado amplamente no contexto das redes de computadores, é o padrão aplicado pelo IEC 61850 na Automação de Energia por se tratar de um sistema aberto que permite comunicações integradas independente de fabricantes. Entretanto, o padrão Ethernet não foi concebido originalmente para redes de missão crítica. Desta forma, requer que os controles de disponibilidade de serviços venham a ser implementados por outros protocolos de controle de redundância como, por exemplo, os protocolos RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) e MRP (Media Redundancy Protocol).

Porém, para serviços críticos ou de tempo real (Goose – Generic Object Oriented Substation Event e SV - Sampled Values), a indisponibilidade da Rede deve ser a mínima possível. Porém, os mecanismos mencionados anteriormente apresentam limitações quanto ao tempo de Reconfiguração da Rede Ethernet, inviabilizando algumas funcionalidades que podem ser executadas utilizando telegramas do tipo GOOSE. Dentre tais funcionalidades pode-se mencionar: ordem de disparo - Trip, Ordem de Religamento, Rejeição de Carga, Seletividade Lógica, Transferência Automática de Linha, entre outros.

Este trabalho tem o intuito de comparar o desempenho dos mecanismos RSTP, PRP (Parallel Redundancy Protocol) e HSR (High Availability Seamless Redundancy), considerando funcionalidades existentes

em Automação e Proteção de sistemas elétricos, já que estes são os mecanismos sugeridos para a aplicação no Station Bus de acordo com a Edição 2 da Norma IEC61850-8-1 e IEC61850-9-4.

Empregados separadamente ou combinados, é possível oferecer máxima disponibilidade da Rede com ótimas relações custo/benefício.

## 2.0 - REDUNDÂNCIA EM REDES ETHERNET

Um dos problemas de um projeto hierárquico puro para segmentos de redes de comunicação é a possibilidade de um dos elementos que compõem a rede, seja um enlace ou um nó da rede, se tornar indisponível. Quando isso ocorre, todos os demais elementos da rede ficarão indisponíveis. Por esta razão empregam-se topologias físicas de redes com múltiplos trajetos entre os enlaces dessa rede. Os múltiplos trajetos entre os elementos de uma rede normalmente obtêm-se através do uso de elementos redundantes na topologia da rede. Desta forma, na ausência de um elemento da rede, ela deve ser capaz de se reestruturar e continuar oferecendo o serviço independente da presença da falha, o que comumente se chama de resiliência ou tolerância a falhas. Tal adaptação da rede pode melhorar em muito sua resiliência, mas infelizmente também podem trazer consequências desastrosas como, por exemplo, fazer com que os dados nessa rede trafeguem indefinidamente (*Loops* na rede Ethernet), congestionando-a e gerando problemas significativos de desempenho.

Para contornar tais cenários, mecanismos que controlam a topologia de rede e evitam que os dados nessa rede entrem em “*loop*” são empregados. Dentre estes protocolos, o RSTP e o MRP merecem destaque.

Cada integrante do anel é comumente chamado de nó. Por definição, um nó deve ser um switch, sendo assim capaz de encaminhar pacotes por suas portas conectadas à rede Ethernet. Além de ser um switch, ele deve possuir protocolos de redundância, seja RSTP ou MRP, que permitam avaliar a topologia lógica da rede, impedimento assim que um *Loop* seja criado.

Para o RSTP, no momento da falha de um nó, o tempo típico de reconfiguração de rede é algo em torno de 5ms vezes o número de nós. No caso de uma falha no nó principal, ou Switch Root da rede, o tempo de convergência total da rede pode chegar à casa de segundos, à medida que se aumenta o número de nós na rede.

Há uma melhoria no protocolo MRP, tornando o determinístico, resultando em uma reconfiguração de rede de 500 ms, 200 ms, 30 ms e 10 ms para os piores casos à medida que se aumenta o número de equipamentos. Na prática, o tempo de convergência está em torno de 50 a 75% destes valores. Porém, uma das limitações do MRP, é a possibilidade de implantação de apenas um anel em sua topologia.

De qualquer maneira, dependendo do tipo de funcionalidade implementada através da rede Ethernet através de telegramas GOOSE, o melhor cenário entre estes dois protocolos durante uma falha na rede afetaria de forma inaceitável automatismos importantes para o correto funcionamento do sistema elétrico.

