

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise
de Desempenho de Sistemas de Comunicação
baseados na Norma IEC 61850**

Pedro Henrique Ferreira Machado

Itajubá, Fevereiro 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Pedro Henrique Ferreira Machado

**Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise
de Desempenho de Sistemas de Comunicação
baseados na Norma IEC 61850**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Automação e Sistema Elétricos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Luiz Edival de Souza

Fevereiro 2015
Itajubá - MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Pedro Henrique Ferreira Machado

**Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise
de Desempenho de Sistemas de Comunicação
baseados na Norma IEC 61850**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 24 de Fevereiro de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciência em Engenharia Elétrica**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Edival de Souza – UNIFEI (Orientador)
Prof. Dr. Guilherme Souza Bastos – UNIFEI
Prof. Dr. Eduardo Lorenzetti Pellini – USP

Fevereiro 2015
Itajubá - MG

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que nos fortalece e nos guarda em todos os momentos.

Agradeço meus pais, Mariana e Nelson, pelo apoio em cada decisão que tomei na vida. A pessoa que sou hoje, agradeço a vocês.

Agradeço também minha querida namorada, Mayara, pela paciência e apoio, estando sempre ao meu lado em todos momentos de necessidade.

Aos amigos, que sempre me incentivaram e apoiaram nos momentos bons e ruins de minha vida.

Meus agradecimentos vão também ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Edival de Souza, pelos ensinamentos, conselhos, exemplos, incentivo e orientação que me abriram portas e me trouxeram enorme conhecimento. Os agradecimentos são estendidos também aos professores Prof. Carlos Waldecir de Souza e Kléber Roberto da Silva Santos pelas discussões e apoio.

Agradeço a empresa SEL pela oportunidade de participar dos cursos de norma IEC 61850 que ajudaram enormemente na concepção deste trabalho.

Por fim agradeço a CAPES pelo apoio financeiro que me foi concedido e a empresa TANGARA ENERGIA que por meio do projeto de P&D APLEPED2393_PROJETO_PED_0003_S01 alavancou o tema desta dissertação e permitiu a abertura de novas portas para Ciência.

Resumo

O desempenho de sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850 tornou-se questão importante no Sistema Elétrico de Potência. Uma vez que os sistemas de automação dos sistemas de potência possuem tempo crítico de atuação, é necessário que os parâmetros de eficiência das redes de comunicação, como exemplo atrasos de mensagens, sejam examinados cuidadosamente.

Neste contexto, este trabalho de dissertação apresenta uma metodologia de desenvolvimento de modelos CPN a fim de avaliar o comportamento temporal de sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850.

Para isto, são caracterizados dois cenários IEC 61850 encontrados na literatura, um tratando das mensagens *Sampled Value* e outro tratando das mensagens GOOSE. Em seguida, utilizando o *software* CPN Tools, são criados modelos baseados nas arquiteturas dos cenários, utilizando métodos já conceituados no tema modelagem por Redes de Petri Coloridas, a fim de avaliar o desempenho destas arquiteturas.

De forma a alcançar o objetivo principal desta dissertação, que é definir este formalismo como uma nova ferramenta de avaliação dos sistemas de comunicação IEC 61850, são comparados os resultados obtidos no sistema real com o ambiente modelado. Com a comparação, fica evidente que os sistemas modelados possuem comportamentos semelhantes aos sistemas reais, e a modelagem CPN pode, perfeitamente, ser empregada neste contexto de análise de desempenho IEC 61850.

Palavras-chave: Análise de desempenho, IEC 61850, formalismo CPN, GOOSE, *Sampled Value*

Abstract

The performance of communication systems based on IEC 61850 has become an important issue in Electric Power System . Once the power system automation has time-critical operation , it is necessary a carefully examination of the communication networks parameters , for example message delays.

In this context , this dissertation will present the development of a methodology of CPN models to assess the temporal behavior of communication systems based on IEC 61850 .

For this , two IEC 61850 scenarios picked from literature are characterized , one dealing with Sampled Value messages and another dealing with GOOSE messages . Then, using the CPN Tools software , models are created based on the architectures of this scenarios, using well known methods of Colored Petri Nets modeling, in order to evaluate the performance of these architectures .

To achieve the main objective of this dissertation, which is set this formalism as a new assessment tool of the IEC 61850 communication systems, the results of the real system and modeled system are compared. By the comparison , it is evident that the modeled systems have similar behavior to real systems , and the CPN modeling can perfectly be used in this context of performance analysis of IEC 61850 communication systems.

Keywords: Performance Analysis, IEC 61850, CPN formalism, GOOSE, *Sampled Value*

Lista de Figuras

1	Componentes de latência em sistemas de comunicação	p. 7
2	Virtualização das informações do dispositivo real [25]	p. 16
3	Modelo hierárquico IEC 61850 [49]	p. 16
4	Nomenclatura IEC 61850 seguindo o modelo hierárquico [49]	p. 17
5	Modelo IEC 61850 da função de proteção de distância	p. 18
6	Liberdade de configuração IEC 61850	p. 18
7	Interfaces de comunicação [25]	p. 19
8	Comparação dos modelos OSI e TCP/IP	p. 20
9	Serviços de comunicação IEC 61850 segundo o modelo TCP/IP	p. 21
10	Perfil de envio das mensagens GOOSE [52]	p. 22
11	Comunicação horizontal GOOSE [2]	p. 22
12	Comunicação vertical MMS [2]	p. 23
13	Tempo de transferência [25]	p. 25
14	Elementos básicos de uma RdP ordinária	p. 27
15	Interface <i>software</i> CPN Tools	p. 30
16	Sintaxe gráfica do formalismo CPN	p. 30
17	Modelo visão global [40]	p. 32
18	Modelo CPN do Protocolo representando o emissor, a rede e o receptor [40]	p. 33
19	Modelo CPN Chegadas – transição de estados [40]	p. 34
20	Bancada de testes Ingram <i>et al</i> [7]	p. 36
21	Estrutura do analisador de tempo de latência [7]	p. 36

22	Modelo Visão Global	p. 38
23	Modelo da <i>switch</i>	p. 40
24	Modelo da <i>merging unit</i>	p. 42
25	Modelo do Analisador	p. 43
26	Modelagem IEC 61850 da função de proteção de sobrecorrente	p. 44
27	Arquitetura de proteção definida por funcionalidades	p. 45
28	Modelo do IED de Proteção	p. 46
29	Modelo do mecanismo de publicação GOOSE	p. 47
30	Modelo de mudança de estado	p. 47
31	Modelo do nó lógico PIOC	p. 48
32	Modelo do nó lógico PTRC	p. 48
33	Modelo IED Disjuntor	p. 49
34	Modelo IED Disjuntor	p. 49
35	Análise Temporal 21 MUs – bancada Ingram [7]	p. 52
36	Análise temporal de 21 MUs no modelo CPN	p. 54
37	Análise temporal 22 MUs – bancada Ingram [7]	p. 55
38	Análise temporal 22 MUs modelo CPN	p. 56
39	Perfil das mensagens GOOSE	p. 59
40	Atraso 1 – IED Proteção para IED Disjuntor	p. 60
41	Atraso 2 – IED Disjuntor para IED Proteção	p. 60
42	Tempo de <i>Round Trip</i>	p. 60

Lista de Tabelas

1	Modelos de Sistemas a Eventos Discretos	p. 4
2	Grupos de funcionalidades IEC 61850 [50]	p. 17
3	Interfaces de comunicação IEC 61850 de um SAS	p. 20
4	Tempos envolvidos no envio de mensagens GOOSE [12]	p. 57
5	Parâmetros estocásticos do modelo GOOSE CPN	p. 58

Lista de Abreviaturas e Siglas

CAN	<i>Controller Area Network</i>
CIM-XML	<i>Common Information Model – eXtended Markup Language</i>
CPN	<i>Colored Petri Net</i>
DA	<i>Data Attributes</i>
DMS	<i>Distributed Management System</i>
DO	<i>Data Objects</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LD	<i>Logical Device</i>
LN	<i>Logical Node</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>
ML	<i>Markup Language</i>
MU	<i>Merging Unit</i>
NCS	<i>Networked Control System</i>
RoQ	<i>Reduction of Quality</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SAP	<i>Systems, Applications and Products in Data Processing</i>
SAS	<i>Sistema de Automação de Subestações</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCPN	<i>Stochastic Colored Petri Net</i>
SED	<i>Sistema a Eventos Discretos</i>
SEP	<i>Sistema Elétrico de Potência</i>
SV	<i>Sampled Value</i>

TC *Transformador de Corrente*

TCP *Transmission Control Protocol*

TP *Transformador de Potencial*

Sumário

1	Introdução	p. 1
1.1	Considerações Gerais	p. 1
1.1.1	Sistemas a Eventos Discretos	p. 3
1.1.2	Sistemas de Comunicação IEC 61850	p. 5
1.2	Justificativas	p. 7
1.3	Objetivos	p. 7
1.4	Organização do Trabalho	p. 8
2	Revisão Bibliográfica	p. 9
3	IEC 61850	p. 14
3.1	Considerações Gerais	p. 14
3.2	Modelagem dos Dispositivos	p. 15
3.3	Mecanismos de comunicação	p. 18
3.3.1	Considerações Gerais	p. 18
3.3.2	GOOSE	p. 21
3.3.3	<i>Sampled Value</i>	p. 22
3.3.4	MMS	p. 23
3.3.5	Linguagem de Configuração de Subestação (SCL)	p. 24
3.3.6	Requisitos de Tempo	p. 24
4	Redes de Petri Colorida (CPN)	p. 27
4.1	Modelagem CPN	p. 27

4.2	Software CPN Tools	.....	p. 29
4.3	Exemplo de Modelagem	.....	p. 31
5	Propostas de modelagem CPN para análise de cenários IEC 61850		p. 35
5.1	Considerações Gerais	.....	p. 35
5.2	Modelagem de um sistema de transmissão de mensagens Sampled Values	.....	p. 36
5.2.1	Modelo Visão Global	.....	p. 37
5.2.2	Modelo Switch	.....	p. 39
5.2.3	Modelo MU	.....	p. 41
5.2.4	Modelo Analisador	.....	p. 42
5.3	Modelagem de um sistema de transmissão de mensagens GOOSE	.....	p. 43
5.3.1	Modelo do IED Proteção	.....	p. 45
5.3.2	Modelo do IED Disjuntor	.....	p. 48
5.4	Considerações Finais	.....	p. 49
6	Resultados e Análises dos Modelos CPN		p. 50
6.1	Análise de mensagens Sampled Value	.....	p. 50
6.1.1	Limites de capacidade	.....	p. 51
6.1.2	Cenário com 21 merging units	.....	p. 51
6.1.2.1	Sistema real	.....	p. 51
6.1.2.2	Sistema modelado	.....	p. 51
6.1.3	Cenário com 22 merging units	.....	p. 53
6.1.3.1	Sistema real	.....	p. 53
6.1.3.2	Sistema modelado	.....	p. 53
6.2	Análise de mensagens GOOSE	.....	p. 55
6.2.1	Sistema real	.....	p. 55
6.2.1.1	Sistema modelado – Parâmetros estocásticos	.....	p. 57

6.2.1.2	Sistema modelado – Simulações	p. 58
6.3	Considerações Finais	p. 61
7	Conclusão	p. 62
7.1	Conclusões Gerais	p. 62
7.2	Trabalhos Futuros	p. 63
Referências		p. 64
Apêndice – Artigo submetido ao INDUSCON 2014		p. 70

1 Introdução

Este capítulo contextualiza a proposta do estudo desenvolvido neste trabalho, apresentando o processo de automação do Sistema Elétrico de Potência (SEP), e a importância dos sistemas de comunicação neste processo. Contextualizam-se também a aplicação da norma IEC 61850 no SEP bem como a modelagem dos Sistemas a Eventos Discretos (SED). Apresentam-se ainda neste capítulo, as justificativas e os objetivos do trabalho, e no final dispõe-se o conteúdo dos próximos capítulos.

1.1 Considerações Gerais

O Sistema Elétrico de Potência (SEP), responsável pelo provimento de energia elétrica, é uma grande rede interconectada que entrega eletricidade aos consumidores. Consiste basicamente de estações de geração de energia elétrica (hidroelétricas, termoelétricas, parques eólicos, etc.), de linhas de transmissão de alta tensão que carregam a energia gerada nas distantes fontes para os centros de consumo e de linhas de distribuição que conecta a energia aos consumidores finais [1].

A grandiosidade e a complexidade do SEP criam oportunidades de incontáveis anormalidades no sistema que por vezes levam o sistema ao colapso causando faltas de energia e graves problemas a sociedade. Muitas das faltas de energia ocorrem justamente por problemas de conectividade entre os subsistemas da malha elétrica, sendo então estes problemas, fonte de discussão para engenheiros de proteção, controle, automação e atualmente de telecomunicações.

De forma a combater o risco iminente de falha nos sistemas de potência, as convencionais soluções do setor elétrico como sistemas especialistas, centralização de funções e individualismo de processos tem dado lugar a tecnologia dos microprocessadores, redes de comunicação e sistemas distribuídos. Neste cenário surge a necessidade de integração de sistemas que permitirá a troca de informações relevantes tornando a malha elétrica mais

eficiente, segura e inteligente [2].

Quando referido sobre este novo conceito de malha de energia elétrica, os mecanismos de proteção e os sistemas de automação são aspectos relevantes. Os conceitos de proteção convencionais são adequados para a proteção de um conjunto específico de elementos aos quais os parâmetros são estáticos e não é necessária a conexão com elementos externos. Isto não é suficiente se uma recomposição rápida de sistema for necessária. A automação da proteção de sistemas de potência precisa de configuração dinâmica dependendo do fluxo de carga, do tipo da falha e/ou do elemento protegido. Assim, dados de múltiplas fontes como centro de controle, outros dispositivos de proteção e equipamentos de medição são usados para permitir uma estimativa automática do estado do sistema garantindo ao mecanismo de proteção informações suficientes para contornar o processo de falha [3].

Conceituado em [4] e [5], as *Smart Grids* (contexto atual da malha elétrica), tem por definição mais abrangente, redes inteligentes de geração, transmissão e distribuição de energia com base na comunicação interativa entre todas as partes da cadeia de conversão de energia. As *Smart Grids* conectam unidades descentralizadas de geração, grandes e pequenas, com os consumidores evitando sobrecarga da rede, já que durante todo o tempo apenas é gerada tanta energia quanto o necessário [5].

Duas peças foram inseridas nesta atualizada malha elétrica, tida como inteligente. Os *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) e as redes de comunicação são peças fundamentais para a integração dos sistemas de potência uma vez que conseguem acompanhar o dinamismo da grande malha. Os IEDs estão inseridos nos barramentos de processo das *Smart Grids* e são equipamentos que possuem inteligência suficiente para fazer cálculos, monitoramento e tomada decisões rápidas e confiáveis. Enquanto isso, a rede de comunicação é a peça que interconecta os dispositivos IEDs entre si permitindo a troca de informações.

Mas para que as informações sejam trocadas de forma correta, confiável e eficiente, é necessária uma padronização da comunicação dos dados. Surge então a norma IEC 61850. Referenciada em [6], a norma IEC 61850 propõe padrões para os serviços e formatos dos dados trocados em uma rede de equipamentos do sistema elétrico.

A aplicação da norma IEC 61850 no conceito das *Smart Grids* é conhecido, contudo pouco se sabe do comportamento das redes de equipamentos, especialmente nos barramentos de processo com grande número de dispositivos (IEDs) trocando informações. Discutido em [7], estes comportamentos, ainda não pontuados, devem ser investigados a fim de propor redes mais seguras e confiáveis.

As redes de comunicação possuem caráter estocástico e dinâmico o que representa indeterminação no desempenho dos sistemas inteligentes. Neste contexto, surge a relevância deste trabalho que tem por objetivo desenvolver uma metodologia de análise de sistemas de comunicação, a fim de avaliar, conceituar e revelar pontos fundamentais na aplicação das redes de dados baseadas na norma IEC 61850 em sistemas reais. Para isso, utiliza-se uma estratégia de modelagem de Sistemas a Eventos Discretos definida como Redes de Petri Coloridas (CPN – *Colored Petri Net*), que será o instrumento de avaliação dos sistemas de comunicação.

Sendo assim, tem-se que este trabalho tem caráter de pesquisa exploratória. Diz-se exploratória, pois esta destina-se a investigar o uso do formalismo matemático de Redes de Petri Coloridas como uma nova solução de análise de desempenho de sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850, sugerindo para isso uma metodologia que inicialmente apresenta cenários de arquiteturas de teste IEC 61850 e que em seguida traduz estes cenários para o ambiente CPN, avaliando tais sistemas.

1.1.1 Sistemas a Eventos Discretos

Surgidos com a evolução das tecnologias de computação, comunicação e sensoreamento, sistemas tecnológicos altamente complexos como redes de comunicação, sistemas de manufatura automatizados e sistemas de controle integrados possuem sua dinâmica dirigidas por eventos. Por exemplo, o apertar de uma tecla, o ligamento de um equipamento, o envio de pacotes de mensagens, falhas de equipamentos, perda de pacotes de mensagens, etc. Por tal motivo, o arsenal matemático centrado nas equações diferenciais e a diferenças é inadequado ou simplesmente inapropriado para a modelagem destes sistemas. Deste modo, a crescente complexidade dos sistemas e a consequente necessidade de métodos poderosos para melhorar os procedimentos de projeto, evitando falhas e maximizando desempenho, fazem surgir as técnicas de modelagem de Sistemas a Eventos Discretos (SEDs).

Um Sistema a Eventos Discreto é um sistema dinâmico discreto e dirigido a eventos, isto é, com espaço de estados discreto cuja evolução de estado depende inteiramente da ocorrência assíncrona de eventos discretos [8].

No contexto dos sistemas a eventos discretos não existe um formalismo matemático único que seja satisfatório para a consideração simultânea de aspectos presentes em todas as classes de problemas que se podem formular para os SEDs [9]. Em [8], os autores tornam explícito que há uma classificação dos sistemas em diversas categorias e a imple-

mentação de cada uma depende basicamente da perspectiva empregada para interpretar e compreender o sistema. A Tabela 1, proposta por [10], apresenta um resumo de alguns modelos existentes e os classifica segundo as características a seguir:

Tabela 1: Modelos de Sistemas a Eventos Discretos

	Temporizados	Não Temporizados
Lógicos	Lógica Temporal Redes de Petri Temporizadas	Autômatos Finitos Redes de Petri
Algébricos	Álgebra de Dióides	Processos Finitamente Recursivos Processos de Comunicação Sequencial
Desempenho	Cadeias de Markov Teoria de Filas GSMP e Simulação	

- Temporizados: Levam em conta o tempo de permanência nos estados;
- Não-temporizados: Interessam-se apenas pela sequência de estados;
- Lógicos: Analisam o comportamento lógico do sistema, respondendo a questões qualitativas. Em geral se preocupam com a estrutura lógica da evolução dinâmica do sistema. Podem ou não utilizar como ferramenta formal alguma sistema lógico (em geral não-clássico) havendo alguns modelos baseados em lógica temporal;
- Algébricos: Descrição através de equações algébricas, ou seja, buscam a obtenção de modelos para os sistemas discretos com as propriedades de síntese características dos modelos algébricos
- Análise de Desempenho: Tentam responder questões relacionadas ao desempenho (em geral temporizados). A maioria dos modelos mais antigos para sistema discretos, ou seja, aqueles baseados em simulação e em Teoria de Filas podem ser classificados desta maneira.

Dentre os modelos mais utilizados e classificados por [10], em [8] são destacadas e exploradas as seguintes resoluções: Autômatos, Álgebra de Dióides (Max-plus), Cadeias de Markov, Teoria de Filas e Redes de Petri. A modelagem segundo Autômatos, Álgebra de Dióides (Max-plus), Cadeias de Markov e Teoria de Filas possuem representações matemáticas poderosas que permitem a maximização de sistemas e avaliação de desempenho e lógica. Por exemplo, os Autômatos fazem a análise do determinismo e da ordenação sequencial do sistema aceitando ou rejeitando cadeias de símbolos, enquanto a Álgebra

de Dióides utiliza de equações algébricas de soma e produto a fim de caracterizar o sincronismo e dinâmica temporal do sistema. Além desta estrutura da Álgebra de Diódes, as Cadeias de Markov e a Teoria de Filas também desenvolvem estratégias de avaliação de desempenho, a primeira considerando análises probabilísticas e a segunda avaliando a formação de filas através de análises matemáticas sobre propriedades mensuráveis das filas.

Enquanto as resoluções acima apresentadas utilizam bases algébricas, a modelagem segundo Redes de Petri possui conotação matemática gráfica, através do uso de um grafo bipartido com dois conjuntos definidos, lugares e transições. Este formalismo clássico difundido em [11] permite de forma simples e intuitiva o desenvolvimento de representações dos SEDs.

Contudo, todas estas representações acima descritas, consideradas clássicas, possuem limitantes em suas representações. Os Autômatos estão limitados a sistemas com sequências determinísticas, a Álgebra de Dióides depende do sincronismo do sistema, a Teoria de Filas possui interpretação matemática apenas em sistemas com formação de filas e as Cadeias de Markov bem como as Redes de Petri (temporizadas ou não) possuem dificuldade de interpretação para sistemas de tamanhos industriais e complexos.

Sendo assim, para o estudo do sistema de comunicação tratado nesta dissertação, que possui complexidade, temporização, análise de lógica, formação de filas e seqüenciamento de eventos lança-se mão de um formalismo descendente das Redes de Petri (RdP), as Redes de Petri Coloridas que conecta o formalismo das RdP com as linguagens de programação orientadas a objeto. Com este formalismo e auxílio da plataforma de *software* CPN Tools, a interpretação e análise do Sistema a Evento Discreto é desenvolvida de forma rápida e intuitiva.

1.1.2 Sistemas de Comunicação IEC 61850

Os sistemas de comunicação são os componentes vitais para automação e controle de sistemas de potência elétrica, transportando informações de monitoramento, controle e proteção.

Novas tecnologias para medição e transferência de dados permitem melhorias significativas na operação dos sistemas de potência. Distribuição digital das medições simplifica sistemas de monitoramento, com enorme quantidade de sinais multiplexados em uma única conexão de dados. A flexibilidade das redes entre os dispositivos de campo e as

salas de controle facilita o processo de automação diferentemente de sistemas analógicos convencionais suprimidos em arquiteturas fixas e de difícil expansão.

A norma IEC 61850 é uma destas novas tecnologias aplicadas aos sistemas de potência elétrica. A norma foi introduzida há alguns anos atrás e sua primeira versão tinha apelo aos sistemas de comunicação apenas para a automação das subestações. Já a segunda edição possui apelo mais abrangente alcançando os sistemas de potência de forma completa (geração, transmissão e distribuição).

O sistema de comunicação baseado em IEC 61850 tem sido considerado fator fundamental para o aprimoramento da operação de sistemas de potência, aumentando a confiabilidade e diminuindo os esforços e tempo de instalação e manutenção [12].

Os sistemas de controle e proteção do SEP trabalham em uma perspectiva onde a confiabilidade, a velocidade e a coordenação das ações exigem altos níveis de desempenho.

Com a intenção de alcançar tais níveis de operação, o funcionamento do sistema de comunicação deve ser testado incessantemente. Avaliações da configuração do sistema, testes de interoperabilidade, entre outras questões referentes aos sistemas de comunicação, são categoricamente exigidos.

Estudos de análise de desempenho dos sistemas de comunicação IEC 61850 aplicados a proteção de sistemas de potência têm sido amplamente avaliados uma vez que estes possuem tempo crítico de atuação. Uma das condições mais importantes a serem avaliadas neste contexto, é a latência presente na transferência de mensagens críticas como GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) e *Sampled Value*.

A imprevisibilidade é o maior desafio no estudo de latência dos sistemas de comunicação [13]. Os atrasos são categorizados em constantes e aleatórios como mostrado na Figura 1. Os constantes são determinados pelas especificações dos elementos da rede (nós – IEDs) e pelo atraso de propagação (*link* de comunicação e dispositivos de interconexão – *switches* e roteadores). O atraso aleatório é determinado pelo tráfego em certo período de tempo.

A latência mais comumente conhecida nas redes de comunicação é associada a velocidade de propagação do sinal no meio, contudo na automação do SEP, o atraso nos *links* de comunicação (parte física) tem importância menor que outros fatores, como aqueles associados com protocolos, reconhecimento de mensagens, e processamento dos dispositivos. Isto ocorre porque as distâncias que o sinal precisa viajar para intercambiar dados são pequenas (redes LAN – *Local Area Network*). Deste modo, para a avaliação dos atra-

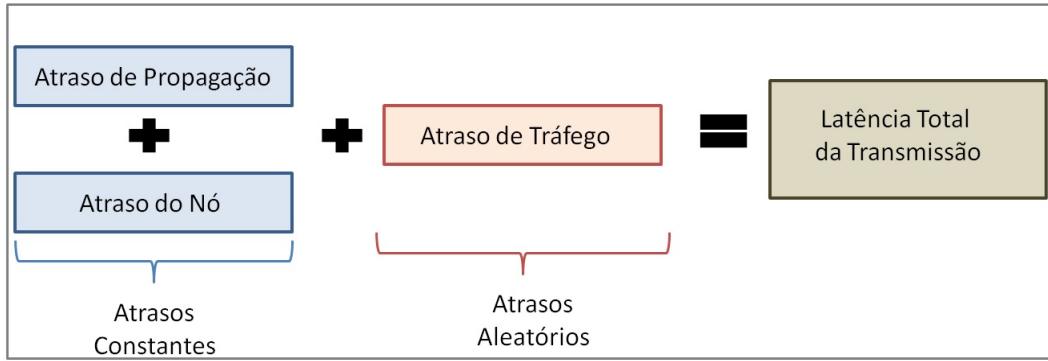


Figura 1: Componentes de latência em sistemas de comunicação

sos no sistema de comunicação IEC 61850, o tempo de processamento dos nós e o atraso de tráfego são os únicos a serem considerados. A análise da latência dos sistemas de comunicação IEC 61850, será melhor discutida nos Capítulos 5 e 6.

