

Modelo de simulação em OMNET++ para a avaliação de desempenho da rede de comunicação de um SAS baseado na Norma IEC61850

David L. Acosta Molano¹, Natalia Castro Fernandes², Carlos A. Malcher¹

¹Laboratório GTECCOM, ²Laboratório MidiaCom
Departamento de Engenharia de Telecomunicações – Universidade Federal Fluminense (UFF)

dlacos@gteccom.uff.br, natalia@midiacom.uff.br, cmbastos@telecom.uff.br

Abstract. *This paper proposes a model for capacity analysis of substation networks based on IEC61850 for the open source tool OMNET++. The proposed model describes the behavior of the main elements of the communication network of a Substation Automation System (SAS), such as intelligent electronic devices, merging units, ethernet switches with IEEE 802.1Q support and Dual Node Attached PRP. Based on the proposed simulation model, it is possible to observe the latencies in messages like GOOSE and Sampled Values for different network topologies commonly used in SAS. Moreover, we developed modules to simulate standard protocols of a substation based on IEC 61850, such as the Rapid Spanning Tree Protocol, used to recover from failures, and the recent Parallel Redundancy Protocol, which avoids network outages. The results demonstrate and validate the operation of the developed modules, allowing the performance analysis of the network topologies commonly used in substation automation.*

Resumo. *Esse artigo propõe uma modelagem para análise de capacidade de redes de subestações baseadas na Norma IEC61850 para a plataforma de simulação de código aberto OMNET++. A modelagem proposta descreve o comportamento dos elementos principais que participam na rede de comunicação de um Sistema de Automação de Subestações Elétricas (SAS), como os dispositivos eletrônicos inteligentes, merging units, switches ethernet com suporte a IEEE802.1Q e Dual Attached Node PRP. Com base nos módulos de simulação propostos, é possível examinar as latências em diferentes tipos de mensagens, como GOOSE e Sampled Values, para diferentes topologias de rede comumente usadas nos SAS. Além disso, foram desenvolvidos módulos para simular protocolos típicos de uma subestação baseada em IEC 61850, como o Rapid Spanning Tree Protocol, para recuperação de falhas, e o recente Parallel Redundancy Protocol, para evitar interrupções na comunicação. Os resultados demonstraram e validaram o funcionamento dos módulos desenvolvidos, permitindo analisar o desempenho de topologias comumente usadas na automação de subestações.*

1. Introdução

Os sistemas elétricos são compostos por subsistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Essa energia é transformada nas subestações elétricas e é transportada através das linhas de transmissão desde sua geração até os pontos de consumo residenciais ou industriais. Dependendo do porte, as subestações podem ser de distribuição ou de transmissão, e têm como objetivo operar corretamente o sistema elétrico realizando, permanentemente, monitoramento e proteção das tensões e correntes. Para essa operação são utilizados os Sistemas de Automação de Subestações (SAS), os quais mediante a captura dos valores de tensão e corrente das linhas de transmissão, barramentos, transformadores, entre outros, medem e agem automaticamente ante

eventualidades. Esses dados são utilizados pelos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) - principais dispositivos nos sistemas de proteção e controle do sistema elétrico - para cuidar do sistema e executar os comandos de controle de um disjuntor, por exemplo, ou enviar informações a outros dispositivos do SAS. Percebe-se, então, que deve existir um canal de comunicação para a troca desses comandos de controle e medições. Para isto, são utilizados sistemas de comunicação baseados em diversas tecnologias. No entanto, devido à variedade de equipamentos e protocolos de comunicação entre diferentes fornecedores houve a necessidade de padronizar a forma como são transmitidas as informações entre os dispositivos para garantir sua interoperabilidade, motivo pelo qual foi elaborada a Norma IEC 61850.

O design do sistema de comunicação de um SAS depende principalmente das funções de proteção e controle a serem implementadas na subestação, pois, com sua definição, se perfila o número de equipamentos conectados à rede de comunicação e seu tráfego gerado. Atualmente, com a incorporação do padrão IEC 61850, definem-se os requisitos de interoperabilidade entre os diferentes equipamentos e é adotado o conjunto de protocolos da pilha de comunicação segundo o modelo OSI, os quais devem ser suportados pelos IEDs. A norma IEC 61850 designa as redes *ethernet* como padrão de comunicação nas camadas inferiores e define os diferentes perfis das outras camadas, as quais dependem do tipo de mensagens transmitidas e seu nível de importância para o funcionamento do SAS. Essa utilização das redes *ethernet* permite aproveitar tecnologias altamente divulgadas e estáveis, possibilitando a realização de análises de capacidade de diferentes topologias de rede medindo as latências em cenários frequentes de SAS. Isso permite determinar se uma configuração de dispositivos interconectada, e com um perfil de tráfego estabelecido, atinge os requisitos dados pela Norma IEC 61850.

Geralmente, as concessionárias do sistema elétrico no Brasil, quando precisam construir uma subestação ou expandir uma existente, abrem um processo de licitação ao qual várias empresas fornecedoras apresentam suas propostas com sua respectiva topologia de rede de comunicação. No caso da criação de uma nova subestação, é importante conhecer o nível de expansão e escalabilidade estimadas porque, dependendo disso, um limite de dispositivos poderá ser conectado posteriormente à rede sem precisar de investimentos adicionais no sistema de comunicação. Apesar de os fornecedores estimarem a capacidade do segmento de rede por eles implementado, é a concessionária quem deve ter o controle sobre a rede de comunicação da sua subestação elétrica.

Nesse cenário, a criação de modelos de simulação que permitam analisar e avaliar, em condições similares às reais, os níveis de escalabilidade, capacidade e expansibilidade expostos se torna essencial. A simulação da rede de comunicação da subestação oferece às áreas de implementação, pesquisa e desenvolvimento a possibilidade de avaliar os limites e estimar o possível impacto na rede gerado pela inclusão, por exemplo, de mais IEDs que gerarão mensagens GOOSE aceleradamente ante uma falha, ou, para sistemas mais recentes, de *Merging Units* (MUs), que podem inundar os segmentos da rede com os valores amostrados de transformadores de tensão e corrente.

O presente trabalho reúne diversos conceitos relacionados a redes de subestação IEC 61850 visando integrar os módulos de dispositivos e estendendo as bibliotecas do simulador OMNET++. É apresentado um modelo completo a respeito das tendências dos sistemas baseados na Norma IEC 61850, pois além de projetar dispositivos como IEDs, MUs, o modelo proposto incorpora novas funcionalidades ao modelo existente de *switch ethernet*, e principalmente, introduz o modelo de um *Dual Attached Node PRP* (DANP) - dispositivo com suporte ao recente protocolo *Parallel Redundancy Protocol* (PRP), o qual é recomendado pela última revisão da Norma. Essa modelagem, além de ser de código aberto, segue os parâmetros de modularidade característico da ferramenta OMNET++, permitindo fácil incorporação e modificação para novos desenvolvimentos da comunidade.