### 2.1 Requisitos da Rede para a utilização dos serviços GOOSE e SV

Dois serviços do protocolo IEC61850 merecem uma especial atenção: Generic Object Oriented Substation Events (GOOSE) e Sampled Values (SV). Tais serviços são fundamentais na transmissão de grandezas analógicas com fins de proteção do sistema (SV) como também a transmissão de informações binárias para a atuação das proteções (GOOSE), sendo ambos os serviços chamados de tempo-crítico.

Abaixo segue uma relação dos serviços e aplicações IEC61850 e os tempos esperados para a recomposição da Rede.

TABELA 1

| Communicating partners                       | Service                         | Application recovery tolerated delay | Required Communication Recovery Time |
|--|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| SCADA to DAN, client-server                  | IEC 61850-8-1                   | 800 ms                               | 400 ms                               |
| DAN to DAN interlocking                      | IEC 61850-8-1                   | 12 ms<br>(with Tmin set to 4 ms)     | 4 ms                                 |
| DAN to DAN, reverse blocking                 | IEC 61850-8-1                   | 12 ms<br>(with Tmin set to 4 ms)     | 4 ms                                 |
| Protection trip excluding Bus Bar protection | IEC 61850-8-1                   | 8 ms                                 | 4 ms                                 |
| Bus Bar protection                           | IEC 61850-9-2<br>on station bus | < 1 ms                               | Bumpless                             |
| Sampled Values                               | IEC 61850-9-2<br>on process bus | Less then two consecutive samples    | <u>Bumpless</u>                      |

Pela Tabela 1, é possível visualizar que para os dois últimos serviços (Bus Bar Protection e Sampled Values) é necessária uma comunicação sem interrupção. Dessa forma, os serviços de tempo crítico elevam os pré-requisitos da comunicação a um novo patamar tecnológico, não permitindo mais soluções como RSTP e MRP.

Ainda, para casos de TRIP de proteção, estes protocolos também não se mostram confiáveis, pois o tempo tolerável de reconfiguração (8 ms) fica muito abaixo do factível com essas tecnologias de reconfiguração de rede.

O capítulo 9-1, Anexo B da Norma IEC61850, lista alguns exemplos de taxa de amostragem e transmissão pela rede de grandezas analógicas pelo serviço SV. Para a menor amostragem listada, 10 amostras por segundo, e para a frequência de 60Hz, a taxa de transmissão dos frames seria  $10 \times 60 = 600$  Hz.

Tais frames seriam enviados a cada 1,6ms. Assim, em uma eventual indisponibilidade da Rede no melhor cenário MRP (10ms), se teria uma perda superior a 6 pacotes, algo inaceitável para SV.

Como alternativa aos protocolos RSTP e MRP mencionados, existem mecanismos que garantem uma altíssima disponibilidade da rede Ethernet garantindo 0 segundos de reconfiguração em caso de falha. Esses mecanismos são chamados de PRP e HSR e apresentados na sequência desse documento.

A Tabela 2 abaixo apresenta de maneira mais clara o tempo de reconfiguração desses protocolos, ilustrando claramente que para o caso do PRP e HSR não existe interrupção da comunicação na rede Ethernet para qualquer falha simples no sistema. Situação que não ocorre com o RSTP:

TABELA 2 – Exemplos de protocolos de redundância (IEC-62439 –1, página 23, capítulo 5.1.4)

| Protocol | Solution    | Frame Loss | Redundancy protocol | End node attachment | Network Topology               | Recovery time for the considered failures  |
|----------|-------------|------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|--|
| IP       | IP routing  | Yes        | Within the network  | Single              | Single meshed                  | > 30 s typical not deterministic   |
| STP      | IEEE 802.1D | Yes        | Within the network  | Single              | Single meshed                  | > 20 s typical not deterministic   |
| RSTP     | IEEE 802.1D | Yes        | Within the network  | Single              | Single meshed, ring            | Can be deterministic following the rules of Clause 8                                     |
| CRP      | IEC 62439-4 | Yes        | In the end nodes    | Single and double   | Doubly meshed, cross-connected | 1 s worst case for 512 end nodes   |
| DRP      | IEC 62439-6 | Yes        | Within the network  | Single and double   | Ring, double ring              | 100 ms worst case for 50 switches  |
| MRP      | IEC 62439-2 | Yes        | Within the network  | Single              | Ring                           | 500 ms, 200 ms, 30 ms or 10 ms worst case for 50 switches depending on the parameter set |
| BRP      | IEC 62439-5 | Yes        | In the end nodes    | Double              | Doubly meshed, connected       | 4,8 ms worst case for 500 end nodes  |
| PRP      | IEC 62439-3 | No         | In the end nodes    | Double              | Doubly meshed, independent     | 0 s  |
| HSR      | IEC 62439-3 | No         | In the end nodes    | Double              | Ring, meshed                   | 0 s  |