1.2 Justificativas

Investigar soluções que diminuam os riscos de falha de comunicação bem como a criação de uma estratégia para modelar e encontrar pontos críticos no sistema de comunicação são extremamente válidas.

A modelagem, neste sentido, permite uma prévia avaliação do sistema. Por exemplo, é possível prever algumas condições que só seriam sentidas em um processo de colapso do sistema elétrico. Outras condições podem facilmente ser testadas como, ampliação de rede, mudança de arquitetura de rede, reconfiguração de dispositivos e assim por seguir. Este trabalho destina-se ao uso da ferramenta de modelagem Redes de Petri Coloridas para validar sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850.

Na literatura, alguns trabalhos evidenciam a pertinência das CPNs na modelagem de sistemas de comunicação. Em [14], faz-se uma análise do atraso de mensagens nos sistemas de controle baseados em redes. Já em [15], as formulações baseadas em CPN são utilizadas para validar o tempo de transferência de mensagens entre os nós lógicos definidos na norma IEC 61850.

1.3 Objetivos

Em linhas gerais, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de análise de desempenho utilizando o formalismo matemático das Redes de Petri Coloridas,

buscando resultados que expressem significativa contribuição no cenário de avaliação de sistemas IEC 61850

Nos capítulos a serem apresentados, tem-se a especificação de alguns objetivos secundários que norteiam esta dissertação:

- Apresentação de cenários de teste de redes de comunicação utilizando IEC 61850;
- Desenvolvimento de modelos em CPN representando os cenários IEC 61850;
- Análise e comparação de desempenho dos cenários IEC 61850 reais com os modelos;
- Comprovação da utilização da ferramenta CPN na modelagem de redes de comunicação;

1.4 Organização do Trabalho

A dissertação está estruturada em sete capítulos na seguinte disposição. No Capítulo 2, faz-se o levantamento bibliográfico ressaltando os trabalhos e publicações que tratam das linhas de pesquisa abordadas neste trabalho. Em seguida, no Capítulo 3 é apresentado o primeiro grande tema deste trabalho, a norma IEC 61850. Abordam-se os conceitos relacionados aos tipos de mensagem da norma, os requisitos temporais, a modelagem de comunicação, a virtualização de funções, protocolos e outras diretrizes da norma. O Capítulo 4 trata do segundo tema que sustenta esta dissertação, a modelagem em Redes de Petri Coloridas. Neste capítulo, o formalismo matemático desta ferramenta e alguns exemplos de seu funcionamento são apresentados a fim de elucidar tal mecanismo de modelagem. Seguindo com a estrutura, no Capítulo 5 é desenvolvida a metodologia de modelagem dos sistemas de comunicação baseados nos modelos IEC 61850. São descritos os modelos que representam arquiteturas IEC 61850 reais. Os resultados das análises de desempenho e as comparações dos cenários reais e modelados são apresentados no Capítulo 6. Finalmente, o Capítulo 7 traz as considerações finais do trabalho, ressaltando as avaliações sobre a metodologia utilizada e os resultados obtidos, bem como as contribuições desta dissertação e as futuras pesquisas decorrentes deste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

O objetivo deste capítulo é apresentar uma visão geral das pesquisas desenvolvidas envolvendo os temas desta dissertação. Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica tratando dos sistemas de controle por rede (NCS – *Networked Control System*). Em seguida, são apresentados trabalhos que tratam da norma IEC 61850. Por fim, são destacadas pesquisas que utilizam a ferramenta de modelagem CPN.

O tema “desempenho de sistema de controle baseados em redes” (NCS – sigla em inglês) é abordado em inúmeros trabalhos de pesquisa que, de forma sistemática, buscam avaliar os distintos comportamentos temporais dos equipamentos inseridos neste cenário.

Todo sistema baseado no controle por rede busca avaliar e otimizar os parâmetros de desempenho da comunicação, a fim de que o sistema opere dentro de uma faixa de requisitos temporais aceitáveis.

Para tanto, em [16] é apresentado e discutido uma visão geral e as tendências de pesquisa dos sistemas NCSs. Algumas das tendências apresentadas são as análises de atraso, e a perda de pacotes e avaliação da largura da banda de rede. Já em [17], é feita uma apresentação e uma avaliação das redes *wireless* aplicadas aos sistemas de controle. O trabalho desenvolvido em [18] avalia os efeitos que os atrasos de rede impõem a sistemas reais. A pesquisa feita em [19] propõe o desenvolvimento de uma ferramenta baseada na plataforma de gestão SAP (*Systems, Applications and Products in Data Processing*), para aquisição e tratamento de dados dos sistemas de controle baseados em rede, com o propósito de avaliar o desempenho da rede. O formalismo matemático das Redes de Petri Coloridas e as Cadeias de Markov são apresentados em [20] e [14], como novos métodos para avaliação dos sistemas NCSs.

As pesquisas anteriormente citadas fazem avaliações individuais dos equipamentos, diferentemente de [21] onde a avaliação é feita em um cenário de múltiplos servidores e múltiplos clientes, aproximando-se melhor da estrutura real do sistema de controle por rede. Assim sendo, resultados mais expressivos são revelados.

O crescente número de pesquisas feitas sobre os sistemas de controle baseados em redes é um reflexo da atual necessidade da tecnologia de informação em todos os setores produtivos. Nos sistemas elétricos de potência esta imposição não é diferente. Para os processos de controle, monitoramento e proteção, os antigos sistemas baseados em conexão ponto a ponto e controle centralizado, dão espaço a sistemas teleoperados, descentralizados e baseados na comunicação em rede.

Neste contexto, apresenta-se o processo de automação das subestações, o qual é fundamentado no efetivo uso dos sistemas de comunicação. Inúmeros protocolos de comunicação foram desenvolvidos a fim de interligar os dispositivos em uma subestação. Contudo, esta diversidade de protocolos levou a um problema constante no setor industrial, que agora também faz parte da conjuntura do setor elétrico de potência, a interoperabilidade.

Desta forma, a padronização surge como uma parte primordial na solução deste problema. A norma IEC 61850, resultado de muita pesquisa e discussões no setor elétrico, permitiu a redução na diversidade e na complexidade das soluções de automação neste ambiente. Mesmo após longos anos de desenvolvimento, a IEC 61850 tem sido fonte de infindáveis trabalhos de pesquisa, uma vez que suas diretrizes carregam certa subjetividade como definição de nós lógicos genéricos, topologias de rede e ferramentas de configuração. Sendo assim, no trabalho aqui desenvolvido, a comunicação sobre norma IEC 61850 é o objeto de estudo.

No trabalho produzido em [22], é destacada a atual condição dos sistemas de potência, ressaltando a crescente integração via norma IEC 61850. Nas pesquisas desenvolvidas em [23] e [24], tem-se uma breve apresentação da pertinência do estudo das novas tecnologias aplicadas ao setor elétrico, evidenciando as conceituações e aplicações da norma.

Sendo a padronização sugerida pela norma IEC 61850 fundamentada nos sistemas de controle baseados em rede, um dos principais problemas levantados é justamente o desempenho temporal da rede e de seus equipamentos em dadas circunstâncias. Surgem então diversas pesquisas avaliando tempo de transferência de mensagens, perda de pacotes, armazenamento de pacotes, topologias de redes, descentralização de funções e taxa de transferência de dados. Estes estudos seguem três correntes básicas de investigação: teórica, simulada e prática.

As conceituações teóricas da norma são apresentadas em [25, 26, 27, 28]. Em resumo, estes trabalhos tratam dos sistemas que aplicam o padrão, bem como suas implementações nos sistemas reais.

Nas investigações simuladas, uma ferramenta bastante conhecida é a modelagem no *software* OPNET que permite analisar diversas configurações de rede. Resultados interessantes foram alcançados utilizando tal ferramenta. Em [29] são apresentados modelos que representam as interfaces de comunicação dos IEDs e são feitas simulações a fim de validar tais modelos. Estas simulações e investigações sobre a análise de desempenho das redes baseadas na IEC 61850 são abordadas também em [30, 31, 32, 33, 34]. Com diferentes proposições de estudos, estes trabalhos possuem variações entre seus modelos OPNET, o que garante legitimidade e individualidade entre as pesquisas. Contudo, nos trabalhos apresentados, esta ferramenta de modelagem não se mostrou capaz de descrever a norma IEC 61850 em todos os seus critérios de funcionalidades, pois os algoritmos e mecanismos inseridos nos nós lógicos não foram inseridos aos modelos.

Outra ferramenta utilizada na análise de desempenho é o simulador digital de tempo real (RTDS – *Real Time Digital Simulator*), o qual permite condicionar os experimentos em cenários que emulam condições reais de funcionamento. É possível simular faltas, testar algoritmos e mecanismos de controle e proteção, avaliando ainda o desempenho das redes de comunicação. Nos trabalhos [35] e [36] são demonstradas as arquiteturas para o desenvolvimento da análise das redes IEC 61850. Nestes trabalhos bem como em [37], são apresentadas avaliações de desempenho de rede, dando destaque para o último, onde é apresentado o uso do RTDS em testes de teleproteção. O limitante apresentado no RTDS são os cartões de simulação IEC 61850, pois para sistemas de escala industrial são necessárias inúmeras interfaces de comunicação.

Para uma completa análise de desempenho de sistemas IEC 61850, é crucial o comissionamento do sistema. Checar as condições práticas de funcionamento de cada conexão e de cada equipamento da rede é fundamental. Lança-se mão mais uma vez de ferramentas que permitam a avaliação desta comunicação. A ferramenta de teste da Omicron ¹ é amplamente utilizada para simular eventos de subestação e medir os tempos de transferência de pacotes na rede. Em [38], esta ferramenta é usada para testar e medir as mensagens GOOSE em equipamentos de proteção. Nesta mesma concepção, [12] apresenta uma metodologia para o cálculo do atraso das mensagens GOOSE usando a maleta de testes da Omicron ajustada para medir o tempo de *Round Trip*. No trabalho desenvolvido em [39], esta ferramenta de teste é proposta com a finalidade de testar a interoperabilidade dos diferentes fabricantes de relés de proteção (IEDs) e verificar o tempo de transferência de mensagens.

¹ Empresa de desenvolvimento de equipamentos para testes de proteção e automação de sistema elétricos de potência (<https://www.omicron.at/>).

Todo este levantamento das pesquisas sobre a norma IEC 61850 foi necessário para verificar os principais problemas da modernização dos sistemas elétricos de potência, e pelo exposto, percebe-se que a análise de desempenho das redes de comunicação é ponto importante na implantação da norma.

O formalismo das Redes de Petri Coloridas (CPN) é amplamente aplicado na área de análise de desempenho de redes de comunicação. Lógica de protocolos, temporização de mensagens, atraso de pacotes são estudados a partir de modelos CPN.

Destacado em [40], muitas pesquisas preocupam-se com o uso de métodos formais para a análise de desempenho. A maioria dos trabalhos foca no uso de métodos sofisticados para geração e análise de modelos, como cadeias de Markov. Uma vantagem do uso destes métodos é que as respostas são, em certo grau de abstração, precisas. Contudo, mesmo para sistemas com configurações pequenas, a análise de desempenho é dificultada pelo fenômeno conhecido como explosão de estados, muito comum aos ambientes de simulação. Ainda em [40], é discutida a relevância do uso das Redes de Petri Coloridas como um método adequado para a modelagem e análise de sistemas complexos de larga escala, uma vez que permite a criação de modelos hierárquicos, informação de tempo e livre interpretação.

Os trabalhos [41] e [42] tratam da modelagem CPN na avaliação de sistemas de comunicação de trens definido na norma IEC 61375. Os artigos apresentam análises de desempenho baseados em testes feitos na plataforma de modelagem CPN Tools. Segundo esta linha, apresenta-se [43], no qual a avaliação de desempenho é feita sobre o protocolo CAN (*Controller Area Network*). Destaca-se ainda, um trabalho que trata de uma modelagem utilizando Redes de Petri para representar uma arquitetura de rede de comunicação para sensores sem fio [44].

Para analisar as características de tempo de resposta e verificar os mecanismos de defesa em sistemas de rede sob ataque de redução de qualidade (RoQ – Reduction of Quality), em [45] os modelos CPN são utilizados.

Em [15], são sugeridas as Redes de Petri Coloridas como formalismo necessário para a avaliação do desempenho das redes baseadas na norma IEC 61850. Contudo, a pesquisa não implementa os modelos, apresentando somente uma maneira de calcular alguns dos parâmetros para análise de desempenho.

Pelo o que foi avaliado no levantamento bibliográfico, percebe-se que os modelos CPN são ferramentas interessantes, pois estes permitem não somente a análise do comporta-

mento do sistema de comunicação, mas também a implementação das lógicas de processamento que estão inseridas nos nós lógicos definidos na norma, algo ainda não explorado.

3 IEC 61850

Neste capítulo são apresentadas as principais características e diretrizes da norma IEC 61850, abordando sua estrutura, fundamentos e aplicação.

3.1 Considerações Gerais

A integração de sistemas elétricos de potência por meio de redes de comunicação é uma real vantagem na malha elétrica atual, pois permite solucionar problemas típicos das estruturas convencionais, tais como problemas de interoperabilidade de protocolos e redes, problemas de manutenção, conversores de protocolos, e assim por diante.

Em 1995 surgiram os primeiros esforços para padronizar a integração dos sistemas do setor elétrico. Duas frentes iniciaram este processo. Uma representava os interesses da *Electric Power Research Institute* (EPRI – EUA) e a outra representava os interesses da *International Electrotechnical Commission* (IEC – França) [46]. A EPRI montou um conjunto de especificações nomeado *Utility Communications Architecture* (UCA) e a IEC elegeu grupos de trabalho (10, 11 e 12)² do Comitê Técnico TC 57 para desenvolver um projeto de padronização. Após anos de desenvolvimento e estreitamento destes grupos de pesquisa, em 2002 surge um padrão internacional para as arquiteturas de comunicação dos sistemas elétricos de potência denominado IEC 61850.

A norma IEC 61850 é um padrão internacional que define a forma de comunicação e serviços entre os diferentes equipamentos presentes na automação de sistemas elétricos de potência [25]. Ela modela a interconexão dos elementos de automação, representando em um plano lógico todos os elementos envolvidos na comunicação do sistema. A norma possui um conjunto de funções que interoperam de forma distribuída, podendo estar alocadas em um ou mais IEDs conectados em rede. Este princípio é usado para integrar funções de medição, de controle e proteção. No contexto físico, isto possibilita a substituição dos

²De 1995 a 2003, WG (*working group*) 10 da TC 57 em cooperação com WG 11 e 12, participaram da elaboração e manutenção dos documentos da norma IEC 61850 (<http://www.tc57wg10.info/>)

cabos de controle por redes de comunicação, reduzindo o custo global no comissionamento, na engenharia, no monitoramento, na manutenção e no diagnóstico [47].

Alguns benefícios obtidos pelo uso da norma IEC 61850 são citados em [39], tais como:

- Diminuição dos esforços de integração, uma vez que existe uma padronização dos equipamentos e interfaces de comunicação, independente do fabricante;
- Comunicação direta com sistemas EMS/DMS/SCADA eliminando dispositivos de intercomunicação (RTUs e Gateways);
- Acesso direto a todos os pontos de um sistema de potência, remota ou localmente;
- Solução distribuída que substitui os sistemas RTUs centralizados aumentando a confiabilidade do sistema;
- Livre alocação das funções nos IEDs, oferecendo maior flexibilidade;
- Solução *plug and play*, permitindo futuras expansões de planta;
- Significativa redução de custo de implementação, engenharia, integração, comissionamento e manutenção.

3.2 Modelagem dos Dispositivos

A troca de informações requer especificações para os modelos de dados que serão gerados pelos IEDs. A IEC 61850 usa o conceito de virtualização com a intenção de criar tais modelos de dados. Segundo [48], a virtualização permite a representação de aspectos reais na forma de informações virtuais que podem ser entendidas por outros dispositivos. A Figura 2 representa este processo.

O processo para virtualizar o mundo real é feito através de um modelo de orientação ao objeto. Este modelo decompõe as funcionalidades de um objeto real em pequenas entidades.

A estrutura do modelo de orientação a objeto envolve os seguintes conceitos:

- Classe: representa um conjunto de objetos com características semelhantes;
- Objeto (instância de uma classe): um objeto é capaz de armazenar estados através de seus atributos e reagir a mensagens enviadas a ele;

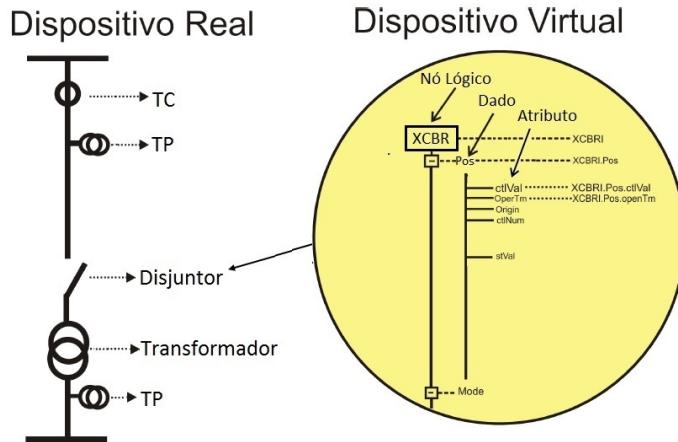


Figura 2: Virtualização das informações do dispositivo real [25]

- Atributos: são características de um objeto.
- Valores: o que cada atributo recebe.

Uma das facilidades que a norma cria em sua implementação está justamente em hierarquizar o sistema segundo os conceitos da orientação ao objeto [49]. Para isso a norma define dispositivos físicos, dispositivos lógicos, nós lógicos, dados e atributos dos dados. A Figura 3 permite uma melhor compreensão.

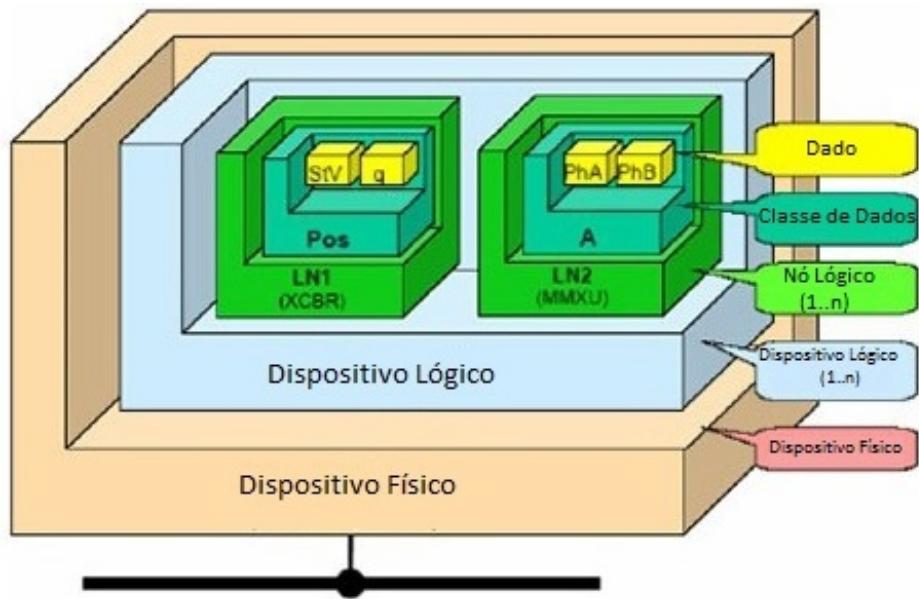


Figura 3: Modelo hierárquico IEC 61850 [49]

O dispositivo físico é o equipamento real (IED). Dentro de cada dispositivo físico pode haver um ou mais dispositivos lógicos. Cada dispositivo lógico indica o grupo de nós lógicos que estão inseridos em sua funcionalidade como mostrado na Tabela 2 [50]. Os nós lógicos por sua vez contêm um ou mais dados, compostos por seus atributos.

Tabela 2: Grupos de funcionalidades IEC 61850 [50]

Grupo	Função
A	Controle Automático
C	Controle Supervisionado
F	Blocos Funcionais
G	Função Genérica
I	Interfaces e Arquivamento
K	Equipamentos Mecânicos e Não-Elétricos
L	Funções do Sistema
M	Medição
P	Proteção
Q	Qualidade de Energia
R	Funções Relacionadas à Proteção
S	Sensores, Monitoração
T	Transformador de Instrumentos
X	Disjuntores e Chaves Seccionadoras
Y	Transformadores de Potência
Z	Outros Equipamentos do Sistema de Potência

A anatomia de um nome de um objeto de acordo com a IEC 61850 pode ser facilmente entendida seguindo o modelo hierárquico descrito. A Figura 4 identifica esta estrutura dos nomes.

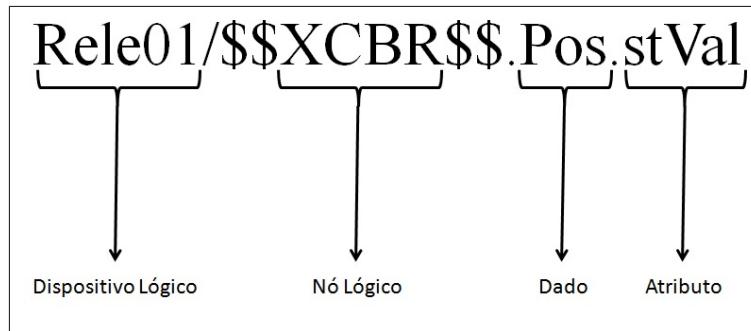


Figura 4: Nomenclatura IEC 61850 seguindo o modelo hierárquico [49]

Para a modelagem de um dispositivo real, como um transformador, disjuntor ou sensor, um conjunto de nós lógicos é definido a fim de virtualizar tal equipamento. Os nós lógicos são funções de alto nível que servem para controlar, monitorar e proteger o sistema. Por exemplo, a proteção de distância de uma linha de transmissão, é feita conforme o modelo apresentado na Figura 5.

Estes nós lógicos estão inseridos nos IEDs, que são dispositivos multifuncionais, ou seja, permitem disponibilizar suas funções segundo várias configurações. Define-se esta característica como liberdade de configuração, apresentado e discutido em [51]. Exem-

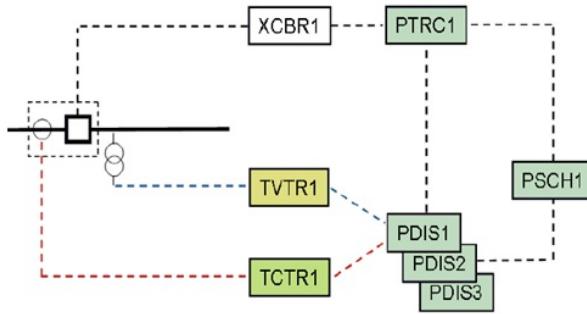


Figura 5: Modelo IEC 61850 da função de proteção de distância

plificando esta liberdade de configuração, o sistema pode ser configurado com um único IED com todas as funcionalidades dos nós lógicos inseridos, ou pode ter suas funções espalhadas entre inúmeros dispositivos (Figuras 6a e 6b)).

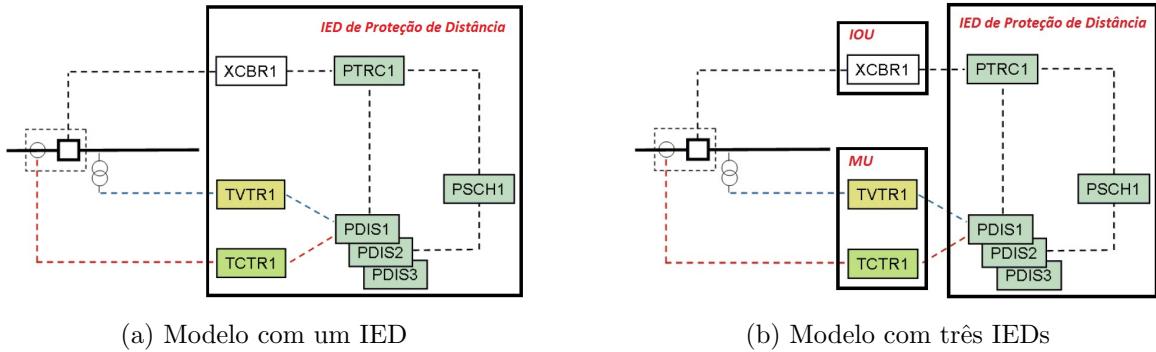


Figura 6: Liberdade de configuração IEC 61850

3.3 Mecanismos de comunicação

3.3.1 Considerações Gerais

Na parte 5 da norma IEC 61850 [25], recomenda-se estruturar o sistema de comunicação dos sistemas de potência elétrica em três diferentes níveis hierárquicos conforme é apresentado na Figura 7.