Para o caso dos IEDs, foram projetados e desenvolvidos um gerador de tráfego

com a estrutura das mensagens GOOSE dada pela norma, e o suporte ao padrão IEEE 802.1Q para utilização de redes virtuais locais (VLAN) e priorização do tráfego na camada de enlace. Nas MU, criou-se um gerador de quadros *ethernet* com os campos de mensagem segundo o formato do quadro das *Sampled Values* (SVs). O módulo proposto também permite a parametrização da frequência de amostragem que condiciona o envio de informações por segundo, além de suportar a IEEE 802.1Q. Já o modelo de *switch* existente nas bibliotecas desenvolvidas pela comunidade foi estendido com suporte a VLANs e priorização de quadros, pontos estabelecidos pela Norma IEC 61850. Por fim, o modelo de um nó com suporte a PRP foi projetado, podendo ser um IED ou uma MU com a subcamada *Link Redundancy Entity* (LRE) descrita na norma IEC 62439-2, que permite analisar o desempenho das redes com mecanismos de redundância na camada de enlace recomendados pela última versão da Norma IEC 61850 e com um tempo de recuperação da rede de "zero".

O presente artigo está dividido conforme descrito a seguir. Na Seção 2 é realizada uma revisão bibliográfica. Na Seção 3 são descritos brevemente os SAS compatíveis com a Norma IEC 61850. Na Seção 4 é descrita a modelagem proposta. Os experimentos simulados para a verificação dos módulos e a obtenção de latências para algumas topologias comumente usadas são analisados na Seção 5. Por fim, descrevem-se as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Estado da arte

A metodologia para análise de desempenho das topologias de rede dos sistemas de comunicação em SAS é introduzida na própria Norma IEC 61850 [IEC 2010a] para enlaces de 10Mbps e 100Mbps, usando o simulador COMMET III. No entanto, essa metodologia perfila só a carga útil das mensagens, não incluindo o formato completo dos quadros enviados e sem considerar o impacto do tráfego de fundo. É necessário, então, uma ferramenta de simulação que permita ver o comportamento da rede de forma dinâmica e que permita obter os resultados considerando fatores como a utilização do formato completo das mensagens, a possibilidade de adicionar a comunicação com um centro de controle remoto e outros tipos de dados de fundo que afetam o desempenho na transmissão. Além disso, essa ferramenta deveria considerar também outros fatores, como a utilização de VLANs, o encaminhamento *multicast* na camada de enlace, a segmentação lógica da rede, as falhas de enlaces de comunicação, entre outras.

Alguns trabalhos apresentam a modelagem e simulação de topologias de rede em SAS de diferentes subestações usando a ferramenta de simulação OPNET [Thomas and Ali 2010, Sidhu and Yin 2006, Sidhu and Yin 2007]. Eles recriam modelos de IEDs e MUs e analisam o desempenho da rede usando *Switches Ethernet* para sua interconexão. Yang et al., apresentam o projeto de um módulo de simulação de uma subestação elétrica baseada em IEC61850 usando a plataforma NS-2 [Yang and Yang 2012]. Nesse modelo, são representados IEDs de diferentes fabricantes. Já Giovanini et al. usam o simulador NS-3 para modelar o IED e investigar as topologias de rede que atendem a norma [Giovanini and Pereira 2010]. Liang e Campbell dão sugestões para simular a Norma IEC 61850. Eles utilizam a plataforma J-Sim, baseada em Java, para implementar o modelo de dados, a representação interna das mensagens e o modelo de serviços, mas simulam unicamente as conexões que seguem a pilha TCP/IP [Liang and Campbell 2007]. Além disso, Juarez et al. criam um modelo usando OMNET++ para simular a comunicação entre centro de controle e a subestação, com e sem um servidor Proxy. Esse modelo incorpora, também, um dispositivo real para comparar o comportamento da ferramenta usada e mostrar que o OMNET++ tem desempenho suficiente para suportar a emulação de dispositivos em tempo real¹ [Juárez et al. 2012].

Por sua vez, Souza et al. modelam um sistema de automação com ênfase na

¹O desempenho dependerá também do hardware usado para executar o simulador

troca de informação cliente-servidor e na avaliação de algoritmos para sistemas de proteção dentro das subestações. Eles desenvolveram em C# um modelo de comunicação TCP/IP, um conjunto de nós lógicos e um registrador de eventos. O enfoque foi nas funções da rede elétrica na avaliação do desempenho dos sistemas de proteção, oferecendo uma modelagem dos componentes lógicos incluídos em um ou vários IEDs [Souza et al. 2010].

A Tabela 1 mostra um resumo do que foi implementado em cada trabalho e qual a plataforma de simulação que foi utilizada. A modelagem de dispositivos que obedecem a Norma IEC 61850 em diferentes ferramentas de simulação é contemporânea ao lançamento e evolução desse padrão e das tecnologias de comunicação. Algumas modelagens não tiveram continuidade, não incluíram novas tecnologias, como é o caso dos trabalhos [Juárez et al. 2012, Zhu et al. 2007, Souza et al. 2010]. Outras, embora completas, não foram disponibilizadas por seus desenvolvedores, de forma que não podem ser utilizadas para análise de capacidade. Outro ponto importante é se o simulador é gratuito e possui código aberto, o que possibilitaria a inserção de novas extensões ao código, seja para adicionar mais funcionalidades ou para aumentar a precisão do modelo. O trabalho proposto foi desenvolvido de forma aberta, estando disponível para novos estudos de redes IEC 61850, e inclui as características importantes das modelagens da literatura. Além disso, o modelo proposto implementa os módulos IED disjuntor, IED de proteção e controle, *Merging Unit* (MU), as subcamadas que dão suporte a IEEE 802.1Q, os geradores de tráfego parametrizáveis de mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e SV, a subcamada LRE usada em dispositivos que suportam PRP, entre outros. Portanto, o modelo proposto é a ferramenta mais completa para a simulação de subestações, possibilitando, com o aproveitamento de outras bibliotecas do simulador, análises de enfileiramento e, utilização dos enlaces de comunicação.