## 2.2 Princípio de operação de HSR e PRP

### 2.2.1 PRP (Parallel Redundancy Protocol)

Nesta seção, será abordado de forma breve o funcionamento dos protocolos HSR e PRP, especificados na norma IEC 62439-3. Em termos de desenvolvimento, pode-se considerar que o HSR é oriundo do PRP, tendo sido realizadas algumas alterações. Todavia o princípio de funcionamento é similar.

O desenvolvimento da solução PRP é baseado na utilização de um mecanismo de redundância de Layer 2 da camada ISO/OSI. Dessa forma, tal artifício é transparente para as outras camadas.

O mecanismo de redundância fica encarregado de duplicar o frame original, distribuindo dois frames idênticos por redes paralelas e isoladas. Tais frames duplicados chegarão ao destino final com um pequeno delay entre si, sendo tais equipamentos chamados de DANP (Dual Attached Node with PRP).

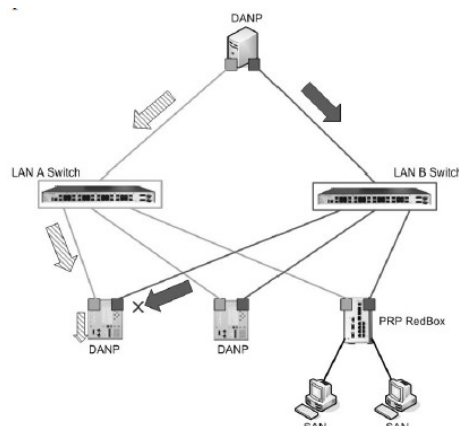


FIGURA 1 – Rede PRP

Todos os dispositivos DANP possuem duas portas de redes independentes entre si, porém o tráfego por ambas LANs é idêntico. Dessa forma, os dois frames duplicados no DANP de origem chegarão ao DANP de destino aproximadamente ao mesmo tempo, e caso uma das redes apresente uma falha de conexão, a outra rede ainda estará disponível e manterá a comunicação entre dois DANPs intacta.

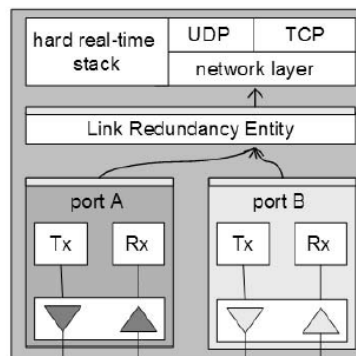


FIGURA 2 – Arquitetura do DANP

Dentro do nó PRP, o mecanismo Link Redundancy Entity (LRE) é responsável por gerenciar a chegada e envio de frames duplicados. O não tratamento na chegada de frames duplicados pode ocasionar a sobrecarga de processamento da CPU no nível de Aplicação.

Para a duplicação e envio da informação as duas Redes, o LRE acrescenta informações adicionais nos frames. Tal informação é chamada de Redundancy Control Trailer (RCT) e é exibida na Figura 3.

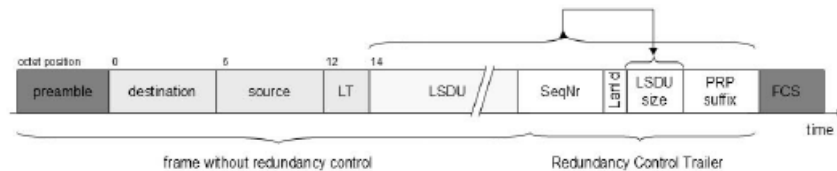


FIGURA 3 – PRP frame

A informação mais importante presente neste frame é o Sequence Number. Todas as vezes que um dispositivo DANP envia uma informação à rede, este número é incrementado. Com base no Sequence Number e no endereço Source, o DANP de destino consegue avaliar a duplicação dos frames. Se for o primeiro frame a chegar, ele disponibilizará a informação aos Layers acima, se for o segundo, a informação será descartada.

Dispositivos que não suportam PRP são chamados de Single Attached Nodes (SAN). Eles podem ser conectados à Rede através de um equipamento chamado de RedBox, que ficará responsável pelo gerenciamento dos frames duplicados. Assim os SANs também se beneficiarão da duplicidade e alta disponibilidade da Rede, mesmo não suportando o PRP.