As definições e as características destes níveis também são melhores detalhadas em [25]. Em termos gerais a estrutura dos níveis é a que se segue:

- Nível de Processo: nível que trata as transmissões analógicas de tensão e corrente aquisitadas nos equipamentos primários, e a comunicação entre equipamentos de campo (sensores, atuadores, etc.);

- Nível de Vão (*Bay*): nível que trata dos equipamentos de proteção, automação e controle. Nesse nível há a troca de informações entre os IEDs, o que caracteriza a comunicação horizontal;
- Nível de Estação: nível que traz o mapeamento das camadas de comunicação TCP/IP, situando as interfaces locais (IHM) e as unidades centrais (UCS/Gateway) que se conectam com os centros de controle.

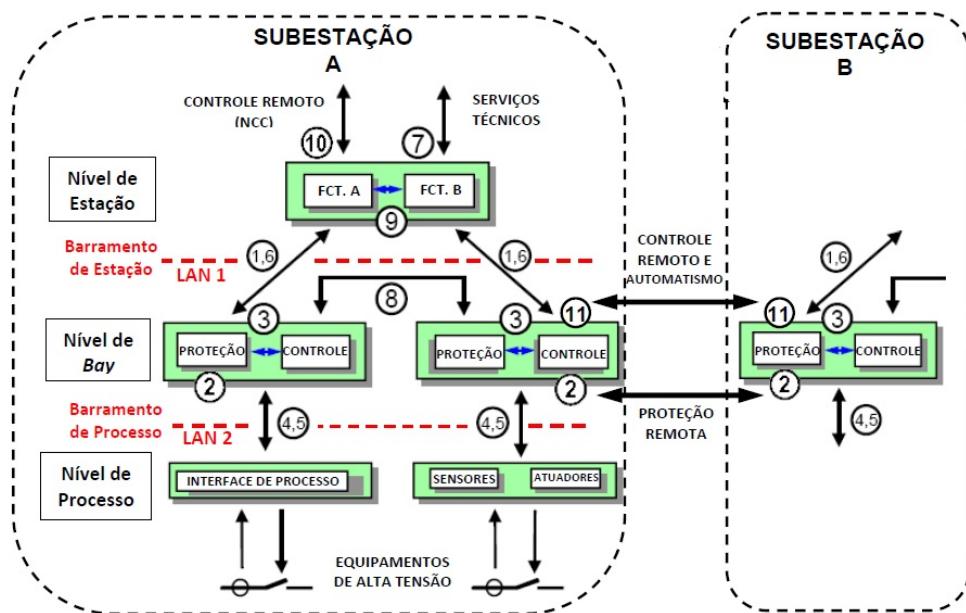


Figura 7: Interfaces de comunicação [25]

Estes níveis são separados por barramentos de redes locais (LAN), conforme mostra a Figura 7. O barramento de estação interconecta os níveis de estação e vão estabelecendo a comunicação vertical entre os centros de comando e os IEDs. Este barramento permite ainda a comunicação horizontal entre os IEDs inseridos no nível de vão. Já o barramento de processo está ligado diretamente com os equipamentos primários e de manobra. Este barramento permite a transferência de dados do campo aos equipamentos de proteção, controle e monitoramento garantindo informações suficientes aos sistemas de manobra.

As interfaces numeradas na Figura 7 descrevem os serviços aplicados aos níveis de comunicação do sistema de potência. A Tabela 3 detalha estes serviços.

Tratando ainda dos mecanismos de comunicação IEC 61850, o modelo de referência adotado para a estruturação de comunicação da norma é o TCP/IP. O nome TCP/IP vem dos nomes dos protocolos mais utilizados deste modelo, *Internet Protocol* (IP) e o

Tabela 3: Interfaces de comunicação IEC 61850 de um SAS

Interface	Funcionalidade
1	Troca de dados de proteção entre o nível de estação e o nível de vâo
2	Troca de dados de proteção entre subestações
3	Troca de dados entre dispositivos do mesmo vâo
4	Troca de valores amostrados dos Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP) entre o nível de processo e o nível de vâo
5	Troca de dados de controle entre o nível de processo e o nível de vâo
6	Troca de dados de controle entre o nível de processo e o nível de estação
7	Troca de dados entre o nível de estação e um ponto de monitoramento remoto dentro da mesma LAN
8	Troca de dados entre vâos (Função de Intertravamento)
9	Troca de dados entre dispositivos do nível de estação
10	Troca de dados de controle entre uma subestação e o centro de controle remoto
11	Troca de dados entre subestações

Transmission Control Protocol (TCP). Este modelo é baseado no modelo de camadas OSI, contudo com uma interpretação mais simples. A Figura 8 indica este comparativo.

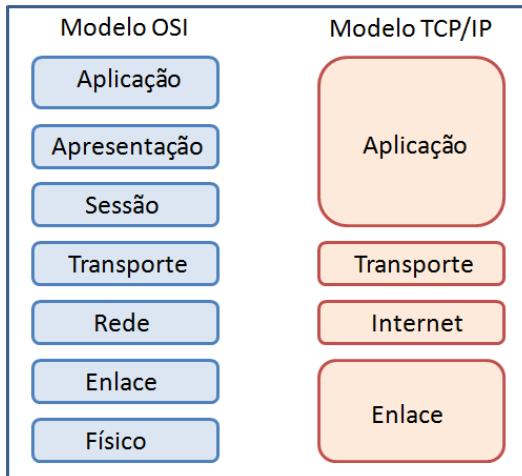


Figura 8: Comparação dos modelos OSI e TCP/IP

Como dito, o modelo TCP/IP é a referência para a norma IEC 61850 e, portanto, seus serviços de comunicação estão definidos em suas camadas. Na Figura 9, apresentam-se os serviços que utilizam a pilha TCP/IP e que são referidos na norma. Na sequência do capítulo, os três serviços de transmissão de dados no cenário IEC 61850 são definidos (GOOSE, *Sampled Value*, MMS).

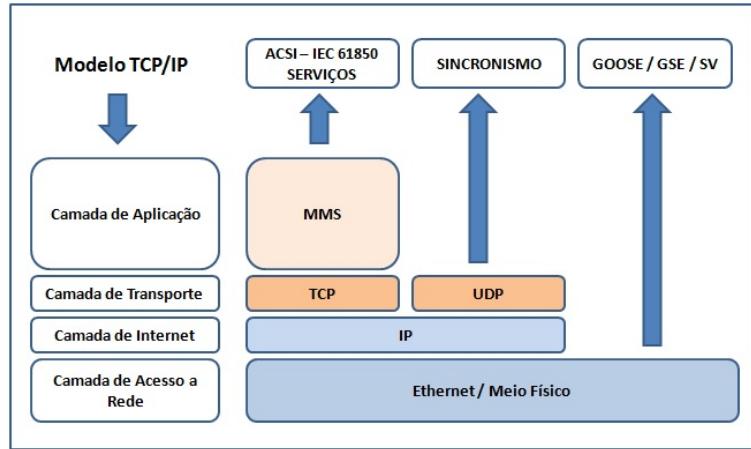


Figura 9: Serviços de comunicação IEC 61850 segundo o modelo TCP/IP

3.3.2 GOOSE

As mensagens do tipo *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) são mensagens de alta prioridade na transmissão. A GOOSE é uma mensagem orientada a eventos e seu disparo tem caráter não determinístico. Essas mensagens são aplicadas em funções de proteção e automação, onde o tempo de tomada de decisão é extremamente crítico.

Este tipo de mensagem possui aspectos importantes que permitem sua inserção em um cenário de tempo crítico. A GOOSE trabalha diretamente sobre a camada de enlace do modelo TCP/IP, ou seja, deve atravessar apenas uma camada, garantindo velocidade. Por trabalhar nesta camada do modelo TCP/IP, as mensagens GOOSE não possuem confirmação de entrega de mensagens aos seus destinatários. Sendo assim, para trazer maior confiabilidade na entrega das mensagens, o protocolo implementado pela GOOSE repete inúmeras vezes o mesmo pacote com a mesma informação, a fim de garantir que ao menos uma mensagem chegue ao destino final. A dinâmica do mecanismo de publicação das mensagens GOOSE é exemplificada na Figura 10.

O protocolo da GOOSE utiliza o modo *multicast* que permite a recepção da mensagem por múltiplos IEDs ao mesmo tempo. Neste contexto o modelo utilizado é o publicador/assinante [52]. A Figura 11 ilustra este tipo de comunicação definida como horizontal, na qual as mensagens correm em um mesmo nível de comunicação (barramento de estação). Em [53] uma análise mais detalhada sobre as mensagens GOOSE é apresentada.

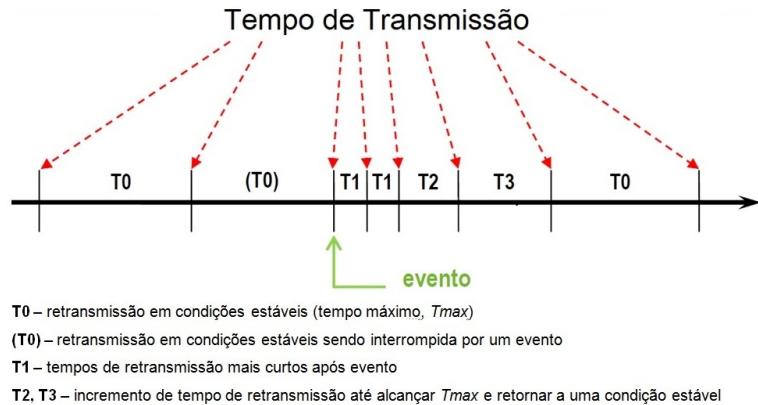


Figura 10: Perfil de envio das mensagens GOOSE [52]

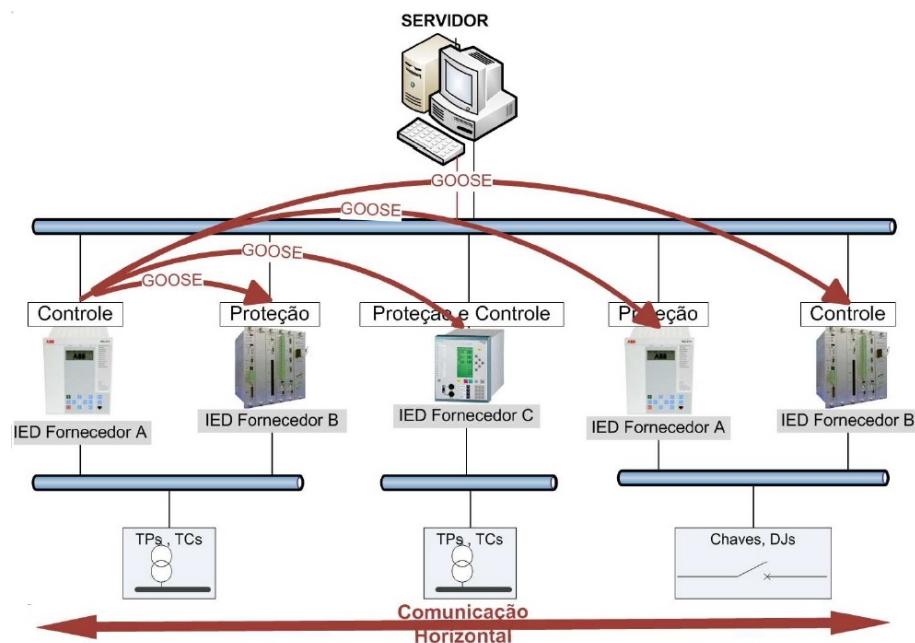


Figura 11: Comunicação horizontal GOOSE [2]

3.3.3 Sampled Value

Inseridas nos modos *unicast* ou *multicast*, esta mensagem é utilizada para enviar dados analógicos vindos dos medidores de corrente e tensão (TC e TP) para os equipamentos de proteção e controle.

A seção 9-2 da norma IEC 61850 especifica como valores amostrados devem ser transmitidos sobre uma rede Ethernet por meio de uma *merging unit* (MU) ou outro instrumento medidor com interface eletrônica [54].

As mensagens *Sampled Value* (SV), utilizam estrutura similar às mensagens GOOSE, utilizando a camada de enlace do modelo TCP/IP e o modelo de comunicação publicador/assinante, porém tem um mecanismo de publicação diferente. Enquanto a GOOSE

tem caráter não determinístico, dependente de eventos, as mensagens SV são determinísticas. A cada período de tempo, determinado pela frequência de amostragem do sinal e pela resolução temporal necessária para a conversão analógico-digital, uma mensagem SV é colocada na rede [7]. Isto causa aumento no tráfego e eventual perda de pacotes e conflitos de rede. Por tais motivos, as mensagens SV ainda são um desafio para a aplicação plena da norma IEC 61850.

3.3.4 MMS

As mensagens do tipo *Manufacturing Message Specification* (MMS) são definidas sobre o padrão da ISO 9506 para a comunicação em tempo real de dados de processo com os centros de controle supervisório [55].

A MMS é transmitida sobre a Camada de Aplicação do modelo TCP/IP, e por isso é utilizada para comunicação de tempo não-crítico, por exemplo os sistemas de aquisição de dados de um sistema SCADA. O modo de comunicação, diferentemente das mensagens GOOSE, é o cliente-servidor. Por tratar de uma comunicação entre níveis, vão e estação, tem-se que esta mensagem é categorizada como uma comunicação vertical. A Figura 12 ilustra este tipo de mensagem vertical, na qual as mensagens saem dos IEDs de proteção e controle e são direcionadas a um servidor da sala de controle.

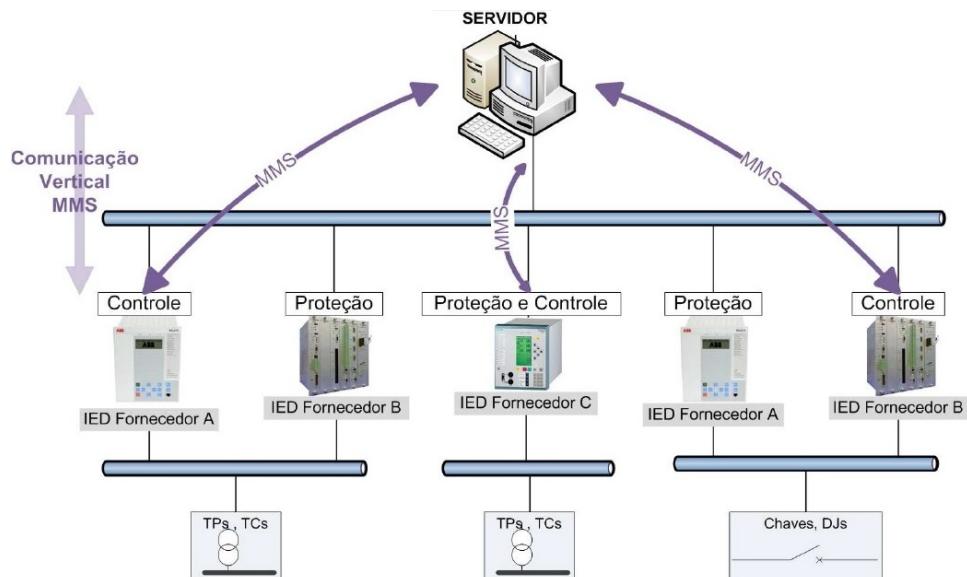


Figura 12: Comunicação vertical MMS [2]

3.3.5 Linguagem de Configuração de Subestação (SCL)

A linguagem definida como *Substation Configuration description Language* (SCL), apresentada na parte 6 da norma [56], incorpora os conceitos de herança e poliformismo presentes nas linguagens orientadas a objetos e, por conseguinte foi o padrão de linguagem adotado. Esta linguagem é baseada no modelo denominado *Common Information Model – eXtended Markup Language* (CIM–XML) o qual tem por fundamento a tecnologia desenvolvida no gerenciamento de sistemas computacionais distribuídos .

Discutido em [57], a importância da linguagem SCL é justamente padronizar a nomenclatura utilizada, uniformizando os tipos de dados e facilitando a troca de informações. Esta linguagem é usada para descrever o esquema unifilar, a rede de comunicação, as instâncias dos nós-lógicos e a sua associação com os equipamentos primários.

Todos estes padrões e protocolos são relevantes uma vez que, com eles, a norma permite documentar formalmente os processos de engenharia, assegurar a interoperabilidade entre IEDs e definir ferramentas de desenvolvimento comuns, garantindo então a integração dos sistemas.

3.3.6 Requisitos de Tempo

Na seção 5 da norma [25] é definido o tempo de transferência entre dois pontos como ilustrado na Figura 13. Em outras palavras, é o tempo gasto desde o instante que o dispositivo transmissor coloca a mensagem na parte superior de sua pilha de transmissão até o instante que o dispositivo receptor extraí os dados da sua pilha de recepção. O tempo de transferência t entre dois dispositivos físicos é composto pela soma dos tempos ta , tb e tc . Os tempos ta e tc correspondem aos tempos de codificação e decodificação dos quadros da mensagem em cada dispositivo, transmissor e receptor respectivamente. O tempo tb é o tempo de propagação do quadro no meio físico utilizado.

A partir deste conceito de tempo de transferência, as mensagens são classificadas. A norma divide as mensagens em dois grupos de classes de desempenho. O primeiro grupo é para proteção e controle e cobre três classes: P1 para distribuição de vão, P2 para transmissão de vão e P3 para transmissão entre vão com características de alto sincronismo e precisão. O segundo grupo é o de medição e qualidade de aplicação e cobre também três classes: M1 para a classe com precisão de 0,5, M2 para medidas com precisão 0,2 e M3 para medições com qualidade superior ao quadragésimo harmônico.

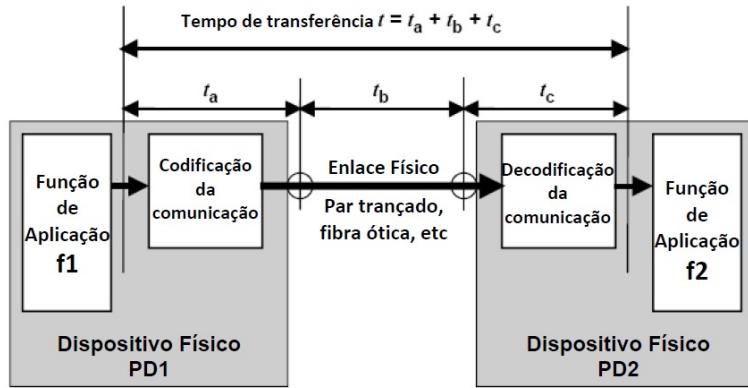


Figura 13: Tempo de transferência [25]

Além das classificações por classe, a norma define uma classificação por tipos de mensagens. A seguir, os tipos classificados na norma são descritos.

Tipo 1 – Mensagens de velocidade alta

Este tipo de mensagem tipicamente contém dados simples como exemplo comandos de *Trip* e intertravamento. O tempo de transmissão destas mensagens é dependente da classe de desempenho P1, P2 ou P3. A P1 tem tempo de transmissão de até 100 ms enquanto as classes P2 e P3 tem tempo de transmissão na ordem de 3ms.

Tipo 2 – Mensagens de velocidade média

Carrega informações de estados e medições simples r.m.s.. A restrição temporal destas mensagens é de até 100 ms.

Tipo 3 – Mensagens lentas

Transmissão de registros de eventos, leituras e mudanças de ajustes, alarmes e medições não elétricas. Tempo de transmissão menor que 500 ms.

Tipo 4 – Grande Volume de dados (valores amostrados)

Esta mensagem carrega os dados amostrados dos TCs e TPs. Possui restrições temporais conforme as classes de desempenho, da mesma forma que as mensagens do tipo 1.

Tipo 5 – Funções de transferência de arquivos

Extensos arquivos de dados para registros, supervisão, ajustes e oscilografia. Restrição temporal de 1000 ms.

Tipo 6 – Mensagens de sincronização de tempo

Mensagens empregadas para sincronizar os relógios dos IEDs dentro do sistema de potência. Sua classe de precisão é um requisito funcional e depende do propósito do sincronismo.

Tipo 7 – Mensagens de comando com controle de acesso

Mensagem utilizada para transferir mensagens do tipo 3, com controle adicional de acesso.

4 Redes de Petri Colorida (CPN)

Este capítulo destina-se a uma breve explanação sobre o formalismo das Redes de Petri Coloridas no desenvolvimento de modelos de comunicação.

4.1 Modelagem CPN

A Rede de Petri (RdP), discutida em [11], é uma ferramenta matemática gráfica para o estudo de sistemas caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos. Resumidamente, a RdP é um grafo bipartido, com interpretação gráfica, formada por dois conjuntos: transição e lugar. A representação é como mostrada na Figura 14, na qual os lugares são os círculos e as transições os retângulos finos. Estes dois componentes, também são chamados de nós e são interconectados por arcos dirigidos.

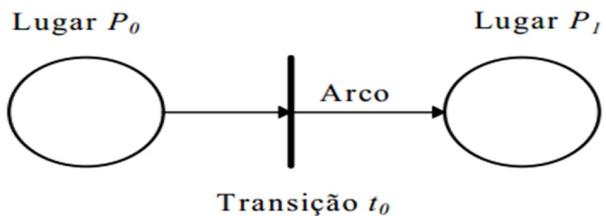


Figura 14: Elementos básicos de uma RdP ordinária

Para a modelagem e melhor interpretação de sistemas, utilizam-se marcas ou fichas (*tokens*) atribuídas aos lugares, que permitem representar a situação do estado do sistema. A movimentação das marcas, através de regras bem definidas, representa a dinâmica do sistema.

Na área da análise de protocolos de rede, as Redes de Petri Estocásticas (SPN – *Stochastic Petri Net*), variantes das RdP ordinárias, são constantemente aplicadas na análise de desempenho nas redes de computador e sistemas de comunicação, uma vez que a SPN é isomórfica e possibilita, juntamente com as cadeias de Markov [58], a análise de probabi-

lidade de estados do sistema. Contudo, mesmo com estas importantes características, as SPNs possuem limitantes em modelos complexos e em modelos de dimensões industriais.

Por sua vez, as Redes de Petri Coloridas (CPN – *Coloured Petri Nets*), são uma combinação das Redes de Petri (RdP) [59] com linguagem de programação. A Rede de Petri Colorida é um superconjunto das redes de Petri ordinárias. Em CPN as marcas carregam informação, a “cor” (tipificação). Esta informação pode ser tipo, tamanho, nome, registro, estado etc. Lugares que aceitam fichas “coloridas” são coloridos também. Por exemplo, lugares que suportam “cores” do tipo nome não suportam “cores” do tipo tamanho. Na analogia com as linguagens orientadas a objeto, diz-se que as “cores” são as classes dos objetos.

Transições, em CPN, podem avaliar as informações contidas nas fichas vindas dos seus lugares de entrada. Uma vez que a transição dispara, ela pode modificar a informação da ficha e carregá-la para o lugar de saída.

Redes de Petri Coloridas temporizadas tem uma propriedade adicional que pode ser usada para diferentes tipos de análise de desempenho. Em redes de Petri ordinárias tem-se que o disparo é instantâneo. Uma vez que sistemas reais possuem tempos envolvidos, as fichas temporizadas carregam mais uma informação, que é a estampa de tempo (*timestamp*). A estampa de tempo é a informação de quando a ficha estará disponível, ou seja, em que espaço de tempo a ficha está habilitada. Isto permite avaliar tempo de trânsito de mensagem, disponibilidade de recursos, e garantir uma análise estocástica do sistema.

Outro ponto importante que o uso das Redes de Petri Coloridas permite é a hierarquia de redes. Partes dos modelos podem ser agrupadas em módulos (subsistemas). Estes módulos são intitulados transições de substituição. Transições de substituição podem ser reusadas múltiplas vezes em um modelo facilitando o processo de modelagem.

Transições de substituição escondem a complexidade do comportamento do usuário permitindo melhor entendimento do processo como um todo. Se for necessária maior compreensão do sistema, pode-se olhar dentro do subsistema. Por tais motivos diz-se que a modelagem por meio das Redes de Petri Colorida possui maior capacidade de abstração.

A definição matemática para o formalismo CPN é representada pela teoria de conjuntos conforme é apresentado em [60] e [61]. A seguir, o formalismo é enunciado:

$$\text{CPN} = \{P, T, CB, C, W^-, W^+, W^h, \text{Pri}, M_0, \theta\}$$

- P é conjunto finito de lugares;

- T é conjunto finito de transições temporizadas e imediatas; $P \cap T = \emptyset$, $P \cup T \neq \emptyset$
- CB é família das classes de cores básicas: $CB = \{C_1, \dots, C_n\}$ com $C_i \cap C_j = \emptyset$;
- C é uma função de $P \cup T$ que associa a qualquer nó r um domínio de cor $C(r)$ que é o produto cartesiano dos elementos de CB ;
- $W^-, W^+, W^h : W^-(p, t), W^+(p, t), W^h(p, t) \in [C(t) \rightarrow Bag(C(p))]$ são funções que rotulam respectivamente os arcos de entrada, saída e inibidores entre as transições t e p ;
- Pri é a função de prioridade definida como se segue: $\forall t \in T, Pri(t) : C(t) \rightarrow N$. $Pri(t, c)$ é a prioridade da instância $[t, c]$.
- M_0 é a marcação inicial que descreve o estado inicial do sistema;
- θ é a função definida no conjunto de transições T dado que $\theta(t)$ é a função de tempo do modelo.