Tabela 1. Módulos de simulação da literatura

Trabalho	Plataforma	Dispositivos modelados	Plataforma gratuita	Disponível
[Juárez et al. 2012]	OMNET++	IED, MU, Switch	Sim	Não
[Sidhu and Yin 2006]	OPNET	IED, MU	Limitada	Não
[Souza et al. 2010]	C#	IED	-	Sim
[Yang and Yang 2012]	NS-2	IED, MU, SNTTP Server	Sim	Não
[Giovanini and Pereira 2010]	NS-3	IED, Switch	Sim	Não
[Zhu et al. 2007]	-	IED, MU, Switch	-	Não
[Liang and Campbell 2007]	J-Sim(Java)	IED, Switch	Sim	Não
Presente trabalho	OMNET++	IED, MU, Switch, DANP	Sim	Sim ²

3. SAS baseado em IEC 61850

Em uma subestação, os equipamentos são distribuídos segundo as funções de proteção e controle. É necessário conhecer a quantidade de equipamentos a ser utilizada para projetar o tráfego e avaliar as possíveis topologias que cumpram com os requisitos de tempo dados pela norma. A Figura 1 mostra um diagrama unifilar de uma linha de 69kV com as interconexões de IEDs e MUs aos elementos do sistema elétrico e à rede de comunicação. Percebe-se que, para esse caso, são utilizados dois IEDs de proteção (primário e secundário), dois IEDs disjuntores e uma *Merging Unit*. Anteriormente, os barramentos de estação e de processo possuíam sistemas de comunicação independentes, com diferentes protocolos e tecnologias. Com a criação de IEC61850, esses dois sistemas de comunicação podem estar em uma mesma rede *ethernet*. A rede de comunicação de

²Disponível em <https://github.com/dlacos/iec61850omnet>

um SAS deve garantir que as mensagens sejam entregues nos tempos permitidos, com contingências que permitam atender diferentes eventualidades na operação. Para isto, a simulação do desempenho da rede segundo os requisitos e condições dados permitirá avaliar se determinada topologia é viável ou não.

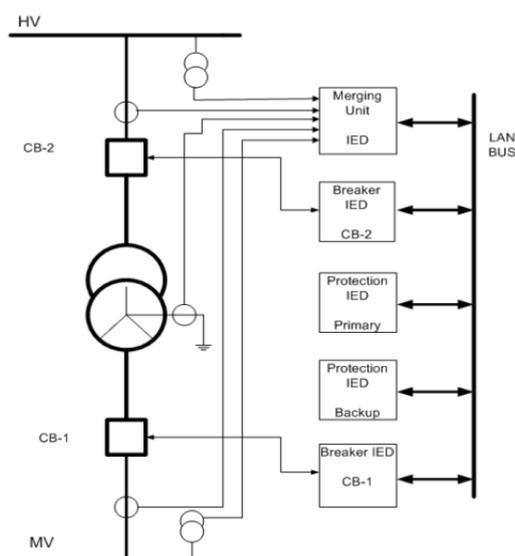


Figura 1. Equipamentos em uma linha de tensão [Sidhu and Yin 2006]

Visando calcular os tempos de latência que permitam avaliar o desempenho em fatores como largura de banda, latência, redundância e expansibilidade, são modelados os dispositivos principais que participam da rede de comunicação em um SAS baseado na Norma IEC 61850.

4. Modelo de simulação proposto

Seguindo as especificações da Norma IEC 61850, mostradas na Figura 2, foi modelada a pilha de comunicação de mensagens GOOSE, SV e *Manufacturing Messaging Specification* (MMS). As mensagens GOOSE e SV são mapeadas diretamente na camada de enlace, enquanto as mensagens MMS, utilizadas em uma aplicação cliente/servidor, funcionam sobre a camada de transporte.

O presente trabalho descreve o desenvolvimento dos modelos básicos de IED, MU e *Switch Ethernet*, assim como o modelo genérico de um DANP, usado em arquiteturas de rede com redundância por meio do protocolo PRP. Esses modelos são agrupados para criar configurações típicas de uma rede de comunicação em um SAS, permitindo a obtenção de dados de simulação para a análise de desempenho de cada topologia.

4.1. Dispositivo Eletrônico Inteligente (IED)

Os IEDs são os principais elementos dos SAS. São encarregados de realizar as funções de monitoramento, controle e proteção. Os IEDs trocam informações entre eles e entre outros dispositivos do sistema de automação por meio das redes LAN *Ethernet*, principalmente. Existem IEDs disjuntores, de proteção, de controle, entre outros. O presente desenvolvimento recriou o comportamento de um IED disjuntor e de um IED de proteção e controle. Foi usado um modelo genérico desenvolvido em OMNET++ com a reutilização de alguns módulos existentes e com a criação de outros.

O modelo do Dispositivo Eletrônico Inteligente (IED) consiste basicamente na implementação de um nó de rede com as camadas física, de enlace, rede, transporte e aplicação. A Figura 3(a) ilustra os componentes do modelo de IED criado. Os

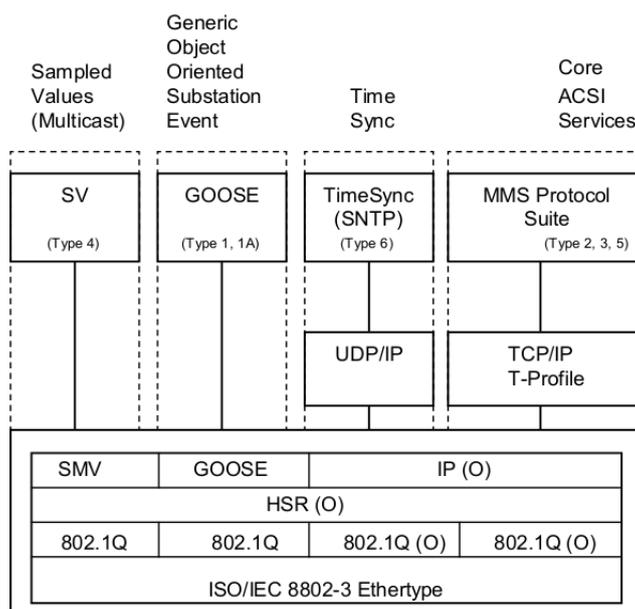


Figura 2. Pilha de protocolos especificada na Norma IEC61850 para os diferentes tipos de mensagens utilizados[IEC 2010a].

módulos *mac*, *queue*, *encap*, *network*, *tcp*, *IPBurst* são reutilizados das bibliotecas de INETMANET³, enquanto que os módulos *pcapper*, *layer8021Q*, *gooseApp*, *mmsApp* foram especificados e desenvolvidos para o presente trabalho. Esse módulos são descritos na Tabela 2.