### 2.2.2 HSR (High Availability Seamless Redundancy)

Uma das desvantagens do PRP é a necessidade de duas arquiteturas de LANs idênticas, aumentando dessa forma significativamente o custo com os equipamentos de rede (switches) e o trabalho na implantação da mesma.

Com base nesta desvantagem, a solução HSR foi desenvolvida, utilizando uma arquitetura em anel. As duas portas LANs enviam informações, porém cada uma em um sentido do anel.

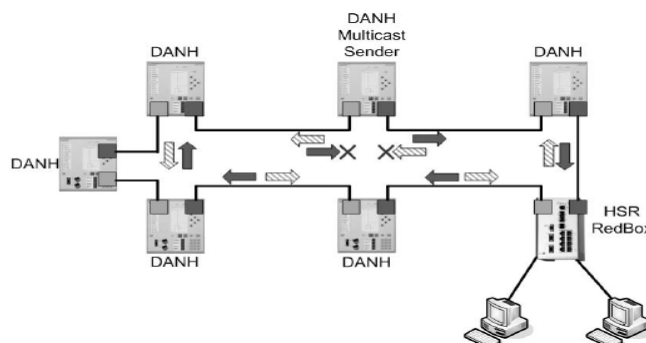


FIGURA 4 – Anel HSR

O funcionamento do mecanismo de duplicação LRE é similar ao PRP, ou seja, ele é responsável pela duplicação das informações vindas da camada de aplicação e pelo descarte de frames duplicados vindos da rede, porém existe uma funcionalidade adicional no LRE para redes HSR. O LRE em dispositivos HSR também é responsável por propagar frames de uma porta da LAN para a outra (Ex. de A para B), exceto se já foi transmitido uma vez.

Nesta solução, os dispositivos que enviam e recebem frames são chamados de Dual Attached Node for HSR (DANH). De maneira análoga ao PRP, cada dispositivo envia a informação duplicada pelas duas portas LANs e o receptor DANH consegue gerenciar a chegada da informação duplicada.

As Redes HSR são compatíveis com PRP, mediante a utilização de Redbox HSR-PRP.

### 2.2.3 HSR combinado com PRP

É possível utilizar como base a principal característica de ambos os protocolos, que é o mecanismo de duplicação de pacotes por caminhos distintos, e combiná-los com o intuito de obter a melhor relação custo-benefício.

Arquiteturas que utilizam apenas a tecnologia PRP requerem a duplicação da infraestrutura de rede, isto é, o dobro de switches e o dobro de conexões, devido à necessidade de tais redes serem idênticas.

Já a tecnologia HSR utiliza o benefício de topologias em anel, não havendo a necessidade da duplicação de infraestrutura.

Abaixo é possível visualizar uma topologia onde ambos os mecanismos estão presentes:

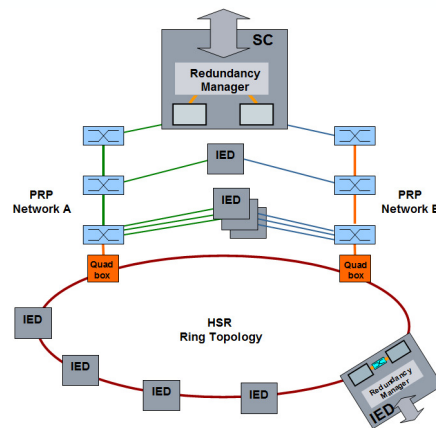


FIGURA 5 – Arquitetura HSR e PRP combinados

No exemplo acima, uma rede PRP provê comunicação para um grupo de DANPs, para isso, duas redes idênticas são criadas.

Ambas redes PRP são conectadas a um anel HSR via um Equipamento chamado Quadbox, responsável pela conexão de Redes PRP e HSR.

## 3.0 - APLICAÇÕES

Com o intuito de maximizar o custo-benefício na escolha da melhor solução RSTP, PRP e HSR, seguem algumas opções para cada tipo de aplicação utilizando funcionalidades que podem ser implementadas com base em conceitos da norma IEC-61850.