4.2 Software CPN Tools

O CPN Tools [62] é capaz de simular tanto Redes de Petri ordinária como Redes de Petri Coloridas complexas. Este software usa a linguagem CPN *Markup Language* (CPN ML) o qual é baseado na linguagem de programação ML [63]. Usando CPN ML é possível definir estruturas com dados complexos, e funções para lidar com estas estruturas.

Algumas das facilidades que este *software* permite, são levantadas a seguir. É possível enquanto o modelo é desenvolvido, a geração dos códigos e sua respectiva análise de sintaxe. Isto significa que é possível simular e analisar as partes do modelo sintaticamente corretos, enquanto as partes erradas ou incorretas são ignoradas. Uma ferramenta de simulação eficiente é implementada podendo simular modelos temporizados e/ou não-temporizados. Outra ferramenta inserida neste programa permite a análise de espaço de estados emitindo um relatório com o grafo de alcançabilidade do modelo CPN indicando bloqueios e vivacidade da rede. É permitido ainda criar blocos monitores que avaliam as condições da simulação como formação de filas, disparo de transições e outras funções que avaliam as condições de lugares e transições. A Figura 15 mostra a interface deste programa salientando algumas ferramentas disponíveis.

Seguindo a sintaxe do formalismo CPN, existem somente três elementos básicos na modelagem. A Figura 16a indica a estrutura genérica destes elementos enquanto a Figura

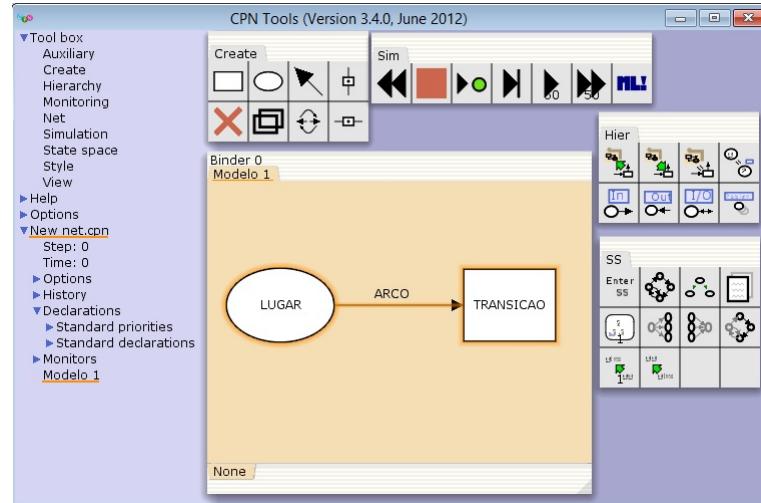


Figura 15: Interface software CPN Tools

16b mostra a estrutura no ambiente CPN Tools. O lugar possui a seguinte sintaxe: nome, tipo de dado e marcações inicial e atual. Já a transição tem uma estrutura diferente: nome, guarda, estampa de tempo e segmento de código. O arco carrega as variáveis do sistema e tem a capacidade de aceitar trechos de código.

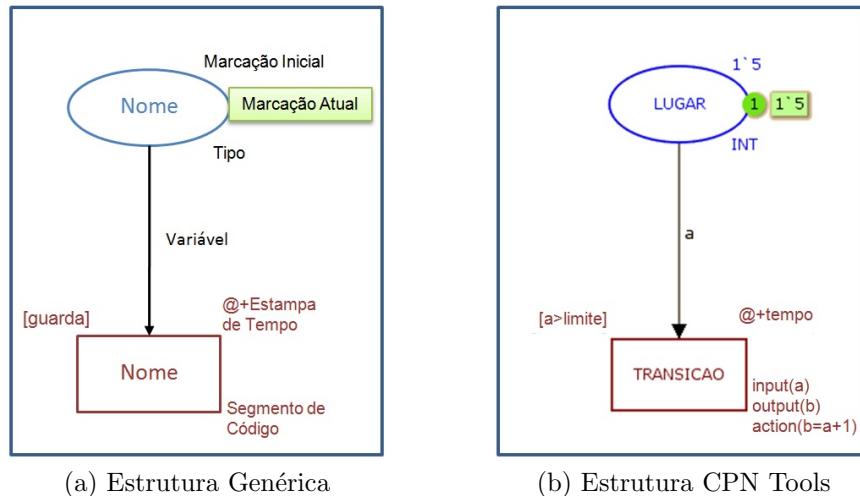


Figura 16: Sintaxe gráfica do formalismo CPN

A semântica destes elementos é a que se segue:

Lugar

- Nome: livre;
- Tipo: segue a declaração CPN ML (booleanos, inteiros, enumerações, vetores, strings, real, etc.);

- Marcação inicial: fichas que o lugar possui no estado inicial do sistema, ou seja, antes do início da simulação;
- Marcação atual: fichas que o lugar possui após certo número de passos simulados.

Transição

- Nome: livre;
- Guarda: função booleana que permite ou não o disparo da transição
- Estampa de Tempo: permite a temporização da ficha. O disparo da transição só ocorre quando a estampa de tempo for maior ou igual ao tempo de simulação
- Segmento de código: código ML que permite a modificação de variáveis.

Arco

- Variáveis: carrega as fichas dos lugares;
- Segmento de código: permite modificações das variáveis e outras funcionalidades da linguagem ML.

4.3 Exemplo de Modelagem

A fim de exemplificar o uso das Redes de Petri Coloridas para avaliação de desempenho de sistemas de comunicação, um modelo simples apresentado em [40], é discutido.

O sistema consiste de um transmissor enviando pacotes de dados, por um canal bidirecional, a um receptor. Os pacotes transmitidos podem ser perdidos e podem também passar a frente da pré-ordenação dos pacotes. Um número de sequência é atrelado a cada pacote para assegurar que os pacotes sejam recebidos na ordem correta e que pacotes duplicados sejam descartados.

A Figura 17 mostra o nível mais abstrato de um modelo CPN temporizado e hierárquico. Este modelo “global” consiste de duas transições de substituição. A transição de substituição **Chegadas** representa a chegada de um pacote que será enviado do emissor ao receptor. Já a transição de substituição **Protocolo** modela o comportamento do emissor, do receptor e do canal de comunicação.



Figura 17: Modelo visão global [40]

A Figura 18 mostra o nível inferior da transição **Protocolo**. A parte do emissor no modelo é representada no lado esquerdo. Os pacotes que serão enviados são colocados no lugar **Pacotes a Enviar**, que representa um *buffer*. As fichas no lugar **Pacotes a Enviar** representam pacotes individuais. Esta ficha carrega um dado que representa uma *n-upla* com três valores. Nas definições do formalismo CPN este dado é do tipo produto.

O primeiro valor (*n*) é um inteiro que representa o número do pacote. O segundo valor (*p*) é uma *string* que carrega o conteúdo da mensagem. E o terceiro valor (*t*) é um inteiro que representa o tempo que a mensagem chegou ao emissor. Pacotes são periodicamente enviados através da transição **Enviar Pacote**. O lugar **Proximo a Enviar** é um contador que indica ao emissor o número de sequência do próximo pacote que deve ser enviado. Leva 9 unidades de tempo para processar e enviar o pacote, indicado pela inscrição de tempo $@+9$ na transição **Enviar Pacote**. Quando um pacote é enviado, uma cópia dele é salva e após certo tempo, caso necessário, este pacote é retransmitido. Esta quantidade de tempo que deve ser esperada para o reenvio é representada pela inscrição $@+50$ no arco que conecta **Pacotes a Enviar**. Neste caso adota-se um tempo para retransmissão de 50 unidades de tempo. O contador do número de sequência só será aumentado caso o emissor receba uma mensagem de confirmação (**Confirmacao Recebida**) do receptor indicando que ele recebeu com sucesso uma mensagem. Quando uma mensagem de confirmação é recebida ela é guardada temporariamente (**Buffer Confirmacao**) e em seguida é utilizada para remover o pacote correto (**Remover Pacote**) do *buffer* **Pacotes a Enviar**.

A parte do receptor é modelada no lado direito da Figura 18. O receptor tem um contador indicando o próximo pacote que este espera receber (**Proximo a Receber**). Quando um pacote é recebido (**Pacote Recebido**), o número de seqüência é comparado com o contador. Se os dois valores são iguais, então o pacote é salvo no lugar **Pacotes Recebidos** e o contador **Proximo a Receber** é incrementado. Toda vez que um pacote é recebido, uma mensagem de confirmação é enviada indicando o número de seqüência do próximo pacote que o receptor está esperando.

O canal de comunicação bidirecional é modelado no centro da Figura 18. O canal de comunicação transmite pacotes (**Transmitir Pacote**) do emissor para o receptor. O

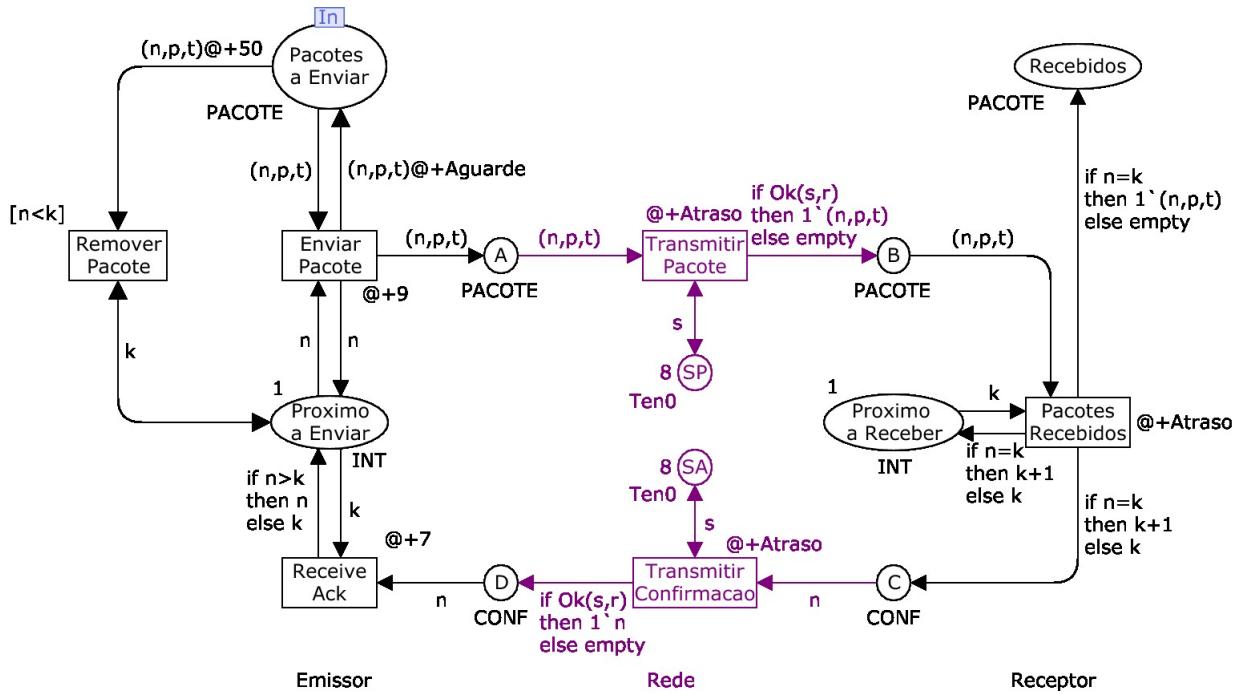


Figura 18: Modelo CPN do Protocolo representando o emissor, a rede e o receptor [40]

tempo requerido para transmitir o pacote é dependente de uma função **Atraso**. A função **Atraso** é representada por uma função de probabilidade o que garante caráter estocástico ao sistema. A perda de pacote é modelada no arco entre a transição **Transmitir Pacote** e o lugar **B**. A função **Ok** determina a probabilidade de se perder o pacote no processo de transmissão. Para este exemplo, a probabilidade é de 10% (arcos subsequentes as transições **Transmitir Pacote** e **Transmitir Confirmação**). Tanto o processo de transmissão de pacote como o de transmissão de confirmação são modelados da mesma maneira.

A Figura 19 é o detalhamento da transição de substituição **Chegadas** que modela a chegada dos pacotes que devem ser enviados ao receptor. Uma única ficha no lugar **Proximo** determina quando um novo pacote deve chegar. A ficha neste lugar é temporizada. Fichas temporizadas carregam os valores dos dados e também carregam uma estampa de tempo de simulação.

Ilustrando dois estados subsequentes, as Figuras 19a e 19b representam a mudança de estado devido a ação de disparo da transição **Chegada**. No primeiro estado (Figura 19a), o pequeno círculo com o valor 1 e a inscrição $1'1@162$ ao lado do lugar **Proximo** indicam que há 1 ficha com o valor 1 e com estampa de tempo de simulação 162. Isto significa que a próxima informação a ser enviada tem o número de seqüência 1 e estará disponível no instante 162 da simulação. Quando este tempo de simulação é alcançado, a transição

(**Chegada**) é disparada, levando o sistema para o estado 2 (Figura 19b). O valor de sequência no lugar **Proximo** é aumentado devido a função **novaChegada()**, indo para 2, e as informações do lugar **Proximo**, sequência e estampa de tempo, são repassados ao lugar **Pacotes a Enviar** através da função **novoPacote(n)**. Percebe-se agora um novo estado no modelo, no qual a inscrição $1'1@272$ ao lado do lugar **Proximo** indica que há 1 ficha com o valor 1 e com estampa de tempo 272 e a inscrição $1'(1, "p1", 162)@162$ ao lado do lugar **Pacotes a Enviar** indica que há uma ficha carregando o número de sequência 1, a informação do pacote “p1”, o tempo em que a mensagem foi gerada 162 e quando esta ficha estará disponível para simulação (@162).

O lugar **Pacotes a Enviar** aparece nas três Figuras 17–19, pois representam a conexão dos níveis hierárquicos. Ele representa o mesmo lugar e ele sempre contém as mesmas fichas.

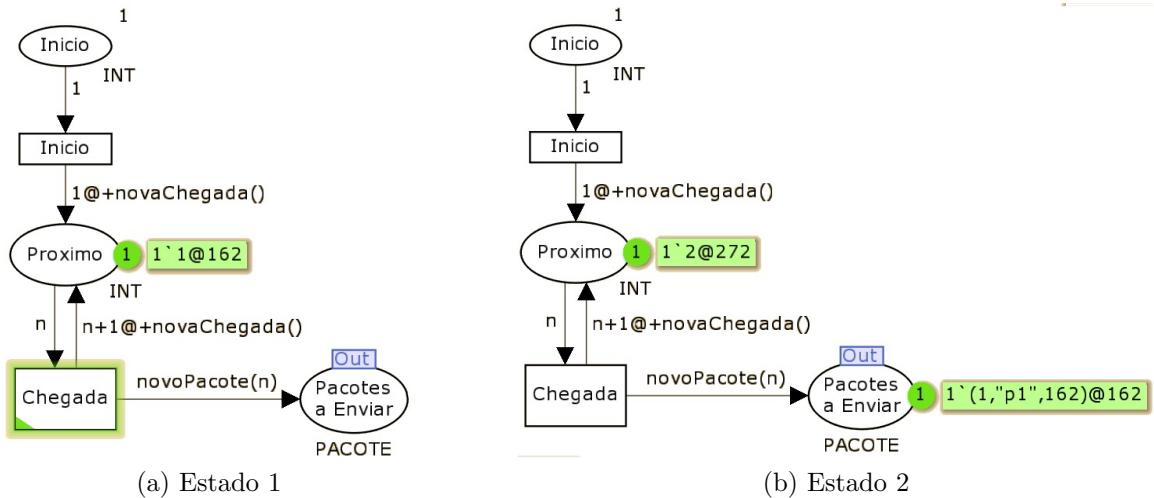


Figura 19: Modelo CPN Chegadas – transição de estados [40]

5 Propostas de modelagem CPN para análise de cenários IEC 61850

Baseado nos conceitos previamente apresentados, este capítulo objetiva a descrever os sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850 segundo modelos do formalismo *Colored Petri Nets* (CPN).

5.1 Considerações Gerais

Para realizar a modelagem de cenários IEC 61850, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para identificar exemplos de sistemas de análise de desempenho de redes de comunicação IEC 61850. Com base nesta pesquisa foram adotadas duas frentes de trabalho, que nortearam os resultados aqui apresentados. A primeira frente segue o trabalho de Ingram *et al* [7] onde são feitas avaliações para um sistema baseado na Seção 9.2 da norma IEC 61850, que trata das mensagens *Sampled Values* (SV). A segunda é difundida em inúmeros trabalhos que abordam a análise de tempo na troca de mensagens GOOSE. Destacam-se os resultados de [12, 31, 33, 38, 39].

O desenvolvimento dos modelos é apoiado em duas estratégias de modelagem CPN, bastante difundidas na literatura: hierarquia [64] e temporização [66]. Estas estratégias são amplamente empregadas nos modelos CPN, pois permitem a simplificação dos modelos e a contextualização de processos reais.

A seguir, são descritos os modelos referentes às mensagens *Sampled Value* (Seção 5.2) e às mensagens GOOSE (Seção 5.3).

5.2 Modelagem de um sistema de transmissão de mensagens Sampled Values

Como dito, a primeira frente baseia-se no trabalho desenvolvido por Ingram *et al* [7], no qual busca-se uma avaliação da latência na transmissão de mensagens SV por dispositivos *merging units*.

No trabalho de Ingram é sugerido, conforme a Figura 20, uma bancada de testes para avaliar esta conjuntura. Esta bancada consiste de *merging units* publicando *Sampled Values*, um *switch* para chaveamento e armazenamento dos pacotes e um analisador de rede para verificar o tempo de latência dos pacotes.

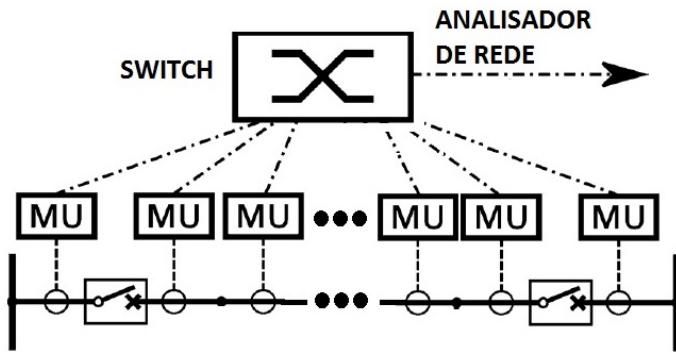


Figura 20: Bancada de testes Ingram *et al* [7]

O esquema para que o analisador de rede verifique estes tempos de latência tem a disposição mostrada na Figura 21. De forma simples, o que esta configuração propõe é usar o DAG7.5G4 (cartão de avaliação de tráfego) para ser a base comparativa das mensagens, usando-se um TAP (estrutura multiplexadora) para verificar o tempo no canal A (entrada) e o tempo do canal B (saída). Por uma simples função de subtração dos tempos dos canais, o tempo de latência do pacote é calculado.

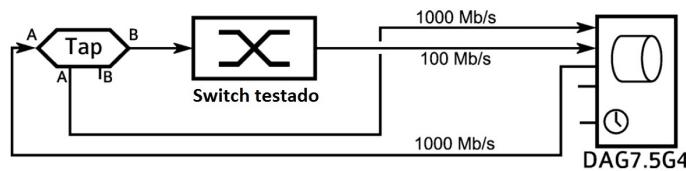


Figura 21: Estrutura do analisador de tempo de latência [7]

Apresentada a estrutura de avaliação de latência das mensagens SV, Ingram propõe suas avaliações, as quais ele define como limites de capacidade do sistema. Seu objetivo é analisar o comportamento temporal das mensagens *Sampled Value* em casos extremos de aplicação. Para isso sua metodologia consiste em trabalhar com os parâmetros críticos de

funcionamento, observando o comportamento do sistema. No Capítulo 6, estes parâmetros são apresentados e utilizados para fins de comparação com os resultados obtidos pela modelagem CPN obtida nesta dissertação de mestrado.

Desta forma, o que é proposto nas seguintes seções, é a descrição dos modelos que permitem desempenhar funções semelhantes ao DAG7.5G4, monitorando os tempos de envio de mensagem, recepção, tráfego e limitação do *buffer* do *switch*. Para um melhor entendimento da proposta de modelagem CPN será apresentado o desenvolvimento dos modelos para um cenário com apenas 2 MUs e 1 analisador. No Capítulo 6, os modelos são estendidos para fins de análise de desempenho e comparação com os resultados obtidos por Ingram *et al.*

5.2.1 Modelo Visão Global

Inicia-se o processo de modelagem descrevendo o modelo com maior nível de abstração (**Visão Global**), ou seja, utiliza-se uma abordagem *top-down*. Neste nível, o modelo CPN possui correspondência direta com os dispositivos físicos, que neste caso, têm 2 MUs, uma *switch* e um analisador. O modelo CPN para representar esta arquitetura física pode ser visto na Figura 22. Os retângulos com linha dupla são transições de substituição e representam os dispositivos físicos correspondentes.

O modelo **Visão Global** é composto por três tipos de transições: **MU**, **Switch** e **Analizador**. A transição **MU** representa o dispositivo *merging unit*, responsável pelo envio das mensagens SV. Tem-se duas transições no modelo representando os dois dispositivos físicos MU. Enquanto isso, a transição **Switch**, que modela o dispositivo físico de mesmo nome, é responsável por chavear e armazenar as mensagens. Por fim, a transição **Analizador** é utilizada para verificar os tempos de transmissão.

Cada dispositivo físico conectado ao *switch* possui uma identidade, representado pelo lugar **ID** na Figura 22, sendo **ID0**, **ID1** e **ID2** os identificadores do analisador, do MU1 e do MU2 respectivamente. Isto permite identificar a origem e o destino do pacote. Os lugares identificados no formato **Px_E** e **Px_S**, representam as portas de entrada e de saída do *switch* sendo que “x” cresce sequencialmente de acordo com o número de portas do *switch*. Por exemplo, a porta **P1_E** indica que esta é a entrada da porta 1 do *switch* enquanto **P1_S** é a saída da porta 1.