4.2. Merging Unit (MU)

Para a modelagem das *merging units* é usada novamente a ideia de gerador de tráfego que envia informações diretamente à camada de enlace. É criado um nó de rede com as camadas física, enlace e aplicação. A Figura 3(b) representa os blocos ou submódulos do dispositivo. Novamente são reutilizados e configurados os módulos *mac*, *encap*, *queue*, *network* pertencentes ao framework INETMANET. O bloco *networkLayer* é usado para a configuração da rede e para desenvolvimentos futuros. O módulo principal criado para este dispositivo foi *svApp*, e os módulos reutilizados do IED foram o *layer8021Q* e o *pcapper*. Os componentes desenvolvidos são descritos na Tabela 3.

4.3. Switch Ethernet

Os *switches Ethernet* não gerenciáveis não suportam *loops*, portanto, para aumentar as possibilidades de topologias de rede como anéis e malhas, são necessários switches gerenciáveis que implementem o *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) para cuidar da rede e desses possíveis *loops* gerados nessas arquiteturas. Em termos gerais, a rede de comunicação de uma subestação deveria se recuperar ante uma falha dentro dos primeiros 100 ms para minimizar qualquer interrupção do sistema de automação [Chen 2008].

O OMNET++ possui um modelo básico de um *switch* composto por uma camada básica de enlace e uma unidade de encaminhamento chamada *relayUnit*, que recebe e envia as mensagens segundo sua tabela de encaminhamento, através de um RSTP implementado. No entanto, funcionalidades da norma IEEE802.1Q-2005, como VLANs e Tags de prioridade, não estão presentes nesse modelo. O presente desenvolvimento

³INET/INETMANET são frameworks desenvolvidos e disponibilizados que contêm os modelos para OMNET++ dos dispositivos de rede e protocolos comumente usados. Disponíveis em: <http://inet.omnetpp.org> e <https://github.com/aarizaq/inetmanet-2.0>

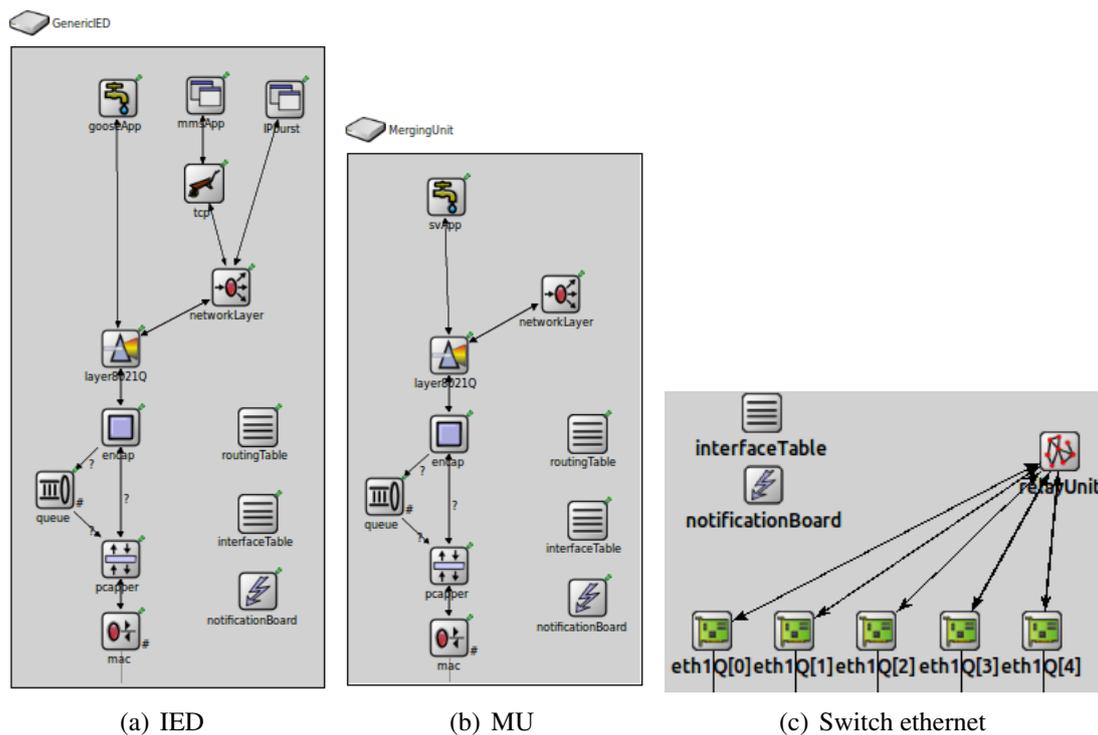


Figura 3. Modelos em OMNET++

estendeu essas funcionalidades do modelo simples de *switch* adicionando o entendimento de quadros que obedecem à norma IEEE802.1Q. Esse padrão é necessário para analisar corretamente o desempenho das diferentes topologias. A Figura 3(c) mostra o modelo criado, o qual, flexivelmente, cria interfaces para cada uma das portas necessárias. Isto significa que, se ao *switch* vão ser conectados 5 dispositivos, durante a parametrização da simulação serão criadas as respectivas conexões e suas portas. A figura ilustra o caso para cinco dispositivos conectados (5 portas *ethernet*).

4.4. Dual Attached Node PRP (DANP)

Definido na norma IEC 62439-3[IEC 2010b] e recomendado na última versão da norma IEC 61850, o *PRP* é um protocolo que roda em nós finais, chamados *Dual Attached Node PRP* (DANP), e que tem como requisito duas redes LAN independentes. Os nós DANP usam essas duas redes, que provavelmente apresentam desempenhos diferentes, para transmitir a informação *simultaneamente*, ou seja, duplicando todos os pacotes. Cada nó compatível com este protocolo tem, na sua camada de enlace, uma *Link Redundancy Entity* (LRE) que se encarrega de monitorar o status das redes LAN e dos dados. A *Link Redundancy Entity* (LRE) é quem, na origem, duplica o pacote recebido de camadas superiores e o transmite pelas duas interfaces *ethernet*, assim como, no destino, descarta o pacote duplicado e passa a informações para as camadas seguintes. A arquitetura do DANP é ilustrada na Figura 4(a).

Uma vantagem desse mecanismo de redundância é seu suporte a dispositivos que não o implementam. A LRE adiciona as informações de controle de redundância em cada quadro no *payload* por meio de *trailer*. Cada pacote percorrerá, então, suas respectivas redes LAN e cada nó intermediário que não suporte o protocolo encaminhará o pacote normalmente. Uma vez que o primeiro pacote chegue ao destino, seu *trailer* de controle é lido pela LRE e suas informações são usadas para monitorar o status do caminho. O quadro é, então, repassado para as camadas superiores. Quando o pacote duplicado chega ao destino, a LRE sabe que esse dado já foi recebido e, assim, aproveita a informação do *trailer* para o monitoramento da rede e descarta o quadro. Percebe-se,

Tabela 2. Componentes desenvolvidos para o IED.