No momento da decisão pela arquitetura de rede mais adequada à solução de automação de energia, é importante ter em mente as necessidades do sistema elétrico. Algumas funcionalidades via GOOSE não exigem tempos baixos de reconfiguração de redes. Podemos mencionar nesse caso os intertravamentos de comandos, seletividade lógica, transmissão de posição de TAP via GOOSE, entre outros. Assim, nesses casos, pode-se optar por topologias que façam uso do RSTP, sendo que essa opção garante uma boa relação custo-benefício ao usuário final.

No entanto, sempre que a solução de automação de energia demandar funcionalidades de proteção distribuída, o RSTP não se mostra como a melhor opção para garantir a disponibilidade da rede Ethernet. Quando funções tais como TRIP de proteções, envio de sinais de Pickup, bloqueios de proteções, proteção falha disjuntor (50BF) forem realizadas através da rede Ethernet, o melhor cenário se mostra com a utilização dos mecanismos PRP e HSR, totalmente transparentes a falhas simples no sistema de comunicação.

A Tabela 3 abaixo mostra algumas funcionalidades possíveis de serem implementadas com base na norma IEC- 61850 e uma sugestão de mecanismo de alta disponibilidade de rede Ethernet para cada caso:

TABELA 3 – Sugestões de arquiteturas de rede segundo funcionalidades IEC-61850 existentes

| <b>Funcionalidades do Sistema de Automação</b>  | <b>RSTP</b> | <b>HSR</b> | <b>PRP</b> |
|---|-------------|------------|------------|
| Comunicação com SCADA   | X           |            |            |
| Intertravamentos via GOOSE  | X           |            |            |
| Automatismos via GOOSE:<br>- Seletividade lógica<br>- Transferência automática de linha<br>- Troca dinâmica de ajuste | X           | X          | X          |
| Proteção via GOOSE:<br>- TRIP / Disparos  |             | X          | X          |
| Distribuição de Sampled Values  |             | X          | X          |

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Uma das vantagens da norma IEC-61850 foi prover, através do uso de redes Ethernet em sistemas de automação de energia, conectividade entre os dispositivos e a capacidade de compartilhamento de diversos serviços através da mesma infraestrutura de comunicação.

Ainda, com o uso de telegramas GOOSE, criou a possibilidade de uma série de automatismos antes impossíveis de serem realizados quando protocolos como DNP 3.0 e IEC-103 eram utilizados nos IEDs.

No entanto, algumas das funcionalidades GOOSE demandam uma disponibilidade extremamente alta da rede ethernet, disponibilidade essa tão importante quanto a de um relé de proteção. É nesse cenário que mecanismos como PRP e HSR se apresentam como rompedores de paradigmas, criando um ambiente no qual funções como disparos de proteção podem de fato ser realizados pela rede Ethernet e com a confiabilidade demandada por uma instalação crítica como uma subestação de energia.

Quando combinadas adequadamente, arquiteturas PRP/HSR não representam um impacto de custo significativo na instalação pois o número de switches Ethernet pode ser reduzido significativamente quando comparado com uma solução na qual utiliza-se somente o PRP ou outra topologia do tipo estrela.

A norma IEC61850 prevê ainda cenários mais desafiadores para as redes Ethernet no ambiente de Automação de Sistemas de Energia, sendo tal rede a base para inúmeros serviços que antes eram realizados por simples fios de cobre. Portanto, soluções envolvendo HSR e PRP, combinados ou não, atendem não apenas as demandas atuais, como também provê uma confiabilidade para futuras aplicações, por exemplo no caso dos Sample Values.

Por fim, para o usuário final, esses mecanismos criam um cenário no qual a possibilidade de expansão, facilidade de reparo e visualização rápida de problemas são reais e peças fundamentais em um momento de contingência na rede, agregado sempre à confiabilidade na entrega dos dados.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC-61850: Communication networks and systems in substations, todos os capítulos da edição 1
- (2) IEC-61850: Communication networks and systems in substations, capítulos 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 e 8.1 da edição 2
- (3) IEC-62439 - Industrial communication networks – High availability automation networks, capítulos 1, 2 e 3 da edição 1
- (4) Hubert Kirmann, “Standard Redundancy Methods for Highly Available Automation Networks, rationales behind the upcoming IEC 62439 standard”, 2006 EFTA, ABB
- (5) Siemens - Network Redundancy in Substation Automation - Dual Link / RSTP / PRP / HSR – Siemens AG 2012
- (6) Topologias de rede ethernet tipo anel para grandes sistemas elétricos baseados na norma IEC61850 - Paulo Antunes Souza Jr / Newton de Carvalho Fernandez / Gilberto Morgado – STPC 2012