Para o desenvolvimento destes módulos, define-se um conjunto de tipos de fichas que serão implementados. Os *color sets* e suas definições são as seguintes:

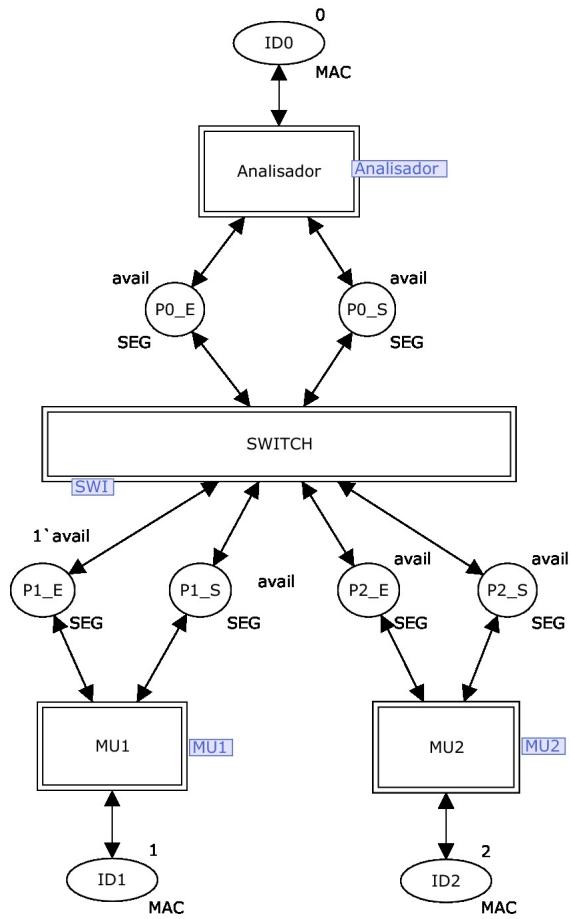


Figura 22: Modelo Visão Global

```
colset MAC = int;  
colset DADOS = record asdu1:INT * asdu2:INT timed;  
colset TEMPO = int timed;  
colset PACOTE = product MAC*MAC*DADOS*TEMPO;  
colset SEG = union pac:PACOTE + avail timed;
```

Na Figura 22, apenas os tipos **MAC** e **SEG** são vistos no lado inferior direito dos lugares, os outros tipos são utilizados em nível inferior do modelo. A tipificação proposta serve para caracterizar as fichas e impor a interpretação ao modelo. O tipo **MAC** representa o endereço dos dispositivos da rede. É composto por um número inteiro. Já o tipo **DADOS** é uma classe de registro (*record*). Sua composição é de dois registros do tipo inteiro representando os dados que serão enviados. O **TEMPO** é tipificado com um inteiro temporizado, ou seja, suporta a estampa de tempo na simulação. **PACOTE** expressa o empacotamento das mensagens segundo a estrutura de **destino**, **origem**, **dados**, **estampa de tempo**. Outra tipificação é dada às fichas da classe **SEG**. Este tipo de *color set*

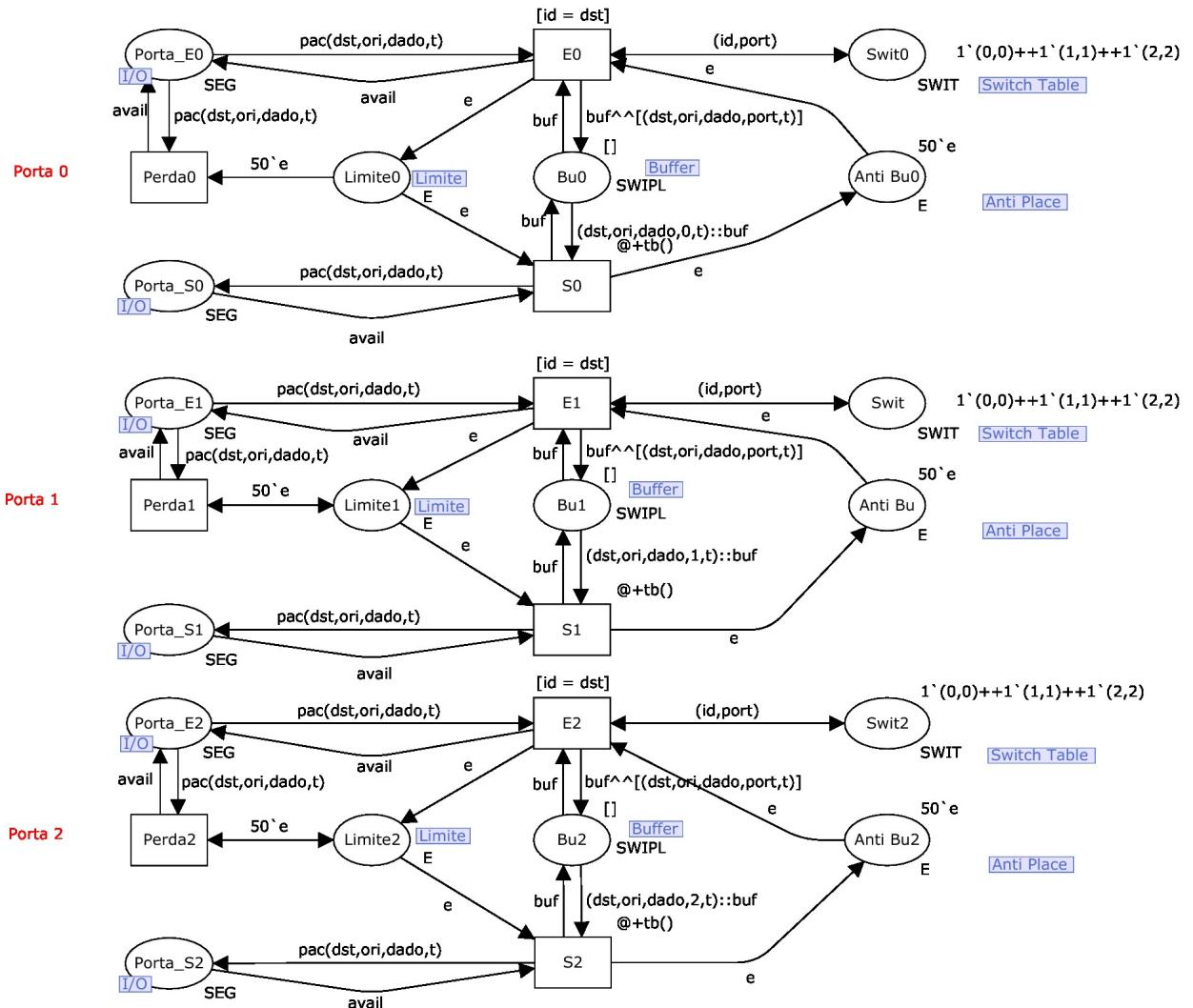
pode carregar fichas do tipo **PACOTE** ou fichas do tipo **avail** e está conectada as portas do *switch*. As fichas do tipo **SEG** permitem indicar quando a porta está livre (**avail**) ou quando está a processar uma mensagem (**PACOTE**).

5.2.2 Modelo Switch

O modelo da *switch* no formalismo CPN, desenvolvido nesta dissertação, é uma variante do modelo apresentado por Zaitsev *et al* [66]. O modelo proposto captura as principais características deste equipamento, identificando a função de roteamento e a função de armazenamento de pacotes. Definem-se, portanto, modelagem das interfaces de entrada e saída, a tabela de chaveamento e modelagem do *buffer* para armazenamento. A Figura 23 ilustra o modelo CPN do *switch* para três portas. Os lugares cujos nomes possuem formato **Porta_Ex** e **Porta_Sx** representam as portas do *switch*. Os lugares **Switx** representam a tabela de armazenamento e os lugares **Bux** representam o *buffer* de armazenamento. Os lugares **Switx** representam na verdade um único lugar e são chamados de lugar de fusão. Este é um método disponível na CPN para simplificação do desenho do modelo. O mesmo ocorre com os lugares **Bux**, **Anti Bux** e **Limitex**.

O lugar **Porta_Ex** e **Porta_Sx** são os mesmos lugares apresentados no modelo da **Visão Global**, uma vez que estes lugares são correspondentes aos lugares do nível superior. As transições **Ex** modelam o processamento dos pacotes de entrada verificando se a mensagem é endereçada àquela porta. Se sim, a mensagem é aceita e é representada pelo disparo da transição **Ex** correspondente, encaminhando a ficha do lugar **Porta_Ex** para os lugares de saída da transição **Ex**. O tempo de propagação do pacote é representado nas transições de saída **Sx**, através da etiqueta de tempo $@+$, onde é atribuído o tempo aleatório **tb()**. Este tempo de propagação é caracterizado como estocástico, uma vez que utiliza uma função com distribuição normal para gerar o valor **tb()**. Os lugares **Switx** representam a tabela de chaveamento do *switch*. O primeiro número da ficha indica o identificador do dispositivo e o segundo a porta que o dispositivo está conectado. A arquitetura proposta possui dois **MUs** e um **Analizador**, e por conseguinte, a tabela de chaveamento consiste em indicar que a porta 0 do *switch* pertence ao **Analizador** e as portas 1 e 2 pertencem aos *merging units* 1 e 2, respectivamente. Os lugares **Bux** representam o *buffer* do *switch*, como já mencionado. Para expressar a limitação no armazenamento das mensagens, criam-se os lugares **Anti Bux**, que retiram as fichas do lugar **Bux** toda vez que ocorre o disparo da transição **Ex**, impossibilitando um número maior que 50 pacotes. Abre-se um parêntese aqui para ressaltar a disparidade com o modelo

de Zaitsev. No modelo apresentado nesta dissertação, é modelado a limitação do *buffer* bem como a perda de pacotes que esta limitação causa, algo que não é mencionado em [66]. Continuando com a descrição do modelo, a transição **Perdax** é conectada a uma função de monitoramento da ferramenta CPN Tools, a fim de avaliar os pacotes perdidos pelo estouro do *buffer*. Esta função de monitoramento analisa a quantidade de vezes que a transição **Perdax** foi disparada, representando então o número de pacotes perdidos. Pode-se adiantar que para a situação de dois dispositivos publicando, isto não ocorre, contudo ao impor condições limites de 21 e 22 *merging units* pode-se verificar o estouro da capacidade de armazenamento do *switch* e a consequente perda de pacotes. Isso será tratado no Capítulo 6.

Figura 23: Modelo da *switch*

Para modelar estas funcionalidades, definem-se os seguintes *color sets*:

colset E = with e;

```

colset PORT = int;
colset SWIT = product INT*INT;
colset SWIP = product MAC*MAC*DADOS*PORT*TEMPO timed;
colset SWIPL = list SWIP;

```

O *color set* **E** é um tipo de marcação genérico para criação de fichas para limitar o *buffer*. A tipificação **PORT**, da classe inteiro, indica a numeração da porta do *switch*. As tipificações **SWIT**, **SWIP** e **SWIPL** são específicas ao modelo do *switch*, e indicam a tabela de chaveamento, os pacotes dentro do *switch* e a formação de fila respectivamente.

Este modelo também será utilizado na modelagem do sistema de análise de mensagens GOOSE, apresentado na Seção 5.3.

5.2.3 Modelo MU

O modelo **MU** representa os dispositivos que estão conectados ao barramento de processo coletando e enviando os dados. Para este caso, o que é amostrado e enviado são os valores de corrente e um número identificador da mensagem, simulando os dados de um transformador de corrente (TC). Sendo assim, seguindo o que é proposto na norma IEC 61850, os nós lógicos TCTR e MMXU serão modelados.

De forma sucinta, o que deve ser modelado é uma função de captação de dados de um arquivo texto, que contenha informações de corrente, e o envio de pacotes de dados com as informações *Sampled Value* ao analisador. Este arquivo texto foi chamado de “tcffile.txt”.

A Figura 24 é a representação CPN das *merging units*. Este modelo possui o lugar **Inicio** que permite à simulação partir de um estado onde não há nenhuma mensagem sendo transmitida. Os valores das amostras de corrente, que estão guardados no arquivo texto “tcffile.txt”, são resgatados pelo segmento de código definido na transição **Inicio**. Este segmento de código permite a leitura do arquivo enquanto a função **getPacketsTC()**, colocada como inscrição do arco de saída da transição **Inicio**, transforma os dados do arquivo em marcações do tipo CPN e armazena as fichas no lugar **Amostras**.

Em seguida, de forma a representar o nó lógico presente nestes dispositivos, a transição **TCTR** resgata um valor do lugar **Amostras**, simulando a amostragem de sinais, e acrescenta o tempo para que outra amostra seja resgatada. Mais uma vez utiliza-se de uma função com distribuição normal para gerar o tempo **t_sv()**. Este tempo, considerado como tempo de amostragem é definido na versão menos complexa da Seção 9.2 da norma,

definida como “*Light Edition*” [67]. As considerações no tempo de amostragem levam em conta o número de amostras por ciclo e a frequência do sinal amostrado. Para o caso levantado por Ingram, o sinal a ser amostrado é 50 Hz, o número de amostras por ciclo é de 80, o que resulta em 4000 amostras por segundo, produzindo um tempo de publicação de 250 microsegundos. Utiliza-se deste mesmo parâmetro de amostragem para fins de comparação de resultados no Capítulo 6, ressalta-se porém, que caso seja necessário mudar para um sinal de 60 Hz isto poderá ser feito sem qualquer dificuldade no modelo.

Por fim, o modelo **MU** cita mais um nó lógico (**MMXU**) que faz o cálculo dos valores das correntes amostradas. O padrão em que a mensagem será enviada é definido pelo *color set* **SEG**, carregando o destino do pacote, sua origem, os dados com o valor da corrente e o número da amostra, e a estampa de tempo indicando o momento que a mensagem saiu do dispositivo. As portas **LAN_E** e **LAN_S** representam interfaces de entrada e saída do dispositivo e também estão conectadas aos lugares que representam as portas do *switch*. Esta estrutura **MU** também fará parte do modelo de análise das mensagens GOOSE (Seção 5.3).

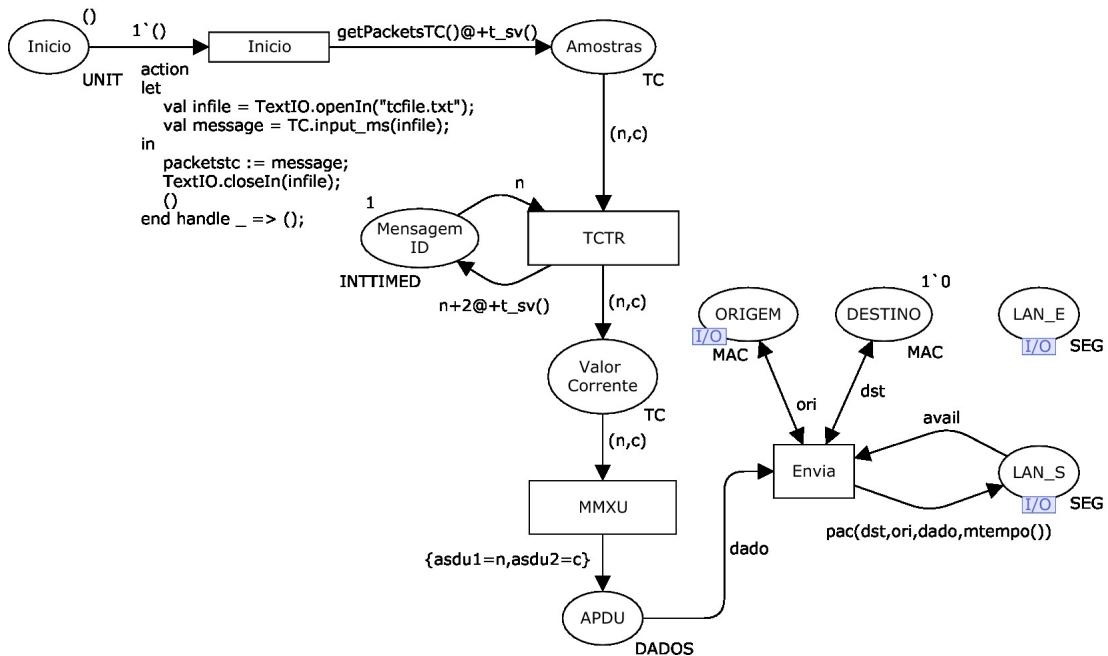


Figura 24: Modelo da *merging unit*

5.2.4 Modelo Analisador

O modelo do analisador é caracterizado de forma simples conforme a Figura 25, pois tem apenas a função de receber as mensagens e armazená-las. Os pacotes são recebidos

pela porta **LAN_E** e em seguida é verificado sua origem através da função de seleção no arco que liga a transição **Recebe** ao lugar **Buffer**.

As transições **Bufferx**, representam a função de monitoramento do tempo de transmissão das mensagens, que através de uma simples operação de subtração entre o tempo de simulação e a estampa de tempo do pacote, obtém o tempo total de transmissão.

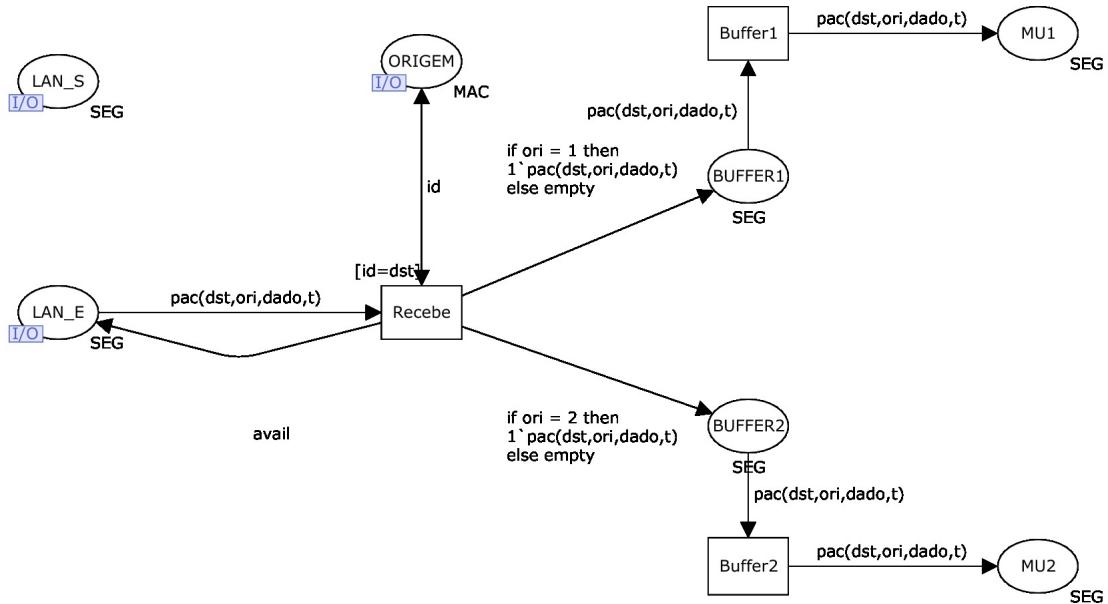


Figura 25: Modelo do Analisador

De maneira similar aos modelos anteriores os lugares **LAN_E**, **LAN_S** e **ORIGEM** representam as conexões entre os níveis de abstração na hierarquia da modelagem.

Estes modelos CPN apresentados podem ser replicados em várias arquiteturas com diferentes números de dispositivos. No capítulo 6, serão utilizados como objeto de estudo de comparação com os resultados obtidos por Ingram *et al.*

5.3 Modelagem de um sistema de transmissão de mensagens GOOSE

Nesta segunda frente de estudos sobre modelagem CPN de sistemas IEC 61850, é apresentada a interpretação em Redes de Petri Colorida de um sistema de análise de tempo de transmissão das mensagens GOOSE. O modelo descrito, baseia-se em um trabalho do próprio autor desta dissertação [68]. O artigo com este modelo é apresentado no Apêndice.

Resumidamente, o que é proposto em [68] é a especificação de nós lógicos para a função de proteção de sobrecorrente, a distribuição dos nós lógicos segundo o seu grupo funcional,

a transferência do modelo IEC 61850 para a arquitetura de comunicação e a análise de tempo de transferência das mensagens utilizando a ferramenta de monitoramento do *software* CPN Tools.

Deste modo, apresenta-se na Figura 26a, a atribuição dos nós lógicos para a função de sobrecorrente instantânea de linha segundo a norma IEC 61850 e a Figura 26b a distribuição dos nós lógicos por funcionalidades.

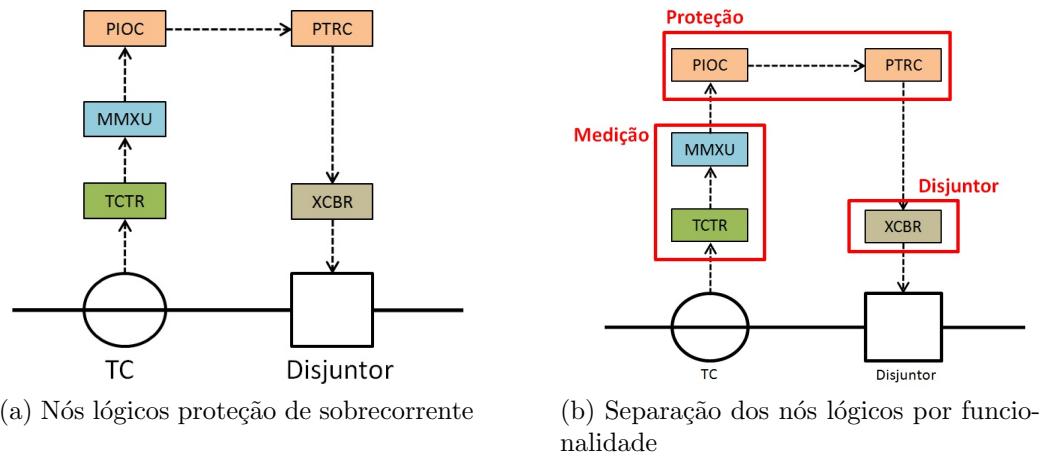


Figura 26: Modelagem IEC 61850 da função de proteção de sobrecorrente

Para transformar a estrutura virtualizada IEC 61850 na arquitetura de proteção, é feita a mesma distribuição por funcionalidades (medição, proteção e disjuntor) nos dispositivos IEDs, conforme a Figura 27. A arquitetura é simples e possui três dispositivos IEDs interconectados através de um *switch* formando uma rede LAN (*Local Area Network*), bastante semelhante à arquitetura usada na modelagem da Seção 5.2. Por tal motivo, os modelos da **Visão Global** e **Switch** são omitidos, bem como o modelo do **IED Medição** que é rigorosamente o mesmo dispositivo tratado como *merging unit* (**MU**) na seção anterior.

A estrutura apresentada na Figura 27, inserida no contexto IEC 61850, como mostrado na Figura 26b, é o objeto de modelagem que será detalhado nas próximas seções.

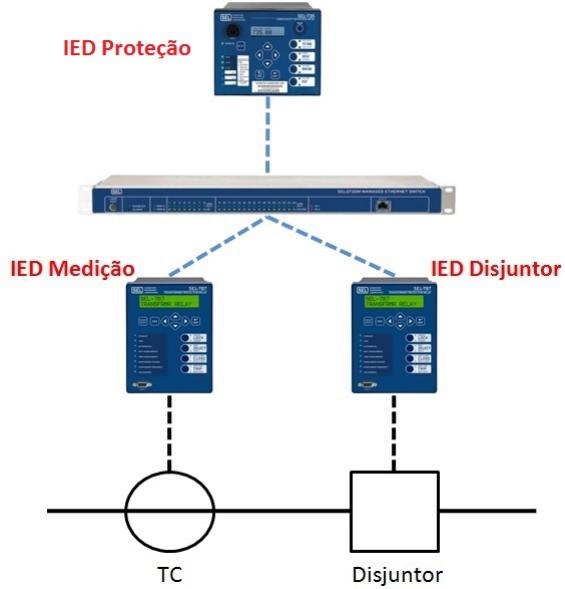


Figura 27: Arquitetura de proteção definida por funcionalidades

5.3.1 Modelo do IED Proteção

O modelo **IED Proteção** (Figura 28) é dividido em três blocos: interface de comunicação, processador e analisador.

Destacado no canto esquerdo do modelo, a interface de comunicação é composta pelas portas de conexão **LAN_E** e **LAN_S**, pelas transições **Envia** e **Recebe** e pela transição de substituição **Mecanismo GOOSE**. As portas **LAN_E** e **LAN_S** modelam a conexão do dispositivo **IED Proteção** com o *switch*, da mesma forma tratada anteriormente na modelagem dos dispositivos **MU**. As transições **Envia** e **Recebe** funcionam como pré-processador, responsável apenas pela interface de comunicação. Sobre estas transições estão inseridos os tempos **ta()** e **tb()**, representando a característica estocástica presente na *bufferização* de entrada e saída dos pacotes.

A transição de substituição **Mecanismo GOOSE** é a representação do dinamismo da publicação destas mensagens. De forma resumida, o modelo verifica se ocorreu alguma mudança de estado no sistema, por exemplo um estado de sobrecorrente, e publica dez vezes a mesma mensagem a fim de que seja garantida a entrega de ao menos um pacote. Esta repetição de dez vezes é uma implementação estabelecida apenas para esta dissertação, pois esta repetição do envio das mensagens GOOSE varia entre os fabricantes. Caso não haja mudança de estado, tem-se que o mecanismo publicará apenas uma mensagem. A essas duas condições, são modeladas as transições **Condição Normal** (publicação de uma mensagem) e **Mudança de Estado** (publicação de dez mensagens).

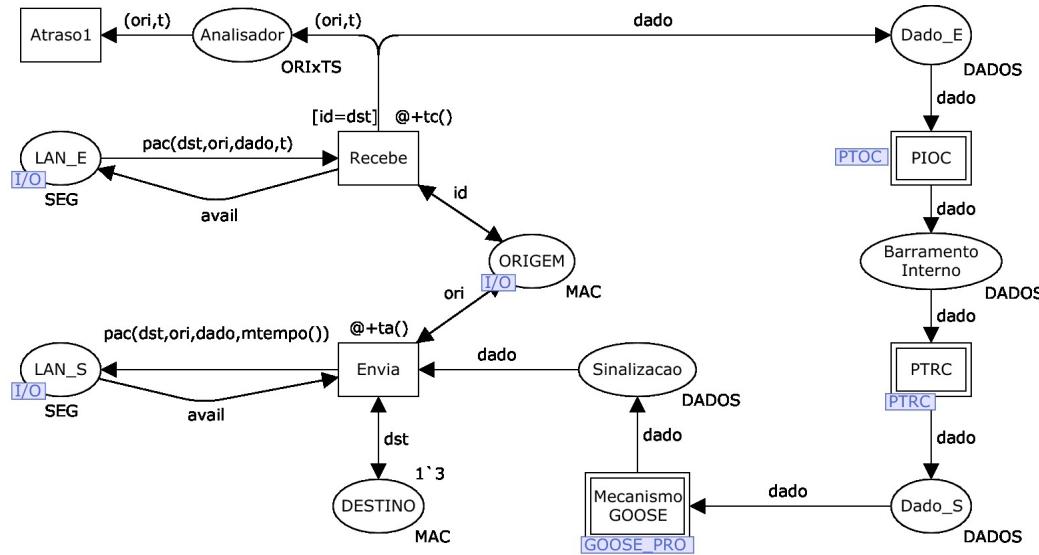


Figura 28: Modelo do IED de Proteção

Na Figura 29, a chegada das informações é representada pelo lugar **Entrada**, carregando a informação **dado**. Em seguida a transição **Comparacao** avalia se existe uma mudança de estado comparando a informação atual **dado** com a informação passada **memo** resgatada do lugar **Memoria**. Esta comparação verificará se ocorreu ou não a mudança de estado. Em caso negativo, a publicação da mensagem será regida pela parte superior do modelo, indicada pela transição **Condição Normal**. Nesta situação o **Mecanismo GOOSE** publica uma única mensagem em intervalos definidos pela estocástica **t_max()**. Esta mensagem segue do lugar **Normal** até o lugar **Saída** que se conecta com o nível superior do modelo. A inscrição sobre o arco que conecta a transição **Comparacao** com o lugar **Mudanca de Estado**, verifica a alternância de estados. No caso positivo de mudança de estado, o modelo segue a estrutura definida na parte inferior da Figura 29. A informação **dado** segue para a transição de substituição **Mudanca Estado**, que é um nível inferior de modelagem, e é descrito na Figura 30. Neste nível, que representa um subprocesso do mecanismo de publicação, é verificado qual mudança ocorreu, **Estado 0** ou **Estado 1**. No sistema real estes estados podem assumir as condições de um disjuntor, aberto ou fechado, ou a condição de *trip*, verdadeira ou falsa. Seguindo a estrutura da transição de substituição **Mudanca Estado**, o modelo cria 10 fichas do tipo **dado** ($10^{'}$ **dado**), indicando a geração de dez mensagens do sistema real. Estas fichas seguem para o lugar **Rajada** que se conecta ao nível superior. Voltando ao modelo **Mecanismo GOOSE** (Figura 29), tem-se o disparo sequencial destas dez mensagens, guardadas no lugar **Rajada**, por meio da transição **Envia Retransmissao** que segue o tempo de retransmissão **t_min()**. Isto encerra o dinâmica do modelo **Mecanismo**

GOOSE.