	GOOSEApp	Módulo que contém a aplicação geradora de tráfego de quadros <i>Etherframe II</i> com PDU correspondente às mensagens GOOSE. Por serem deste tipo, os quadros gerados tem o campo <i>ethertype</i> em 0x88B8. Adicionalmente, é possível configurar a prioridade e o VID, quando as regras do padrão IEEE802.1Q são necessárias. Seus parâmetros são: endereço de destino, tempo de inicialização, tempo de parada, intervalo de envio e tamanho da mensagem.
	MMSApp	Aplicação Cliente/Servidor para a transferência de mensagens MMS entre o servidor da subestação e os IEDs. Parâmetros: endereço IP de destino, porta e tamanho da mensagem.
	Layer8021Q	Módulo que implementa as funções básicas do padrão IEEE802.1Q. Remove ou coloca o cabeçalho 802.1Q (TPID e TCI). O comportamento desse módulo depende do tipo de quadro recebido. As mensagens GOOSE recebidas da rede são enviadas à <i>gooseApp</i> , enquanto que as solicitações ou respostas MMS são enviadas para a camada de rede para alcançar a <i>mmsApp</i> . Esse mapeamento depende do <i>ethertype</i> , o qual está disponível no conteúdo no quadro. Parâmetros: Ativo/inativo.
	Pcapper	Módulo que monitora o tráfego de entrada e saída e salva as informações em um arquivo <i>.pcap</i> . Esse modulo permite a verificação do formato correto dos quadros gerados. Parâmetros: Ativo/Inativo.

Tabela 3. Componente desenvolvido para a MU

	SVApp	Módulo que contém a aplicação geradora de tráfego de quadros tipo <i>Etherframe II</i> com PDU correspondente às mensagens SV. Por serem deste tipo, os quadros gerados têm o campo <i>ethertype</i> em 0x88BA. Adicionalmente, é possível configurar a prioridade e o VID, se for preciso usar o padrão IEEE802.1Q. Seus parâmetros são: endereço de destino, tempo de inicialização, tempo de parada, tamanho da mensagem e intervalo de envio, que depende da taxa de amostragem segundo os requisitos de desempenho estabelecidos na Norma.
---	-------	---

então, que esse protocolo oferece uma redundância em uma camada inferior da pilha de protocolos, evitando, assim, o processamento desnecessário de quadros em camadas de rede, transporte ou aplicação.

A Figura 4(b) reflete o modelo proposto para o OMNET++ de um DANP. Utiliza-se, para o caso, um gerador de tráfego *ethernet* que pode assumir o papel de uma *SVApp* ou uma *GOOSEApp*, descritas anteriormente. O principal bloco desse modelo é a LRE que implementa as funções básicas de funcionamento do protocolo PRP, duplicando as mensagens a serem enviadas e descartando as mensagens duplicadas recebidas.

5. Validação do modelo e resultados

Para verificar o funcionamentos dos dispositivos e módulos criados, foram montados três cenários. O primeiro é a rede de comunicação de um SAS para uma subestação de 220kV, que já foi simulada por Sidhu e Yin [Sidhu and Yin 2007]. O segundo cenário abrange uma série de simulações de rede híbrida (anel e estrela), na qual são aumentados o número de MUs e suas taxas de amostragem, representando a mesma falha para vários casos, para comparar o número de MUs que poderiam pertencer ao mesmo segmento de rede sem impactar negativamente a rede. No terceiro cenário são usados os módulos PRP e executados dois casos de falha nos enlaces de comunicação das redes que interconectam vários nós DANP. Para os três cenários se verificam os tempos de latência para avaliar se as topologias são viáveis ou não segundo o limite das mensagens GOOSE e SV.

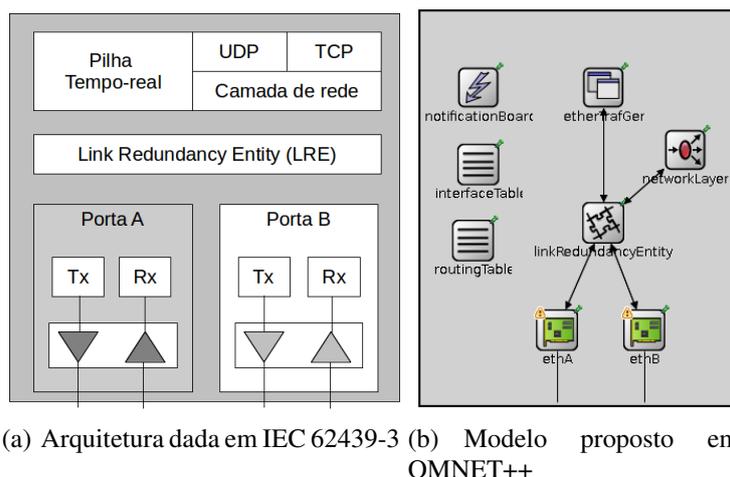


Figura 4. Dual Attached Node PRP (DANP).

5.1. Rede de comunicação para uma subestação de 220kV

Para verificar o funcionamento da modelagem e demonstrar o seu uso para avaliação de capacidade é montada a subestação usada em [Sidhu and Yin 2007]. Nela, são implementados dois vãos⁴ de transformadores (T1 e T2), seis vãos de alimentação (F1-F6) e um vão de barramento (S1).

Cada vão utiliza um *switch* e conectados a ele, os IEDs de proteção, os IEDs disjuntores e as *Merging Units*. T1 e T2 possuem 2 IEDs de controle, 2 IEDs disjuntores e uma MU. Os vãos F1-F6 utilizam 2 IEDs de controle, 1 IED disjuntor e 1 MU. Já S1 tem um elemento de cada tipo. Para separar o tráfego, cada vão tem sua própria rede VLAN. Os *switches* de cada vão estão interconectados em topologia estrela ao *switch* principal da subestação, o qual da sua vez tem conectado um servidor e uma estação de trabalho. O servidor troca informações com os IEDs de controle de cada vão usando MMS.

Todos os IEDs de controle por meio de seu gerador de tráfego IP (*IPBurst*), ativado aleatoriamente em vários instantes durante a simulação, enviam pacotes de 50 KB ao servidor. As MUs enviam informação por meio de mensagens SVs constantemente desde o início da simulação. Essas SVs de 98 Bytes são enviadas aos IEDs de controle do mesmo vão utilizando grupos *multicast* para omitir os IEDs disjuntores. Estabeleceu-se o tempo de processamento de cada *switch* em 10 us e o tempo de propagação em 50 ns. Simula-se uma falha da rede elétrica que faz com que os IEDs de controle do vão T1 enviem mensagens GOOSE durante 1 segundo aos IEDs disjuntores da mesma zona e aos IEDs disjuntores de S1. São medidas as latências para diferentes taxas de amostragem das MUs, como mencionado na norma IEC 61850.