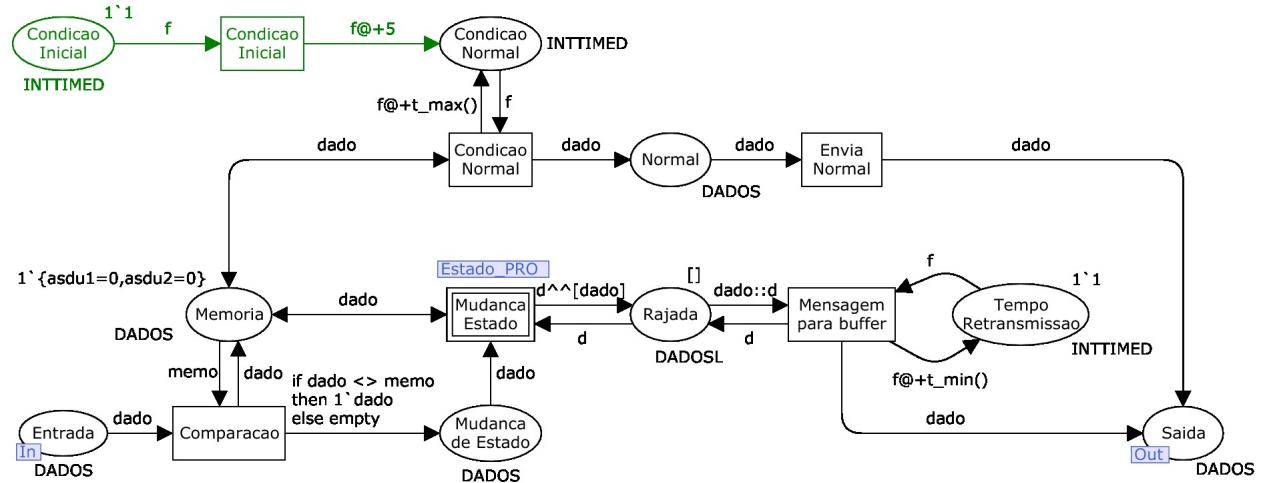


Figura 29: Modelo do mecanismo de publicação GOOSE

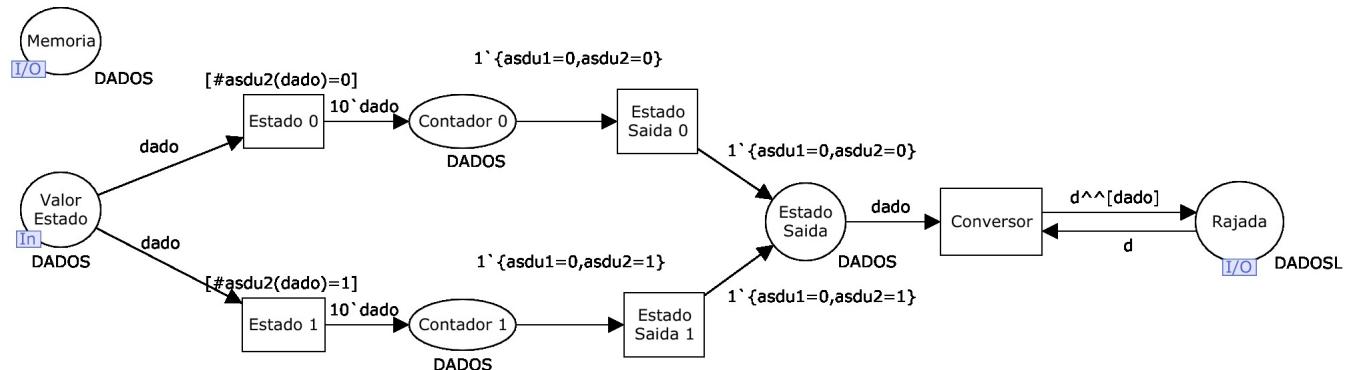


Figura 30: Modelo de mudança de estado

Ainda no modelo **IED Protecao** (Figura 28) a parte direita do modelo destina-se a representação do processamento das mensagens. Este bloco é composto pelas transições de substituição **PIOC** e **PTRC** que modelam os nós lógicos definidos na norma. Possui ainda o lugar **Barramento Interno** que simula a troca de informações entre os nós lógicos.

Os nós lógicos modelados são o de sobrecorrente instantânea **PIOC** e o condicionador de *trip* **PTRC**. Estes dois nós lógicos são apresentados nas Figuras 31 e 32. Os dois modelos possuem semelhanças, pois a lógica de atuação destes nós é receber a informação do sistema, processá-la e indicar em qual estado o sistema se encontra. No **PIOC**, é feito uma comparação simples verificando se o valor da corrente amostrada é maior que 10. Em caso positivo, o estado 1 é carregado em caso negativo o estado 0 é carregado. De forma semelhante, o funcionamento **PTRC** compara a informação atual com a memória.

Quando os valores **memo** e **dado** são diferentes, é encaminhado o estado atual, quando contrário envia-se a condição passada.

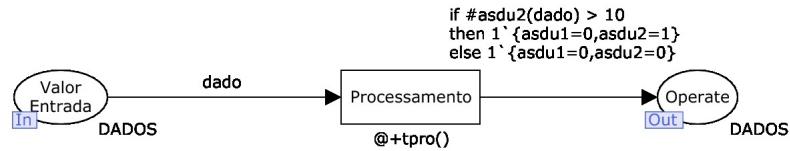


Figura 31: Modelo do nó lógico PIOC

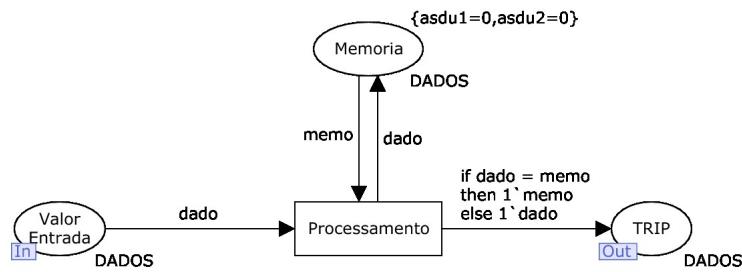


Figura 32: Modelo do nó lógico PTRC

Por fim, tem-se no canto superior esquerdo o bloco do analisador, composto apenas pelo lugar **Analizador** e pela transição **Atraso 1**, que tem a função de monitoramento para avaliar o tempo de transmissão entre o **IED Medição** com o **IED Proteção**.

5.3.2 Modelo do IED Disjuntor

A estrutura do modelo do **IED Disjuntor** (Figura 33) é a mesma do **IED Proteção**, com a exceção de que existe apenas um nó lógico definido (**XCBR**) e o **Analizador** verifica o tempo de transferência entre o **IED Proteção** e o **IED Disjuntor** (**Atraso 2**).

Representado na Figura 34, a transição de substituição **XCBR**, refere-se ao nó lógico definido na norma IEC 61850 para a modelagem do dispositivo real disjuntor. Seguindo a proposta da norma, este modelo tem a simples função de verificar a mensagem recebida, através da transição **Processamento**, e avaliar se há ou não a mudança no estado do sistema. Caso haja, este nó lógico comuta o estado do disjuntor, estado 0 para estado 1 (aberto para fechado) ou estado 1 para estado 0 (fechado para aberto).

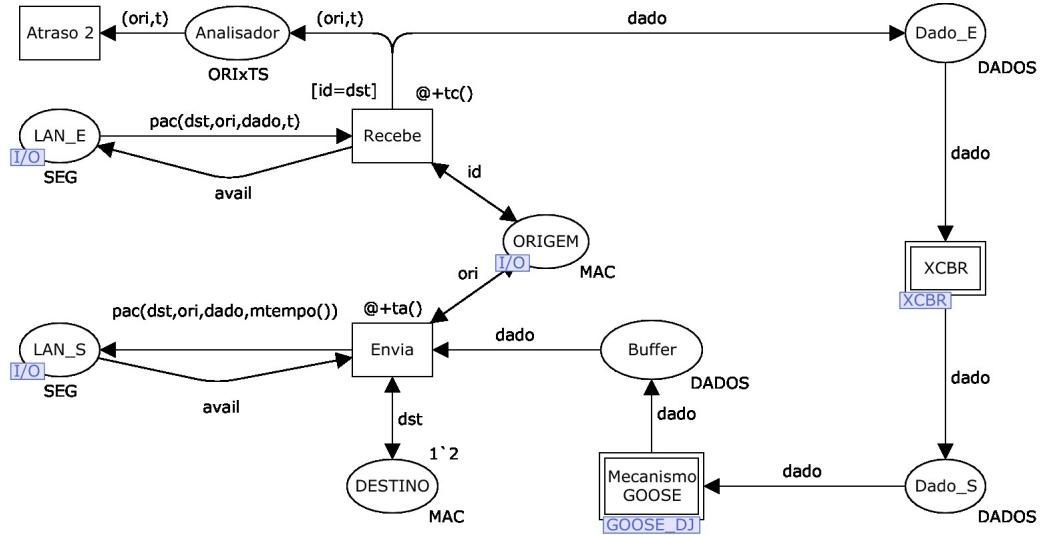


Figura 33: Modelo IED Disjuntor

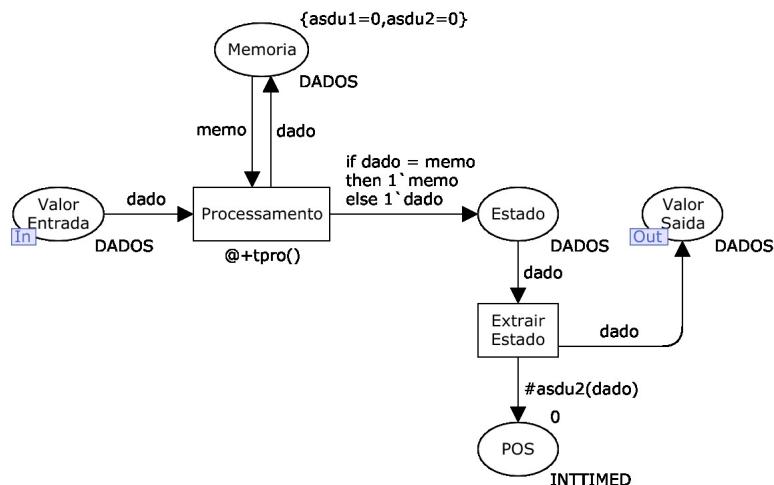


Figura 34: Modelo IED Disjuntor

5.4 Considerações Finais

A aplicação da modelagem CPN nos cenários IEC 61850 permite a avaliação e o entendimento da dinâmica destes sistemas. É possível, com os modelos, entender a conjuntura completa dos cenários, partindo da atribuição das funcionalidades, passando pela criação da arquitetura de comunicação e culminando na descrição dos nós lógicos.

Por tais motivos, diz-se que os objetivos de apresentação dos cenários de sistemas de comunicação IEC 61850, bem como a modelagem CPN destes sistemas, foram alcançados.

No capítulo seguinte, serão apresentadas, discutidas e comparadas as análises de desempenho destes sistemas segundo a ferramenta CPN.

6 Resultados e Análises dos Modelos CPN

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas simulações dos modelos CPN aplicados ao cenário IEC 61850, vistos no Capítulo 5.

Mais uma vez dividem-se os trabalhos em duas frentes. A primeira é uma análise comparativa dos resultados obtidos pela modelagem CPN em relação aos resultados obtidos no trabalho de Ingram [7]. A segunda frente avalia um mecanismo de teste definido como *Round Trip Test*, bastante utilizado em telecomunicações, inserido no contexto IEC 61850, e novamente faz-se o comparativo entre o sistema modelado e o sistema real.

6.1 Análise de mensagens Sampled Value

Apresentado na Seção 5.2, o trabalho desenvolvido por Ingram utiliza um equipamento analisador de tráfego de rede (DAG7.5G4) para avaliar o comportamento temporal do envio de mensagens *Sampled Values* e o tratamento destas mensagens em um *switch*.

Como metodologia de análise de desempenho deste cenário, Ingram propõe ensaios do sistema em condições críticas de funcionamento, o que em seu texto é definido como limites de capacidade do sistema. Em suas avaliações, duas condições são estudadas, o número de dispositivos e o espaçamento entre os envios das mensagens pelos *merging units*.

Seguindo a metodologia de Ingram e utilizando seus parâmetros como base comparativa, este trabalho cita os resultados obtidos em [7] (sistema real) e em seguida expõe os resultados obtidos pelo sistema modelado, a fim de julgar se tal modelo representa adequadamente o sistema *Sampled Values*.

6.1.1 Limites de capacidade

Para que haja comparação entre o modelo CPN e a bancada de teste de Ingram, são utilizadas as mesmas condições críticas de número de dispositivos e espaçamento de envio de mensagens.

Ingram demonstra que o número limite teórico de dispositivos que o sistema suporta, dado um *link* de conexão Ethernet de 100 Mbps, é de 22 MUs uma vez que as mensagens são de 138 bytes e são enviados 4000 mensagens em 1 segundo (97,2 Mbps). Também demonstrado em [7], o espaçamento mínimo que deve ser obedecido no envio dos pacotes SV entre os *merging units* para que não haja perda de pacotes. Ingram revela um espaçamento crítico de $2 \mu\text{s}$. De posse destes limites, Ingram propõe dois cenários a serem estudados, um com 21 MUs e outro com 22 MUs conectados ao *switch*.

Além destes limites operacionais, o autor desta dissertação, insere uma avaliação sobre a influência que o tempo de processamento do *switch* provoca no sistema.

Para tanto, a seguir são apresentados os cenários com 21 e 22 MUs tanto para o sistema de análise de desempenho real quanto o sistema modelado.

6.1.2 Cenário com 21 merging units

6.1.2.1 Sistema real

O teste com 21 MUs é sugerido por Ingram uma vez que este número de dispositivos está logo abaixo do limite calculado. A Figura 35 mostra um gráfico retirado de [7] que indica, de baixo para cima, o tempo que a mensagem SV leva para ser transmitida dos *merging units* 1 ao 21 até o analisador. Este comportamento crescente no atraso do tempo de transmissão de cada MU é justificado pelo tempo de processamento do *switch*, que cria filas e consequentemente cria escalonamento no tratamento das mensagens. Pela figura, verifica-se que, mesmo com a esta formação de filas, o sistema é estável para este número de dispositivos. Além disso, a Figura 35 mostra o surgimento dos “blips” (pequenos picos no atraso da mensagem) que são explicados pelas variações no tempo de processamento do *switch*.

6.1.2.2 Sistema modelado

Na Figura 36, três condições com 21 MUs são apresentadas no modelo CPN a fim de compará-las aos resultados da Figura 35. O que é variado entre as simulações é justamente

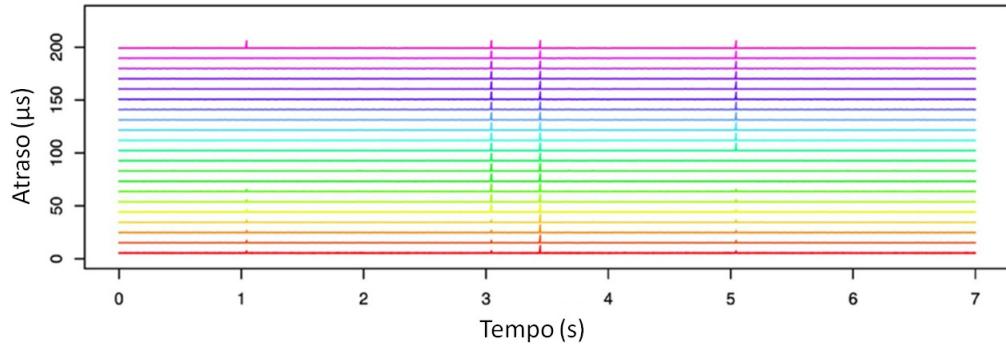


Figura 35: Análise Temporal 21 MUs – bancada Ingram [7]

o tempo de processamento do *switch*, que é uma avaliação sugerida apenas para o trabalho desta dissertação.

Uma equação básica permite verificar o limite temporal para o processamento dos pacotes no *switch*.

$$T_{\max} = \frac{T_{\text{amostragem}}}{N_{\text{dispositivos}}} \quad (1)$$

Os termos da equação (1), representam respectivamente:

T_{\max} = tempo máximo de processamento do *switch*;

$T_{\text{amostragem}}$ = tempo de amostragem do sinal;

$N_{\text{dispositivos}}$ = número de dispositivos conectados ao *switch*.

Com a equação (1), tem-se que o tempo limite de processamento é $11,904 \mu\text{s}$, uma vez que o tempo de amostragem é $250 \mu\text{s}$ e o número de dispositivos é 21.

São então sugeridos, a título de avaliação, três tempos para o processamento do *switch*. A Figura 36a representa a simulação para um tempo de processamento de $11 \mu\text{s}$. Enquanto isso a Figura 36b representa um tempo de $11,5 \mu\text{s}$. E por fim a Figura 36c representa a simulação para um caso onde o tempo de processamento é de $12 \mu\text{s}$.

Conforme o exposto na Figura 36 nota-se que o comportamento é estável para o sistema com 21 MUs e tempo de processamento 11 e $11,5 \mu\text{s}$, pois estes valores estão dentro dos limites operacionais, destacando ainda que para $11 \mu\text{s}$, o comportamento é idêntico ao sistema real. Para o tempo $11,5 \mu\text{s}$ existem pequenas oscilações nos tempos justificadas pela formação de fila no *switch*. Já o tempo de $12 \mu\text{s}$ ultrapassa o limite estabelecido na equação (1), fazendo com que o *switch* não consiga processar os pacotes em tempo hábil, provocando aumento na fila de processamento até que o limite de armazenamento seja

alcançado, levando a perda de pacotes.

É importante ressaltar que os desenhos dos gráficos estão em escalas diferentes. Enquanto o sistema real está baseado no tempo de simulação em segundos, o sistema modelado leva em consideração o número da amostra processada.

Mesmo com esta diferença, tem-se que para um tempo de processamento do *switch* de $11\ \mu\text{s}$ os comportamentos dos sistemas são rigorosamente os mesmos bem como a ordem dos tempos de atrasos das mensagens. Para as outras duas variações o comportamento condiz com a análise teórica, uma vez que o sistema torna-se instável quando o limite do tempo de processamento é ultrapassado.

6.1.3 Cenário com 22 merging units

6.1.3.1 Sistema real

No segundo experimento de Ingram, testou-se o sistema com 22 *merging units*. Foram também testados três fabricantes diferentes de *switches* nomeados A, B e C com a finalidade de verificar se havia significativa diferença entre eles como mostra a Figura 37. O que é feito nesta dissertação, é a avaliação para três tempos de processamento do *switch* diferentes, com a finalidade de simular três dispositivos diferentes.

A Figura 37 mostra que o comportamento das mensagens sofre com saturação do *buffer* do *switch*. Para este caso o número limite de 22 dispositivos não é suportado. A tendência crescente, semelhante ao comportamento do sistema com 21 MUs e tempo de processamento $12\ \mu\text{s}$ (Figura 36c), indica que as mensagens levam mais e mais tempo para serem processadas, até que no instante 0,07 segundos do teste a tendência crescente torna-se constante, confirmando a perda de pacotes.

6.1.3.2 Sistema modelado

O cálculo feito para avaliar o tempo máximo de processamento do *switch* apresentado na equação (1), é mais uma vez utilizado para levantar os limites de operação temporal do *switch*. Para este caso o limite é de $11,3636\ \mu\text{s}$, que é o resultado da divisão de $250\mu\text{s}$ por 22 MUs. Sendo assim, mais três simulações variando o tempo de processamento do *switch* foram feitas no ambiente CPN Tools, a fim de avaliar o comportamento dos tempos das mensagens. A Figura 38 apresenta os resultados dos dispositivos 1 e 22, apenas para elucidar o comportamento global das mensagens.

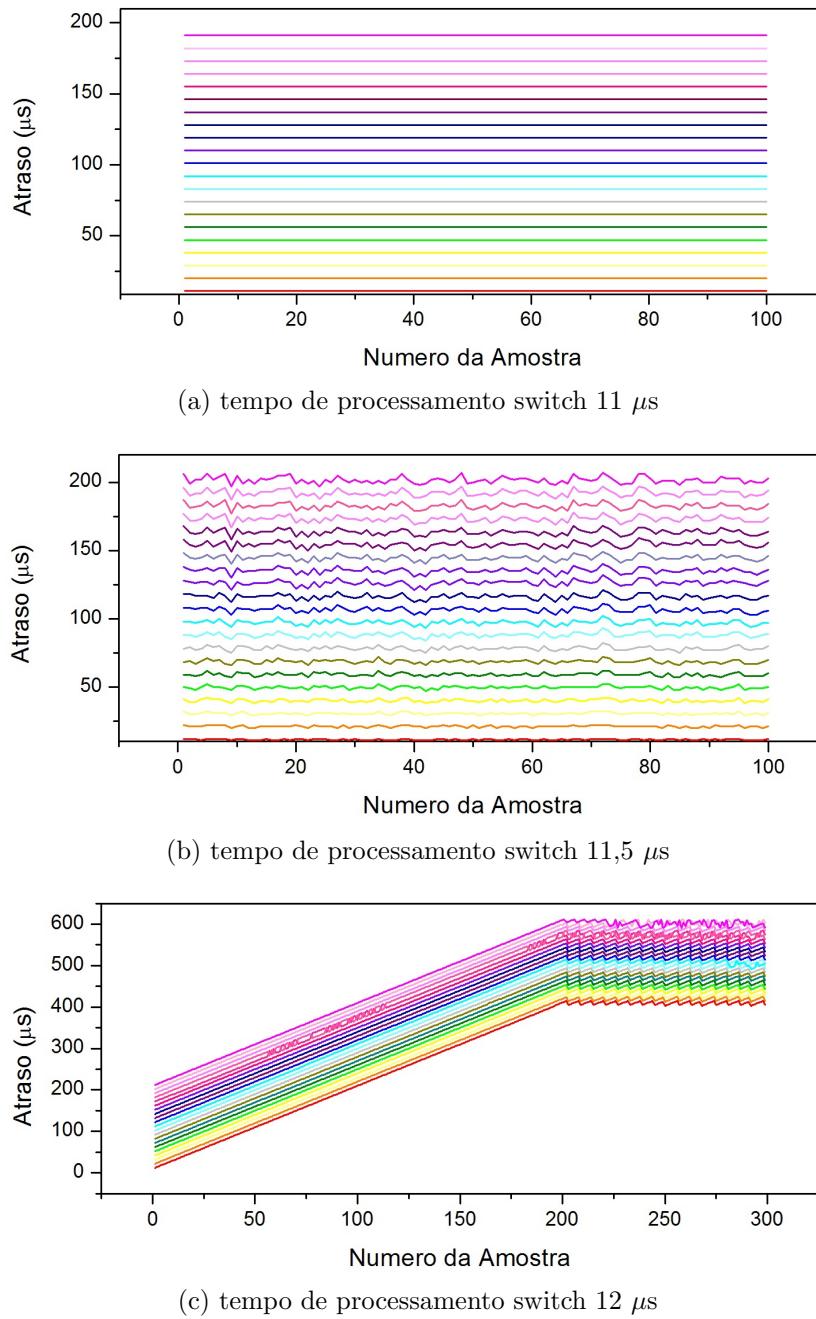


Figura 36: Análise temporal de 21 MUs no modelo CPN

Como resultados, percebe-se mais uma vez, que para um tempo de processamento de 11 microssegundos, o sistema com 22 MUs é estável, pois este tempo é suficiente para que não haja formação de filas. Já para os tempos 11,5 e 12 μs o comportamento torna-se instável, pois se ultrapassa o limite estabelecido. Verifica-se ainda que para 12 μs o sistema segue exatamente o padrão visto no teste de Ingram.

Sendo assim, pode-se dizer que através dos resultados obtidos pela simulação dos modelos CPN apresentados, o sistema modelado possui comportamento fiel ao sistema

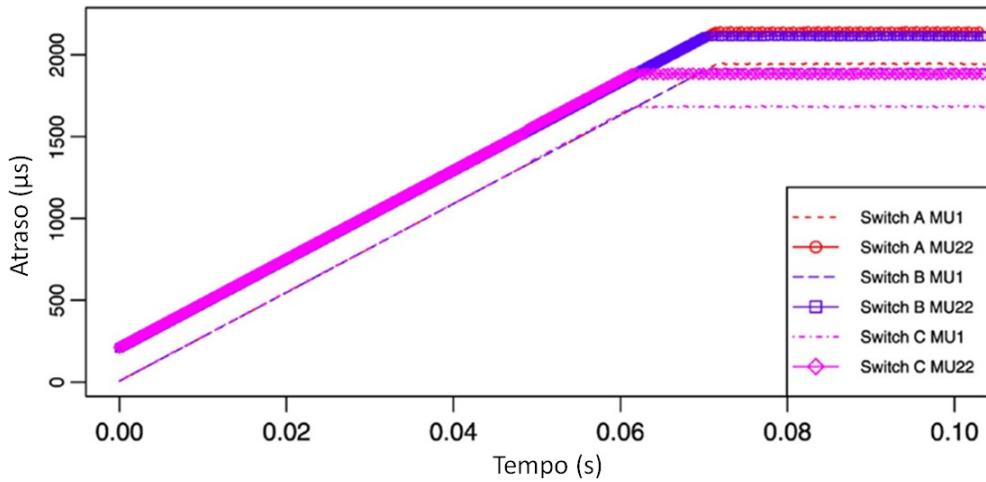


Figura 37: Análise temporal 22 MUs – bancada Ingram [7]

real e, portanto, é válido para análise de desempenho do envio de mensagens SV.

6.2 Análise de mensagens GOOSE

Para análise de desempenho das mensagens GOOSE no cenário IEC 61850, mais uma vez faz-se um estudo comparativo entre o sistema real e o sistema modelado. Para o estudo do sistema IEC 61850 com transferência de mensagens GOOSE, utiliza-se como base comparativa o trabalho de Mekkanen *et al* [12]. Neste trabalho é utilizado o método definido como *Round Trip Test* a fim de analisar os atrasos das mensagens GOOSE em um sistema de proteção.

O *Round Trip Test* é um método de análise temporal de sistemas de telecomunicação que consiste em medir os tempos envolvidos no processo de envio e recepção de mensagens. Basicamente este teste consiste em verificar o tempo que um sinal leva para ir ao seu destinatário e voltar. A partir deste tempo os outros parâmetros temporais são levantados.

Assim sendo, o que é mostrado a seguir são os resultados deste experimento confrontados aos resultados obtidos dos modelos CPN.

6.2.1 Sistema real

Em seu trabalho, Mekkanen apresenta toda a metodologia utilizada para a análise dos tempos de atraso das mensagens GOOSE. Contudo, para o trabalho desta dissertação, o que é interessante é o levantamento temporal feito por ele.

A Tabela 4, apresenta os resultados obtidos no teste de *Round Trip* envolvendo o IED

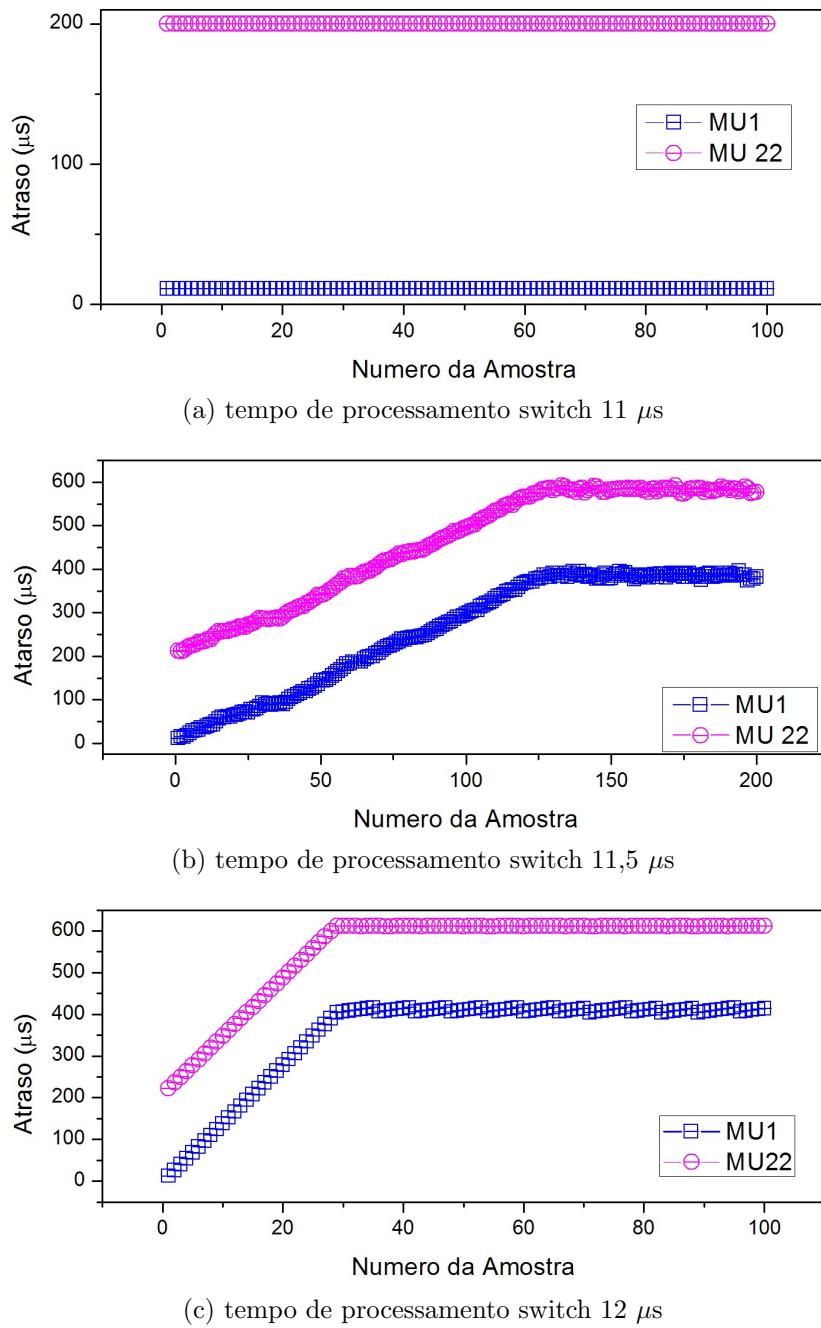


Figura 38: Análise temporal 22 MUs modelo CPN

de proteção de alimentador do fabricante ABB (REF615). São envolvidos três tempos. T_{RT} que indica o tempo total para o envio e recebimento da mensagem GOOSE pelo dispositivo, T_{PRO} que indica o tempo envolvido no processamento interno do dispositivo e o T_{TRANS} que é o tempo que a mensagem leva para ser transmitida de um dispositivo ao outro. Admite-se que o tempo tanto para a mensagem ir quanto voltar é a mesma. A equação (2) exemplifica a relação dos tempos.

$$T_{RT} = T_{TRANS_IDA} + T_{TRANS_VOLTA} + T_{PRO} \quad (2)$$

Tabela 4: Tempos envolvidos no envio de mensagens GOOSE [12]

Teste	T_{TRANS}	T_{PRO}	T_{RT}
1	0,881	1	2,763
2	0,827	1	2,654
3	0,824	1	2,648
4	0,796	1	2,593
5	0,802	1	2,605
6	0,7945	1	2,589
7	0,731	1	2,462
8	0,765	1	2,530
9	0,722	1	2,425
10	0,705	1	2,411

Ressalta-se que o tempo de transmissão (T_{TRANS}) é multiplicado por dois, representando os caminhos de ida e volta da mensagem, só assim contabiliza-se o tempo total (T_{RT}).

6.2.1.1 Sistema modelado – Parâmetros estocásticos

De posse dos resultados obtidos no trabalho de Mekkanen, apresentam-se a seguir os resultados obtidos nas simulações CPN. Buscando a validação do modelo apresentado na Seção 5.3, utilizou-se a mesma base de dados dos testes feitos em [7] e [12]. Sendo assim, a Tabela 5 apresenta os tempos envolvidos nas simulações.

Discutindo sobre estes valores de tempo médio, tem-se que tempo de amostragem é o mesmo estabelecido pela norma IEC 61850-9-2 LE, que sugere 80 amostras por ciclo. Como o sistema é 50 Hz, o tempo de amostragem é de 250 μ s. Na Seção 3.5, citam-se os tempos envolvidos no tempo de transmissão de mensagens no cenário IEC 61850: tempo de codificação (ta), tempo de propagação (tb) e tempo de decodificação (tc). O tempo ($tpro$) representa o tempo de processamento interno do IED, que neste caso é de 1 ms, definido pelo fabricante ABB. Os tempos máximo e mínimo de retransmissão são definidos pelo autor desta dissertação, baseando-se em equipamentos de fabricantes de IEDs como SEL e ABB.

Tabela 5: Parâmetros estocásticos do modelo GOOSE CPN

Parâmetros estocásticos	Descrição	Tempo médio (μ s)
$t_{sv}()$	Tempo de amostragem	250
$ta()$	Tempo codificação	405
$tb()$	Tempo propagação	23
$tc()$	Tempo decodificação	405
$tpro()$	Tempo processamento	1000
$tmin()$	Tempo mínimo re-transmissão GOOSE	1000
$tmax()$	Tempo máximo re-transmissão GOOSE	1000000

Todos estes tempos são considerados estocásticos, pois no modelo CPN estes parâmetros são definidos por funções de distribuição normal onde são determinados o tempo médio e sua variância. Para os resultados aqui expostos, a título de exemplificação de estocástica, definem-se erros da ordem de 1% nos tempos médios dos parâmetros. Este erro é repassado ao desvio padrão de todas as funções com distribuição normal, que modelam a estocástica de cada parâmetro de tempo definido nos modelos CPN.

6.2.1.2 Sistema modelado – Simulações

Antes da apresentação dos resultados das simulações do modelo GOOSE, discute-se brevemente sobre o método de simulação usado para avaliar os modelos da Seção 5.3.

Para observar a mudança de estado no sistema e a consequente rajada de disparos da mensagem GOOSE, inseriu-se no arquivo texto “tcffile.txt”, uma condição de sobrecorrente. Este estado de sobrecorrente é criado colocando uma ficha no modelo **MU** no formato 1‘(50,15), representando que a amostra número 50 tem valor de corrente de 15 unidades de corrente, o que excede o limite do nó lógico **PIOC** de 10 unidades de corrente. Na simulação do modelo, esta ficha está disponível no instante próximo a 3800 ms, e a Figura 39 mostra que é neste período que a dinâmica das mensagens GOOSE é alterada.

Conhecendo o método de simulação, apresentam-se agora os resultados das simulações dos modelos da Seção 5.3.

São considerados quatro avaliações distintas. A primeira avaliação mostra o perfil do envio de mensagens GOOSE (Figura 39). A segunda e a terceira mostram os atrasos referentes ao envio das mensagens do IED Proteção para o IED Disjuntor (Atraso 1) e

do IED Disjuntor para o IED Proteção (Atraso 2). As Figuras 40 e 41 mostram estes atrasos. Por fim é apresentado, na Figura 42, o tempo de *Round Trip* que envolve a ida da mensagem do IED Proteção ao IED Disjuntor e a volta ao IED Proteção.

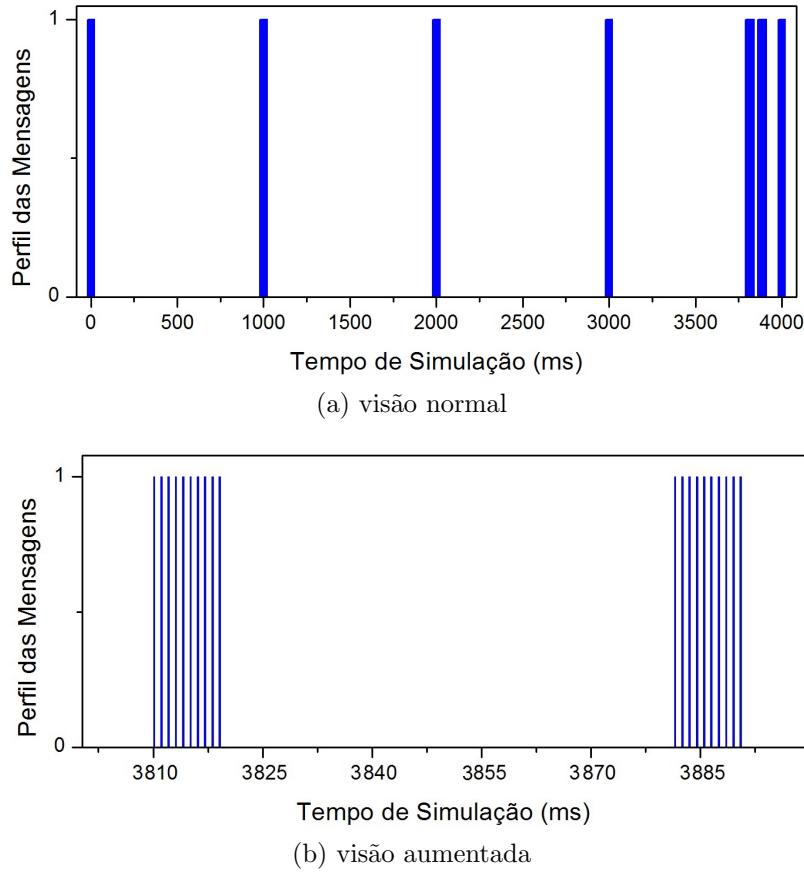


Figura 39: Perfil das mensagens GOOSE

A Figura 39a representa a visão do **Analizador**. Percebe-se que no início da simulação o sistema é determinístico, enviando uma mensagem a cada 1000 ms ou 1 segundo, definido na Tabela 5 como t_{max} . No tempo de simulação próximo aos 3800 milisegundos, ocorrem dois eventos. O primeiro identifica que o estado foi para a condição de sobrecorrente, enviando portanto um *trip*. O segundo identifica uma nova mudança de estado, uma vez que o sistema retornou à condição normal. A Figura 39b ilustra a visão aumentada do intervalo de simulação entre 3810 ms a 3900 ms. Verifica-se que para as duas mudanças de estado, são enviados 10 mensagens (rajada), a fim de garantir a entrega de ao menos um pacote.

Na sequência, são analisados os atrasos das mensagens e o tempo de *Round Trip*.

O resultado obtido nas Figuras 40 e 41 (Atraso 1 e Atraso 2), permite confirmar que o tempo de transmissão está dentro dos parâmetros estabelecidos pela IEC 61850, segundo o desempenho temporal das mensagens GOOSE. Como visto na Seção 3.5, o tempo de

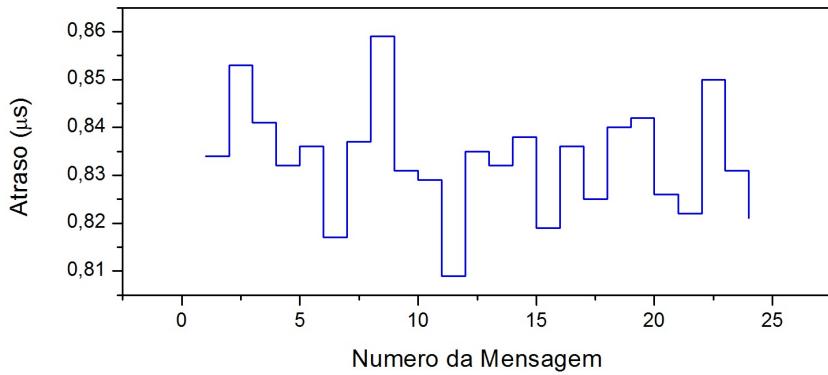


Figura 40: Atraso 1 – IED Proteção para IED Disjuntor

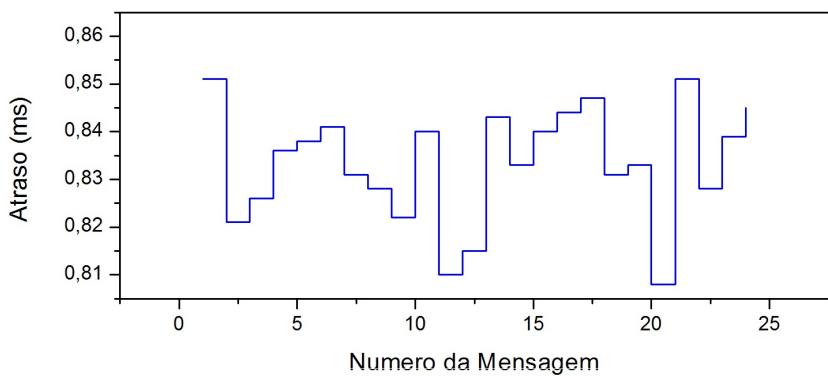


Figura 41: Atraso 2 – IED Disjuntor para IED Proteção

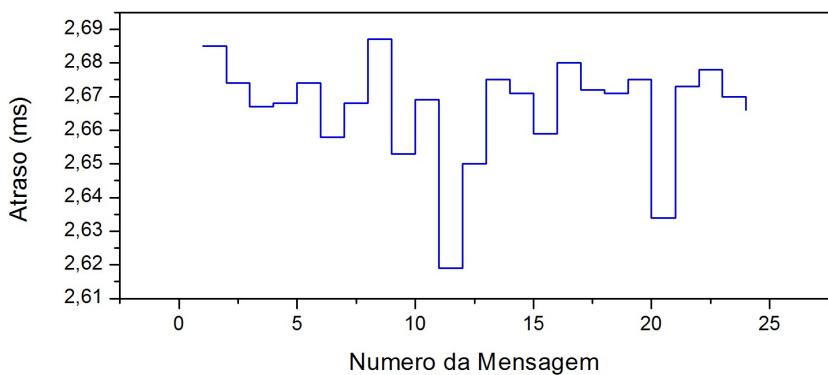


Figura 42: Tempo de Round Trip

transmissão de mensagens prioritárias, como o caso do GOOSE carregando uma mensagem de sobrecorrente através de um *trip*, é qualificado como mensagem do tipo 1 com prioridade 3. Este tipo de mensagem é limitado em 3 ms, portanto o sistema modelado permite o envio da mensagem em um intervalo de 0,81 a 0,86 ms, valores próximos aos encontrados no trabalho de Mekkanen (Tabela 4). O valor médio encontrado foi de 0,833 para o Atraso 1 e 0,834 para o Atraso 2, indicando que ambos os *links* possuem legitimidade à norma IEC 61850.

A Figura 42 mostra a ordem de grandeza do tempo de *Round Trip* que verifica o tempo total da ação de comunicação, ou seja, o tempo que o IED Proteção leva para enviar a mensagem com informação de sobrecorrente e receber a confirmação de que o disjuntor atuou. A média obtida é de 2,665 ms no modelo CPN, valor bem próximo ao encontrado no trabalho de Mekkanen (2,568 ms). Mais uma vez tem-se que o sistema de comunicação trabalha conforme o que é sugerido pela norma.

6.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados e as análises comparativas dos testes reais aos testes modelados. A metodologia de comparação utilizada evidenciou-se adequada para alcançar o objetivo de validação dos modelos CPN no cenário IEC 61850. As duas frentes, a primeira trabalhando com mensagens *Sampled Value* e a segunda trabalhando com GOOSE, obtiveram valores semelhantes aos sistemas reais, permitindo concluir que os modelos CPN encaixam-se perfeitamente como ferramenta de avaliação de desempenho de redes baseadas na norma IEC 61850.

7 Conclusão

Sumarizando o trabalho desenvolvido, este capítulo traz as conclusões e contribuições desta dissertação. Ainda, neste capítulo, são sugeridos os trabalhos futuros.

7.1 Conclusões Gerais

É notório, na análise comparativa feita entre os trabalho de Ingram e Mekkanen (sistemas reais de testes) e os modelos CPN, que este formalismo de modelagem de sistemas a eventos discretos é extremamente aplicável ao cenário de análise de desempenho de redes baseadas na norma IEC 61850. Os gráficos apresentados possuem características idênticas o que afirma a coerência do modelo em representar os cenários IEC 61850. O desenvolvimento desta metodologia de aplicação da modelagem permite uma facilidade na análise prévia de qualquer sistema IEC 61850. É possível analisar e comparar a distribuição dos nós lógicos, a arquitetura de comunicação, desenvolver lógicas de proteção baseadas na norma e, em destaque, avaliar o comportamento temporal do sistema.

Por se tratar de um sistema modelado que utiliza-se de parâmetros facilmente subs-
tituíveis, pode-se de dizer que a modelagem CPN é uma ferramenta poderosa, no *design* e pré-comissionamento de projetos baseados na IEC 61850, julgando características que só seriam sentidas em condições extremas. Não é necessário desenvolver um sistema real para levantar as características temporais do sistema e a lógica de funcionamento. Mesmo atualmente, com inúmeros recursos de simulação em tempo real, como é o caso do RTDS, os custos envolvidos são consideráveis.

Os cenários de teste apresentados por Ingram e Mekkanen necessitaram de dispositivos reais, como o DAG7.5G4, dispositivos *merging unit, switches* e IEDs que representam altos custos de implementação. Por isso, mais um vez confirma-se a contribuição deste trabalho.

Os resultados obtidos, de forma geral, apresentaram o correto comportamento de um sistema de comunicação IEC 61850, garantindo a ordem de grandeza dos sistemas reais

tanto para as mensagens *Sampled Value* quanto para as mensagens GOOSE, o que permite concluir que a modelagem e análise de sistemas de comunicação IEC 61850 por meio do formalismo das Redes de Petri Coloridas é uma nova solução para estes sistemas.

7.2 Trabalhos Futuros

Por trabalhos futuros sugerem-se algumas novas contribuições que a academia ainda não tratou:

- Conexão entre os formalismos CPN e Cadeias de Markov para avaliações probabilísticas de estados dos sistemas de comunicação IEC 61850;
- Estudo de espaços de estado dos modelos a fim de avaliar as propriedades de bloqueio e alcançabilidade;
- Análise exaustiva de arquiteturas IEC 61850 através de estratégias de inteligência artificial;
- Estudo das funcionalidades de proteção de sistema elétrico de potência verificando a influência do tempo de comunicação envolvido;
- Avaliação da distribuição dos nós lógicos nos dispositivos, buscando otimização de sistemas de proteção.

Referências

- [1] S. M. Kaplan, “Electric power transmission: background and policy issues,” *US Congressional Research Service, April*, vol. 14, pp. 4–5, 2009.
- [2] Y. Lopes, “SMARTFlow: Sistema Autoconfigurável para Redes de Telecomunicações IEC 61850 com arcabouço OpenFlow,” Master’s thesis, Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil, 2013.
- [3] A. Naumann, I. Bielchev, N. Voropai, and Z. Styczynski, “Smart grid automation using iec 61850 and cim standards,” *Control Engineering Practice*, vol. 25, pp. 102–111, 2014.
- [4] Siemens, “Smart Grid – a rede elétrica inteligente do futuro .” <http://www.siemens.com.br/desenvolvimento--sustentado--em--megacidades/smart-grid.html>, 2014. Online; accessado em 29 Julho 2014.
- [5] Smart Grid, “The Smart Grid.” https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid, 2014. Online; accessado em 28 Julho 2014.
- [6] IEC, *Communication networks and systems in substations – Part 1:Introduction and overview*. International Electrotechnical Commission, France, 2.0 ed., 12 2010.
- [7] D. M. Ingram, P. Schaub, R. R. Taylor, and D. A. Campbell, “Performance analysis of iec 61850 sampled value process bus networks,” *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 3, pp. 1445–1454, 2013.
- [8] C. G. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to discrete event systems*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [9] A. D. Vieira *et al.*, “Método de implementação do controle de sistemas e eventos discretos com aplicação da teoria de controle supervisório,” 2007.
- [10] Y.-C. Ho, “Introduction to special issue on dynamics of discrete event systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 1, pp. 3–6, 1989.
- [11] T. Murata, “Petri nets: Properties, analysis and applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, 1989.
- [12] M. Mekkanen, R. Virrankoski, M. Elmusrati, and E. Antila, “Analysis and methodology for measuring the iec61850 goose messages latency: Gaining interoperability testing,” in *Computer Applications and Information Systems (WCCAIS), 2014 World Congress on*, pp. 1–6, IEEE, 2014.
- [13] B. Falahati, M. J. Mousavi, and M. Vakilian, “Latency considerations in iec 61850-enabled substation automation systems,” in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pp. 1–8, IEEE, 2011.