Com base nos resultados mostrados na Figura 5 é possível ver que, para o cenário simulado, as latências das mensagens SV calculadas nos IEDs de controle têm valor menor para uma largura de banda de 100 Mbps, como era esperado devido à taxa de transmissão maior. Por outro lado, notou-se que o uso da *tag* de prioridade não impactou significativamente o resultado no contexto desse cenário, tendo em vista que as filas transmissão não foram saturadas, pois a separação do tráfego por meio de VLANs e grupos *Multicast* evitou uma inundação nos segmentos de rede simulados. Dessa forma, aumenta-se a capacidade de conectar mais dispositivos em cada *switch* como obtido por [Sidhu and Yin 2007] tendo em vista que os valores máximos de latência ainda são consideravelmente menores em relação ao limite de IEC 61850.

⁴Um vão é um segmento da rede elétrica que agrupa diferentes equipamentos primários e associados que visam ser protegidos. Um subsistema de proteção pode incluir um ou mais vãos, dependendo das necessidades.

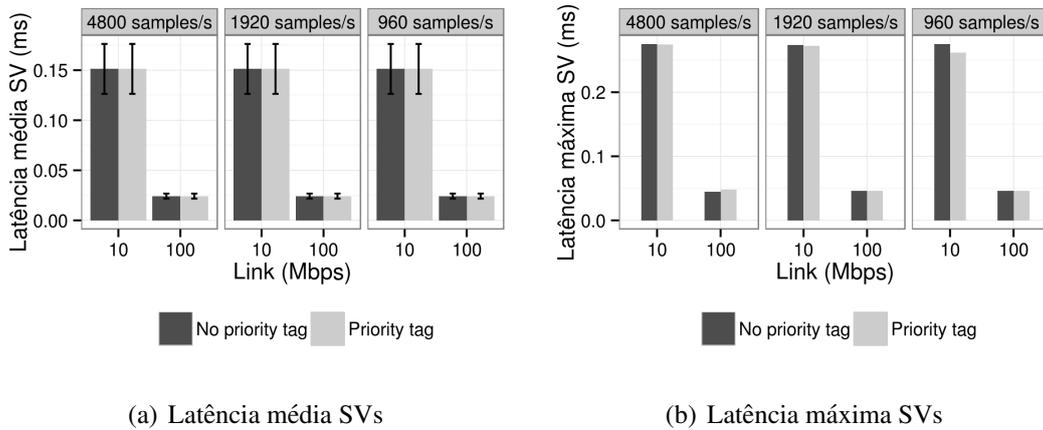


Figura 5. Latências de *Sampled Values* em IEDs de controle

5.2. Rede de comunicação híbrida anel-estrela

A modelagem realizada permite avaliar aspectos como a capacidade e a expansibilidade das topologias de rede. A título de exemplo, recria-se um cenário híbrido em anel e estrela, comumente usado em subestações, no qual existem de um a três segmentos de rede dados pelo número de vãos usados, ou seja, é simulado um sistema híbrido com um vão só (Zona 1), posteriormente é adicionada mais uma zona (Zona 2) e por fim é conectado mais um segmento de rede (Zona 3), todas simuladas sob as mesmas condições. Cada zona tem conectado dois IEDs de controle, dois IEDs disjuntores e um número variável de *Merging Units*. Com esses experimentos, objetiva-se descobrir o número máximo de MUs por zona, de acordo com as suas respectivas taxas de amostragem, de modo a garantir o requisito de 3 ms de atraso máximo, além de observar se o aumento de segmentos de rede mediante mais *switches* impacta negativamente o desempenho local de cada zona. Para aumentar a capacidade da rede o tráfego é limitado usando VLANs para cada zona (vão) e enviando as SVs em mensagens *multicast* aos IEDs de controle. A Figura 6 mostra o cenário apresentado.

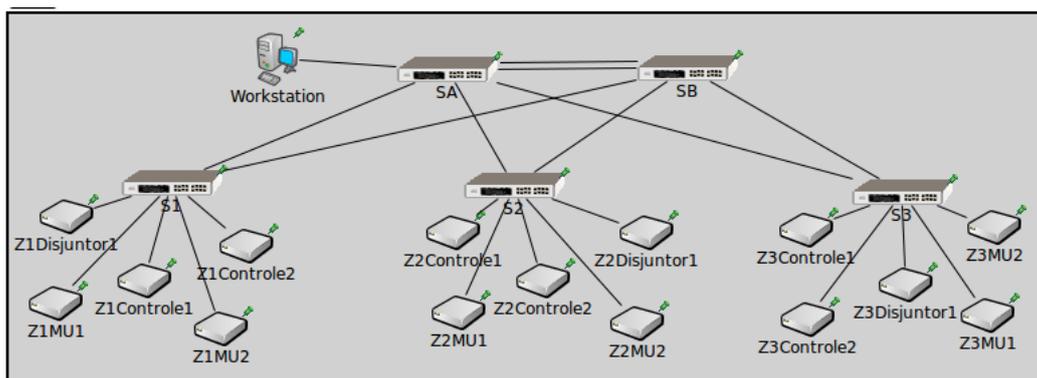


Figura 6. Topologia de rede híbrida Anel-Estrela

Cada MU envia mensagens SV aos IEDs de controle, estes, por sua vez, enviam mensagens GOOSE aos IEDs disjuntores. Uma falha simulada no sistema elétrico faz com que os IEDs de controle enviem mensagens GOOSE com maior taxa aos disjuntores durante 1 segundo em intervalos de 1 ms. Os geradores de tráfego IP de cada IED de controle são ativados, aleatoriamente, várias vezes durante a simulação, enviando aos servidor 50KB. Os *switches* usados, além de suportar o uso de VLANs e *Tag* de Prioridades dados pela IEEE 802.1Q-2005, implementam RSTP para cuidar da topologia.

São medidas as latência média e máxima mostrados nas Figuras 7 e 8 respectivamente. O eixo x mostra a relação de quantas MUs estão conectadas por *switch*, ou seja, quantas estão no segmento de rede da cada. O eixo y representa a latência⁵. As colunas representam o número de zonas usadas (1, 2 e 3), e as filas as diferentes taxas de amostragem das MUs para enviar seus SVs.

Com base nos resultados mostrados nas Figuras 7 e 8, quando usada a taxa de amostragem inferior 960 e 1920, os tempos de latência médio e máximo estão dentro da faixa permitida pela norma (3 ms). Percebe-se que apesar de aumentar a quantidade de zonas (segmentos de rede), as latências dentro das zonas continuam estáveis e dentro do permitido, isto é, devido à separação do tráfego por meio das redes virtuais e da priorização. Por outro lado, quando usada uma taxa de 4800 amostras por segundo, o tráfego gerado pelas MUs inunda cada VLAN impactando negativamente o comportamento do sistema e extrapolando os tempos permitidos de atraso. Para este caso, constata-se que ao ter 3 MUs conectadas dentro do mesmo segmento de rede não há garantia de entrega das mensagens dentro dos limites estabelecidos pela Norma.

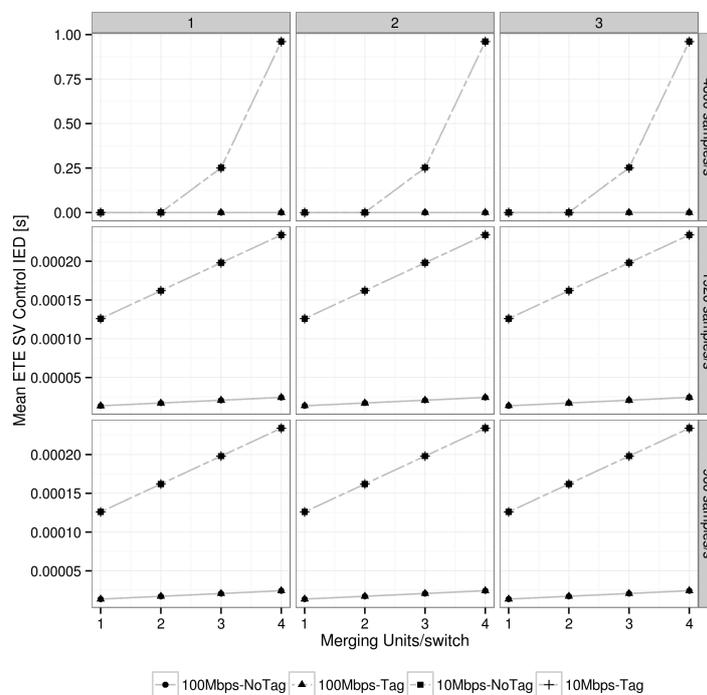


Figura 7. Latência média de Sampled Values em IEDs de controle

5.3. Redes de comunicação com suporte ao *Parallel Redundancy Protocol (PRP)*

Para validar o modelo do PRP foi projetada a topologia da Figura 9, na qual são utilizadas duas redes LAN *Ethernet* independentes (A e B). A essas redes estão conectados três nós DANP que enviam mensagens entre eles, a saber: DANP1 envia pacotes para DANP3, DANP2 para DANP1, e DANP3 para DANP2. Todos os pacotes tem 1KB de tamanho e são enviados em intervalos de 1 segundo. As duas redes *Ethernet* usam topologias diferentes, pois a LAN A segue uma configuração estrela, enquanto que a LAN B usa um anel. Os *switches ethernet* usam RSTP para cuidar de cada topologia considerando também a compatibilidade de PRP com este protocolo de recuperação.

⁵Os gráficos foram gerados com a ferramenta estatística R (Disponível em <http://www.r-project.org/>) e importando os dados das simulações mediante o pacote *omnetpp* para R (Disponível em <https://github.com/omnetpp/omnetpp-resultfiles>).

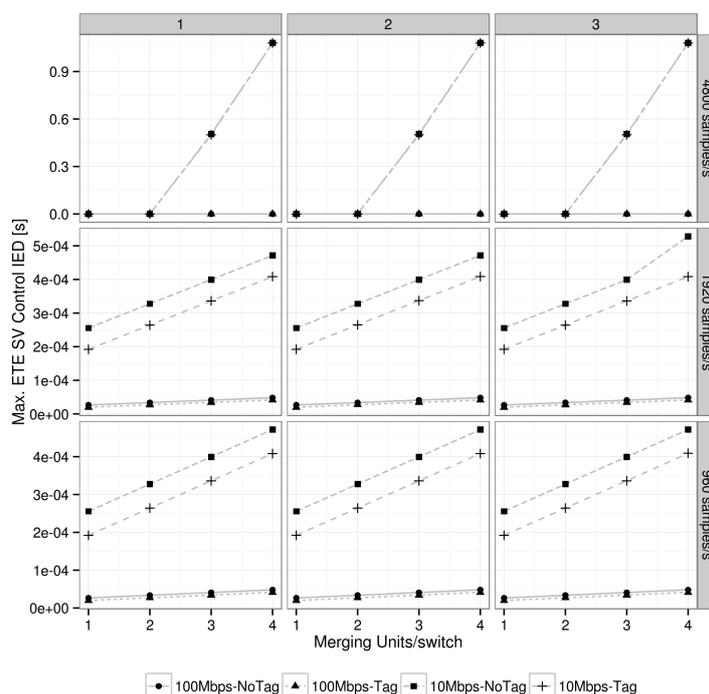


Figura 8. Latência máxima de Sampled Values em IEDs de controle

São simulados dois cenários de falha nos enlaces de comunicação. O primeiro caso é uma falha na conexão entre os *switches* S4 e S6, chamado de Falha 1. O segundo caso simula uma falha no enlace entre S1 e S2 e é chamado de Falha 2. Para a simulação desses cenários é usado o módulo de falha de canal de comunicação do OMNET++, descrito pela biblioteca *ChannelFailure*, o qual permite especificar o momento na simulação em que o enlace vai ser desativado e ativado novamente, caso seja desejado. O tempo total de cada simulação é 45s, com conexões de 100 Mbps.

A **Falha 1** na rede de comunicação é simulada entre 20 e 25 segundos de simulação e implica em uma queda na conexão entre os *switches* S4 e S6. Assim, os pacotes transferidos nessas portas são perdidos durante esse tempo. No entanto, o enlace pela LAN B continua ativo, o que significa que, apesar da falha, o nó continua enviando e recebendo informação por meio desta rede.

Segundo a parametrização desse cenário, cada nó envia 30 pacotes em cada LAN, ou seja, no receptor devem chegar 60 pacotes de dados, cada um de 1KB. A falha no enlace durante esses segundos na LAN A afeta a transferência entre o DANP1 e DANP2 e entre o DANP2 e DANP3. Apesar dessa perda na conexão, o DANP3 recebe pelo menos 1 dos pacotes duplicados por meio da LAN B, garantindo que a informação chegue ao destino e que o tempo de reparação da LAN A não impacte negativamente o funcionamento do sistema completo.

Para o caso da **Falha 2**, a conexão entre os *switches* S1 e S2 é interrompida aos 30 segundos de simulação e continua assim até o fim da simulação. Neste caso, o protocolo de recuperação e monitoramento de redundância RSTP usa o caminho alternativo (S1-S3) para enviar as informações. Dessa maneira, apesar da falha, a combinação entre PRP e RSTP permite que os nós em questão recebam a informação. No entanto, percebe-se que existe uma perda de pacotes com destinos DANP2 e DANP3 ocasionada pelo tempo que tarda a ativação do caminho alternativo.

Como não existe nenhum tráfego de fundo nesse caso na rede é possível notar que

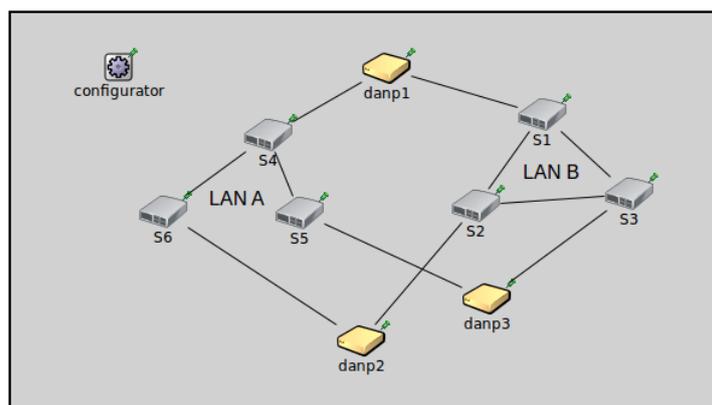


Figura 9. Topologia de rede usando PRP

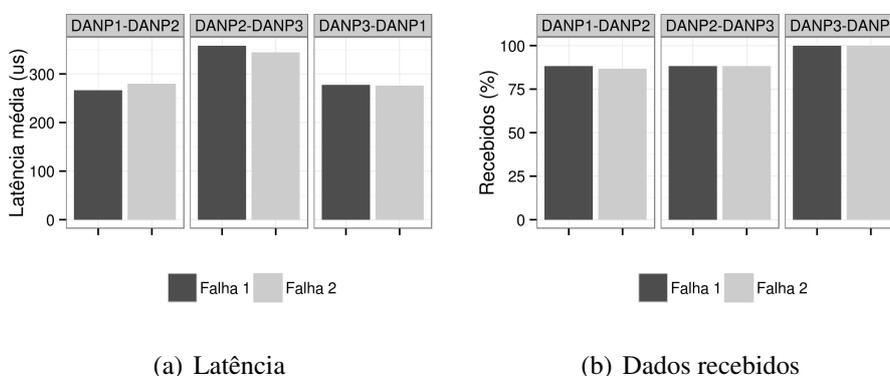


Figura 10. Latência e pacotes recebidos nos DNP

as latências médias dos pacotes estão dentro dos requisitos da norma IEC61850 para este tipo de mensagens.

A combinação de PRP com RSTP apesar de oferecer maior disponibilidade, ainda tem perda de pacotes ante falha na comunicação devido ao seu tempo de detecção e recuperação.

6. Conclusão

O presente trabalho mostrou e simulou a modelagem da rede de comunicação de uma subestação IEC 61850, com o fim de permitir a análise de capacidade da rede de dados, respeitando os limites de atraso impostos pela norma. Para tanto, foram implementados modelos para IED, MU e *Switch Ethernet* gerenciável, os quais são dispositivos usados nos sistemas de comunicação dos Sistemas de Automação de Subestações (SAS). Além disso, é introduzida a modelagem de um nó DNP para cenários baseados na Norma IEC 61850. Esses modelos são blocos desenvolvidos para a plataforma de simulação OMNET++, que permitem a avaliação de topologias de rede de SAS. Sabe-se que cada caso de automação de uma subestação depende das funções de proteção e controle e das condições diferentes de cada implementação, mas o presente modelo permite simular diferentes cenários de modo a obter uma análise melhor das possíveis topologias de rede.

Com base nos módulos propostos e implementados, mostrou-se um caso pontual de avaliação de uma topologia típica híbrida anel-estrela usada em sistemas de automação de subestações elétricas, ilustrando por exemplo, o número de MUs máximo suportado de forma a obedecer os parâmetros de latência máximos especificados na Norma.

O desenvolvimento do módulo DANP introduzindo o funcionamento de PRP em simulações permitirá a avaliação de topologias de rede bem próximas do modelo real das subestações, o que foi uma inovação do presente trabalho. Observou-se o comportamento de protocolos como RSTP e PRP trabalhando em conjunto e cuidando das arquiteturas de rede *ethernet*.

Percebe-se que o protocolo RSTP, apesar de ter tempos menores para a recuperação da topologia de rede que o seu antecessor STP, apresenta ainda um comportamento insuficiente para redes de alto desempenho.

Referências

- (2010a). Iec 61850 communication networks and systems for power utility automation.
- (2010b). *Industrial Communication Networks - High-availability Automation Networks*.
- Chen, A. (2008). Requirements for Ethernet networks in substation automation. (July):46–49.
- Giovanini, R. and Pereira, A. C. (2010). Uso de Ferramentas de Simulação para Avaliação de Diferentes Arquiteturas de Rede LAN baseadas na IEC 61850. In *X STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle*, pages 1–5.
- Juárez, J., Rodríguez-Morcillo, C., and Rodríguez-Mondéjar, J. A. (2012). Simulation of IEC 61850-based substations under OMNeT++. *Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation Tools and Techniques*.
- Liang, Y. and Campbell, R. H. (2007). Understanding and Simulating the IEC 61850 Standard. *Ieee Trans. On Power Delivery*, 22:1482–1489.
- Sidhu, T. and Yin, Y. (2006). IED modelling for IEC61850 based substation automation system performance simulation. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, page 7 pp.
- Sidhu, T. S. and Yin, Y. (2007). Modelling and Simulation for Performance Evaluation of IEC61850-Based Substation Communication Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3):1482–1489.
- Souza, B. A., Brito, N. S. D., Barreto, M. T., and Carmo, U. A. (2010). An IEC 61850 network simulator. . . . and *Exposition: Latin . . .*, pages 1–5.
- Thomas, M. and Ali, I. (2010). Reliable, fast, and deterministic substation communication network architecture and its performance simulation. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 25(4):2364–2370.
- Yang, S. H. and Yang, H. S. (2012). Performance Analysis of IEC 61850 based Substation. pages 854–858.
- Zhu, L., Dong, N., Duan, X., Chen, J., and Shi, D. (2007). Research on Digital Simulation Platform for Networked Substation. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pages 1–4.