- [14] A. Ghanaim, G. A. Borges, and G. Frey, "Estimating delays in networked control systems using colored petri nets and markov chain models," in *Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2009.
- [15] R. Feng, X. Cheng-Jun, M. Peng, and X. Yang, "Performance analysis for substation automation systems: A picom approach and improvement," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, pp. 1–6, IEEE, 2005.
- [16] R. A. Gupta and M.-Y. Chow, "Networked control system: overview and research trends," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 7, pp. 2527–2535, 2010.
- [17] Y. A. Millan, F. Vargas, F. Molano, and E. Mojica, "A wireless networked control systems review," in *Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*, pp. 1–6, IEEE, 2011.
- [18] P. Wen, J. Cao, and Y. Li, "Design of high-performance networked real-time control systems," *IET Control Theory & Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 1329–1335, 2007.
- [19] O. Simsek and M. Pospiech, "A network performance measurement tool," in *Broadband Network & Multimedia Technology (IC-BNMT), 2013 5th IEEE International Conference on*, pp. 45–48, IEEE, 2013.
- [20] F.-C. Liu and Y. Yao, "Modeling and analysis of networked control systems using hidden markov models," in *Machine Learning and Cybernetics*, pp. 928–931, 2005.
- [21] N. Bibinagar and W.-j. Kim, "Switched ethernet-based real-time networked control system with multiple-client–server architecture," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 18, no. 1, pp. 104–112, 2013.
- [22] Orth,Joerg, "Future power plant control – Integrating process and substation automation into one system." [http://www05.abb.com/global/scot/scot313.nsf/veritydisplay/37cc3658aa6c2cb3c12576ff0070719d/\\\$file/3BUS095133_en_Process_and_Substation_Integration_White_Paper.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot313.nsf/veritydisplay/37cc3658aa6c2cb3c12576ff0070719d/\$file/3BUS095133_en_Process_and_Substation_Integration_White_Paper.pdf), 2007. Online: accessado em 20 Agosto 2014.
- [23] C. Brunner, "Iec 61850 for power system communication," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&# x00026; D. IEEE/PES*, pp. 1–6, IEEE, 2008.
- [24] C. BRUNNER and I. de MESMAEKER, "How to use iec 61850 in protection and automation,"
- [25] IEC, *Communication networks and systems in substations – Part 5:Communication requirements for functions and device model*. International Electrotechnical Commission, France, 2.0 ed., 12 2010.
- [26] V. M. Flores, D. Espinosa, J. Alzate, and D. Dolezilek, "Case study: Design and implementation of iec 61850 from multiple vendors at cfe la venta ii," in *Protective Relay Engineers, 2007. 60th Annual Conference for*, pp. 307–320, IEEE, 2007.

- [27] C. E. Anderson, S. Zniber, Y. Botza, D. Dolezilek, and J. McDevitt, “Estudo de caso: Aplicação de iec 61850 em uma subestação de transmissão de gana,”
- [28] Leupp, Peter and Rytoft, Claes, “IEC 61850 – ABB Review Special Report.” [http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/a56430e1e7c06fdfc12577a00043ab8b/\\\$file/3BSE063756_en_ABB_Review_Special_Report_IEC_61850.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/a56430e1e7c06fdfc12577a00043ab8b/\$file/3BSE063756_en_ABB_Review_Special_Report_IEC_61850.pdf), 2010. Online: accessado em 12 Julho 2014.
- [29] T. Sidhu and Y. Yin, “Ied modelling for iec61850 based substation automation system performance simulation,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, pp. 7–pp, IEEE, 2006.
- [30] P. Crossley, L. Yang, A. Wen, R. Chatfield, M. Redfern, and X. Sun, “Design and performance evaluation for protection system utilizing iec 61850-9-2 process bus,” in *The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, pp. 534–538, IEEE, 2011.
- [31] H. Georg, N. Dorsch, M. Putzke, and C. Wietfeld, “Performance evaluation of time-critical communication networks for smart grids based on iec 61850,” in *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2013 IEEE Conference on*, pp. 43–48, IEEE, 2013.
- [32] M. G. Kanabar and T. S. Sidhu, “Performance of iec 61850-9-2 process bus and corrective measure for digital relaying,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 2, pp. 725–735, 2011.
- [33] N. Das, T. T. Aung, and S. Islam, “Process-to-bay level peer-to-peer network delay in iec 61850 substation communication systems,” 2013.
- [34] M. A. Ahmed, W.-H. Yang, and Y.-C. Kim, “Simulation study of communication network for wind power farm,” in *ICT Convergence (ICTC), 2011 International Conference on*, pp. 706–709, IEEE, 2011.
- [35] T. Sidhu, M. Kanabar, and P. Parikh, “Configuration and performance testing of iec 61850 goos,” in *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, vol. 2, pp. 1384–1389, IEEE, 2011.
- [36] R. Kuffel, D. Ouellette, and P. Forsyth, “Real time simulation and testing using iec 61850,” in *Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium*, pp. 1–8, IEEE, 2010.
- [37] C. A. V. Guerrero, “Uso do RTDS em testes de esquemas de teleproteção aplicando o padrão IEC 61850,” Master’s thesis, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Brasil, 2011.
- [38] C. Fernandes, S. Borkar, and J. Gohil, “Testing of goos protocol of iec 61850 standard in protection ied,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 93, pp. 30–35, 2014.
- [39] J.-C. Tan, V. Green, and J. Ciufo, “Testing iec 61850 based multi-vendor substation automation systems for interoperability,” in *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE’09. IEEE/PES*, pp. 1–5, IEEE, 2009.

- [40] L. Wells, “Performance analysis using cpn tools,” in *Proceedings of the 1st international conference on Performance evaluation methodologies and tools*, p. 59, ACM, 2006.
- [41] M. Bago, N. Peric, and S. Marijan, “Modeling wire train bus communication using timed colored petri nets,” in *SICE Annual Conference, 2008*, pp. 2905–2910, IEEE, 2008.
- [42] M. Bago, N. Peric, and S. Marijan, “Simulation of a train communication system using timed colored petri nets,” in *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2009.
- [43] W. C. Lopes, *Análise de desempenho do protocolo CAN para aplicação na área agrícola utilizando redes de Petri coloridas*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2007.
- [44] P. H. F. Machado and L. E. Souza, “Proposição e modelagem de uma rede de sensores sem fio de baixo custo,” in *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 1–6, 2013.
- [45] Y. He, T. Liu, H. Zhong, J. Liu, and Q. Xiong, “Timed cp-nets based roq attack modeling and system defense analysis,” in *Innovative Computing & Communication, 2010 Intl Conf on and Information Technology & Ocean Engineering, 2010 Asia-Pacific Conf on (CICC-ITOE)*, pp. 199–204, IEEE, 2010.
- [46] I. Canales, P. Ibanez, J. Torres, E. Garcia, F. Cobelo, J. Urquiza, and J. Galtetero, “Interuca project: Uca interoperability for distributed control within electrical substations,” in *CIGRE, no. B5-204*, pp. 1–8, CIGRE, 2004.
- [47] A. C. Pereira, R. Abboud, R. Pellizzoni, E. Zanirato, and D. Caceres, “Sistemas de proteção e automação de subestações de distribuição usando a norma iec 61850,” in *CIGRE, no. B5-22*, pp. 1–8, CIGRE, 2009.
- [48] N. Patel, *IEC 61850 Horizontal Goose Communication and Overview: IEC 61850 Horizontal Communication, Goose Messaging And Documentation. IEC 61850 Standard Overview And Understanding*. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
- [49] IEC, *Communication networks and systems in substations – Part 7-2: Abstract communication service interface (ACSI)*. International Electrotechnical Commission, France, 2.0 ed., 12 2010.
- [50] IEC, *Communication networks and systems in substations – Part 7-4: Basic communication structure – Compatible logical node classes and data object classes*. International Electrotechnical Commission, France, 2.0 ed., 12 2010.
- [51] M. E. C. Paulino, “Liberdade de configuração com funções distribuídas através da decomposição funcional estabelecida pela norma iec 61850,” in *Encontro Regional Iberoamericano de CIGRE*, pp. 1–8, CIGRE, 2009.
- [52] IEC, *Communication networks and systems in substations – Part 8-1: Specific communication service mapping – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISOIEC 8802-2*. International Electrotechnical Commission, France, 2.0 ed., 12 2010.

- [53] C. Kriger, S. Behardien, and J. Retonda-Modiya, “A detailed analysis of the goose message structure in iec 61850 standard-based substation automation system,” in *INT J COMPUT COMMUN, ISS 1841-9836*, pp. 708–721, CCC Publications, 2013.
- [54] IEC, *Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISOIEC 8802-3*. International Electrotechnical Commission, France, 2.0 ed., 12 2010.
- [55] J. Park, E. In, S. Ahn, C. Jang, and J. Chong, “Iec 61850 standard based mms communication stack design using oop,” in *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2012 26th International Conference on*, pp. 329–332, IEEE, 2012.
- [56] IEC, *Communication networks and systems in substations – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs*. International Electrotechnical Commission, France, 2.0 ed., 12 2010.
- [57] M. E. C. Paulino, A. Cascaes, D. Cáceres, R. T. S. Alexandre, L. Biondi Neto, and E. Silva, “Procedimentos de teste de conformidade e interoperabilidade a luz da norma iec 61850 aplicados a subestações,” in *Seminário Nacional de Produç ao e Transmissão de Energia Elétrica*, pp. 1–8, SNPTEE, 2007.
- [58] J. R. Norris, *Markov chains*. No. 2, Cambridge University Press, 1998.
- [59] C. A. Petri, “Kommunikation mit automaten,” 1962.
- [60] N. Gharbi, C. Dutheillet, and M. Ioualalen, “Colored stochastic petri nets for modelling and analysis of multiclass retrial systems,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 49, no. 7, pp. 1436–1448, 2009.
- [61] G. Chiola, C. Dutheillet, G. Franceschinis, and S. Haddad, “Stochastic well-formed colored nets and symmetric modeling applications,” *Computers, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 11, pp. 1343–1360, 1993.
- [62] CPN Tools, “CPN Tools.” <http://cpn-tools.org/>, 2014. Online; accessado em 14 Janeiro 2015.
- [63] J. D. Ullman, *Elements of ML Programming*. No. 2, Prentice Hall, 1998.
- [64] I. Al-Azzoni, D. G. Down, and R. Khedri, “Modeling and verification of cryptographic protocols using coloured petri nets and design/cpn,” *Nord. J. Comput.*, vol. 12, no. 3, pp. 200–228, 2005.
- [65] W. M. van der Aalst, C. Stahl, and M. Westergaard, “Strategies for modeling complex processes using colored petri nets,” in *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency VII*, pp. 6–55, Springer, 2013.
- [66] D. A. Zaitsev and T. R. Shmeleva, “Switched ethernet response time evaluation via colored petri net model,” in *Proc. of International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling*, pp. 68–77, 2006.

- [67] UCA International Users Group, “Implementations Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850-9-2.” http://iec61850.ucaiug.org/Implementation%20Guidelines/DigIF_spec_9-2LE_R2-1_040707-CB.pdf, 2004. Online; accessado em 10 Janeiro 2015.
- [68] P. H. F. Machado and L. E. Souza, “Metodologia de análise de desempenho de redes de comunicação baseadas na norma iec 61850 utilizando redes de petri colorida esto- cástica,” in *11th International Conference on Industry Applications*, pp. 1–8, 2014.

Apêndice – Artigo submetido ao INDUSCON

2014

Metodologia de Análise de Desempenho de Redes de Comunicação baseadas na norma IEC 61850 utilizando Redes de Petri Colorida Estocástica

Pedro Henrique Ferreira Machado

IESTI

Universidade Federal de Itajubá
Itajubá, Brasil
machado.pferreira@gmail.com

Luiz Edival de Souza

IESTI

Universidade Federal de Itajubá
Itajubá, Brasil
edival@unifei.edu.br

Abstract - No padrão IEC 61850, definem-se alguns parâmetros de desempenho na comunicação, sendo estes parâmetros de fundamental importância na automação de sistemas de potência. No que se refere à análise de desempenho de redes de comunicação, uma ferramenta muito comum são os modelos de Rede de Petri Colorida Estocástica (CSPN). Assim, este trabalho combina os modelos em CSPN com as diretrizes de tempo apresentadas na norma IEC 61850 para uma análise de desempenho.

Para tanto, apresenta-se uma metodologia utilizando CSPN a fim de modelar redes de comunicação seguindo a estruturação definida na norma IEC 61850. Caracterizam-se aqui as peças fundamentais do padrão, como: *Intelligent Electronic Devices* (IED), topologias de rede, distribuição de nós-lógicos, desempenho de sistema. A partir de um exemplo, analisam-se e discutem-se algumas características relevantes na comunicação, como tempo de processamento, tempo de transmissão, perdas de pacotes em um automatismo de proteção de sistemas de potência bastante comum ao cenário da IEC 61850 e das *Smart Grids*.

Palavras-chave – IEC 61850, *Smart Grid*, desempenho de redes de comunicação, CSPN

I. INTRODUÇÃO

Conceituado em [1] e [2], as *Smart Grids* tem por definição mais abrangente, redes inteligentes de transmissão e distribuição de energia com base na comunicação interativa entre todas as partes da cadeia de conversão de energia. As *Smart Grids* conectam unidades descentralizadas de geração grandes e pequenas com os consumidores evitando sobrecarga da rede, já que durante todo o tempo apenas é gerada tanta energia quanto o necessário [1].

Duas das peças fundamentais desta malha elétrica, tida como inteligente, são os *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) e as redes de comunicação. Os IEDs estão inseridos nos barramentos de processo das *Smart Grids* e são equipamentos que possuem inteligência suficiente, que de forma remota ou

local, conseguem receber e enviar dados, calcular, monitorar e tomar decisões rápidas e confiáveis.

Já as redes de comunicação permitem a transferência dos dados entre os componentes das *Smart Grids*. Por isso, a tecnologia da informação esta inserida neste cenário. Intercâmbio de dados, topologia de rede, controle descentralizado, segurança, são características intrínsecas aos sistemas de comunicação e são também parte importante das redes inteligentes do setor de potência elétrica.

Mas para que as informações sejam trocadas de forma correta, confiável e eficiente, é necessária uma padronização da comunicação dos dados. Surge então a norma IEC 61850. Referenciado em [3], a norma IEC 61850 propõe padrões para os serviços e formatos dos dados trocados em uma rede de equipamentos do sistema elétrico.

A aplicação da norma IEC 61850 no conceito das *Smart Grids* é conhecido, contudo pouco se sabe do comportamento das redes de equipamentos, especialmente nos barramentos de processo com grande número de dispositivos (IEDs) trocando informações. Discutido em [4], estes comportamentos, ainda não pontuados, devem ser investigados a fim de propor redes mais seguras e confiáveis.

O IED possui desempenho definido pelos fabricantes e, portanto, para esta abordagem, diz-se que o seu comportamento é determinístico. Já as redes de comunicação possuem caráter estocástico o que representa indeterminação no desempenho dos sistemas inteligentes. Neste contexto, surge a relevância deste trabalho que tem por objetivo desenvolver uma metodologia de análise de sistemas de comunicação, a fim de avaliar, conceituar e revelar pontos fundamentais na aplicação das redes de dados baseadas na norma IEC 61850 em sistemas reais. Para isso, utiliza-se a modelagem de sistemas a eventos discretos definida como *Colored Stochastic Petri Net* (CSPN), traduzido como Redes de Petri Colorida Estocástica.

Na literatura, alguns trabalhos evidenciam a pertinência das CSPNs na modelagem de sistemas de comunicação. Em [5], faz-se uma análise do atraso de mensagens nos sistemas de controle baseados em redes. Já em [6], as formulações baseadas em CSPN são utilizadas para validar o tempo de transferência de mensagens entre os nós-lógicos definidos na norma IEC 61850.

Sendo assim, estrutura-se este trabalho da seguinte forma. Apresenta-se na Seção II uma breve explanação da norma IEC 61850. Na Seção III o formalismo da CSPN é explicitado. De posse destes conceitos, a Seção IV indica uma metodologia para o desenvolvimento da modelagem, usando CSPN, de sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850. Os resultados desta metodologia são discutidos na Seção V. Por fim, a Seção VI sugere os trabalhos futuros e expressa as conclusões do trabalho.

II. IEC 61850 – VISÃO GERAL

A norma IEC 61850 é um padrão internacional que define a forma de comunicação e serviços entre os diferentes equipamentos presentes na automação de sistemas elétricos de potência [7]. Estabelece como objetivos: interoperabilidade entre fabricantes, livre configuração (modelagem), estabilidade em longo prazo.

Os benefícios mais significativos da implementação deste padrão são a independência de tecnologia futura, facilidade de manutenção em longo prazo, redução de cabeamento, especificação livre e intercâmbio de dados a alta velocidade.

O modelo adotado para a estruturação de comunicação da norma é o TCP/IP, representado na figura 1. Este permite um intercâmbio de mensagens em alta velocidade de forma segura.

Por trabalhar sobre um modelo de redes de comunicação, a norma produz o efeito de substituição dos cabos de instrumentação, por cabos de redes, reduzindo os custos de cabeamento. Outra importante vantagem advinda do modelo TCP/IP, como já mencionado, é o suporte as tecnologias futuras, seja em *software* ou em *hardware*.

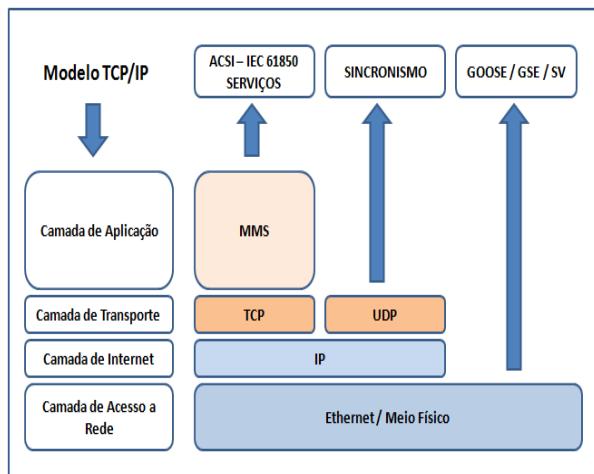


Figura 1. Modelo de comunicação IEC 61850

A norma propõe uma estrutura bem definida no desenvolvimento de modelos para a virtualização das funções de automação dos sistemas elétricos de potência, como demonstrado na figura 2. Por exemplo, a função de um disjuntor real é representada por uma função virtual denominada XCBR, e todas as suas características como estado e bloqueio estão definidas nesta função.

Esta utiliza programação orientada a objeto e subdivide as funções em objetos chamados nós-lógicos, os quais possuem dados. O nó-lógico é a menor estrutura que pode trocar informações. Cada um destes nós-lógicos possui um conjunto de dados específicos pertencentes a um dado grupo de funções, por exemplo, o grupo de disjuntores, o grupo de monitores de tensão e corrente, o grupo de proteção, assim por diante. Os nós-lógicos são agrupados em dispositivos lógicos os quais são inseridos a dispositivos físicos (IEDs).

Desta forma, diz-se que o padrão IEC 61850 é um modelo hierárquico caracterizado como *Abstract Communication Service Interface* (ACSI) e pode ser entendido na figura 3. Em [8] é apresentado e definido este modelo.

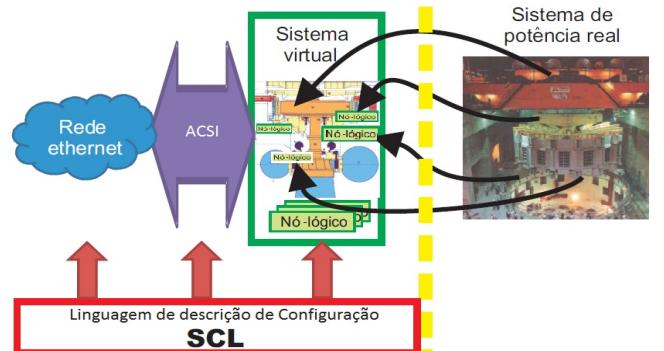


Figura 2. Virtualização de sistema real

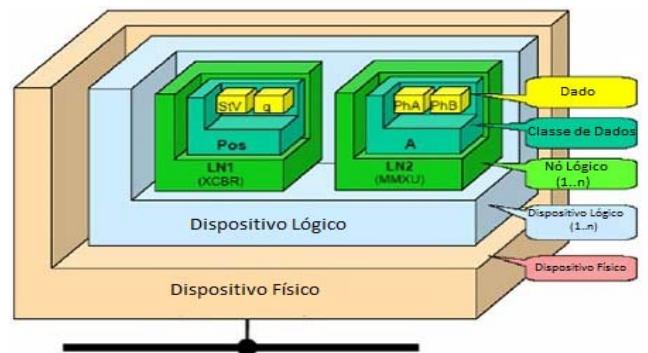


Figura 3. Modelo hierárquico de informação (ACSI)

A linguagem definida como *Substation Configuration description Language* (SCL), apresentada na parte 6 da norma [9], incorpora os conceitos de herança e poliformismo presentes nas linguagens orientadas a objetos e, por conseguinte foi o padrão de linguagem adotado. Esta linguagem é baseada no modelo denominado *Common*

Information Model – eXtended Markup Language (CIM-XML) o qual tem por fundamento a tecnologia desenvolvida no gerenciamento de sistemas computacionais distribuídos .

Discutido em [10], a importância da linguagem SCL é justamente padronizar a nomenclatura utilizada, uniformizando os tipos de dados e facilitando a troca de informações. Esta linguagem é usada para descrever o esquema unifilar, a rede de comunicação, as instâncias dos nós-lógicos e a sua associação com os equipamentos primários.

Todos estes padrões são relevantes uma vez que com eles a norma permite documentar formalmente os processos de engenharia, assegurar a interoperabilidade entre IEDs e definir ferramentas de desenvolvimento comuns, garantindo então a integração dos sistemas.

A. Nós-lógicos IEC 61850

O conceito de nós-lógicos introduzido anteriormente, é fundamental no processo de modelagem dos sistemas elétricos de potência segundo a norma IEC 61850. A forma que os nós-lógicos interagem, descreve de forma virtual o sistema real. Como um exemplo, toma-se a interação entre a função de proteção e o disjuntor, que juntos norteiam o mecanismo de proteção de distância em uma subestação.

A figura 4 indica a modelagem IEC 61850 para tal mecanismo de proteção.

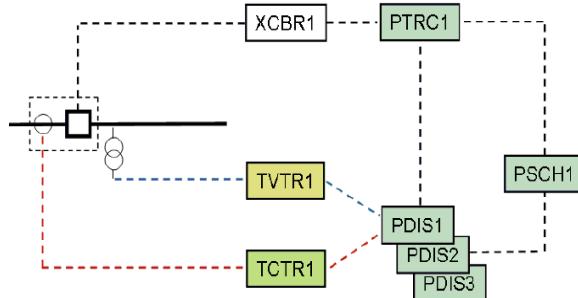


Figura 4: Modelagem IEC 61850 do mecanismo de proteção de distância

Em uma breve apresentação do modelo da figura 4, tem-se no início, recebendo os sinais dos transformadores de instrumentação, os nós-lógicos TCTR1 e TVTR1. Estes captam os valores analógicos medidos nos transformadores de corrente (TC) e nos transformadores de tensão (TP) comutando-os para valores digitais de corrente e tensão. Na norma os nós definidos no grupo T, como exemplo TCTR e TVTR, são tidos como grupo de medidores e sensores.

O grupo P, é definido como os nós de proteção. Sendo assim, os primeiros nós de proteção do esquema são os nós-lógicos do tipo PDIS. O nó lógico PDIS1, bem como os outros dois nós de proteção de distância (PDIS2 e PDIS3), recebe os dados dos nós TVTR1 e TCTR1 avaliando então os níveis de admitância, impedância e reatância das zonas da linha de transmissão, revelando se há ou não e em qual zona ocorre uma falta. O nó PSCH1 é responsável por combinar os diferentes nós de proteção, neste caso os três nós de proteção de distância, formando um esquema de proteção. Já o nó

PTRC1 é usado para combinar e condicionar os vários sinais de trip em único sinal de disparo indicando que há uma falta.

Por fim, apresenta-se o nó do grupo X, responsável pelas funções dos seccionadores. O XCBR1 refere-se ao modelo do disjuntor, o qual sensibilizado por uma mensagem trip deve abrir ou fechar o barramento da linha de transmissão.

Esta é a representação básica de um sistema de proteção. Sugere-se para maiores esclarecimentos das funcionalidades dos nós-lógicos a consulta à parte 7 da norma.

B. Mensagens GOOSE

A comunicação horizontal é especificada pela norma IEC 61850 como parte da configuração da automação das subestações. Esta comunicação é realizada através das mensagens definidas como *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE). As bases para este tipo de mensagem são a comunicação *multicast* e a camada 1 do modelo TCP/IP (camada de acesso à rede).

No ambiente do padrão IEC 61850 as mensagens GOOSE são extremamente necessárias, pois são elas quem carregam as mensagens com tempo crítico no sistema, como por exemplo os trips de proteção. Maiores detalhes sobre este tipo de mensagem pode ser encontrado em [11].

C. Sampled Values

Este tipo de mensagem tem a proposta de transmissão de valores amostrados de medição, conforme [12], inseridas nos tipos de mensagens *unicast* ou *multicast*. Comumente, esta mensagem é utilizada para enviar dados analógicos vindos dos medidores de corrente e tensão (TC e TP). O IED que implementa as mensagens *Sampled Values* (SV) necessita de hardware que suporte o enorme volume de conversões analógico-digitais que devem ser processadas de forma rápida e segura. Isto só é possível com uso de componentes mais resistentes, mais confiáveis e mais caros. Este é o ônus que as mensagens SV, produzem nos IEDs que as implementam.

Os valores amostrados são usados pelos sistemas de controle e proteção. Os frames das mensagens SV, utilizam estrutura similar às mensagens GOOSE, utilizando a camada 1 do modelo TCP/IP e são extremamente rápidas.

III. REDE DE PETRI COLORIDA ESTOCÁSTICA (CSPN)

A Rede de Petri (RdP), discutidas em [13], é uma ferramenta matemática gráfica para o estudo de sistemas caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos. Resumidamente, a RdP é um grafo bipartido (grafos que não contém ciclos ímpares) com interpretação gráfica formada por dois componentes: transição e lugar. A representação é como segue na figura 6, na qual os lugares são os círculos e as transições os retângulos finos. Estes dois componentes,

também chamados de nós, são interconectados por arcos dirigidos.

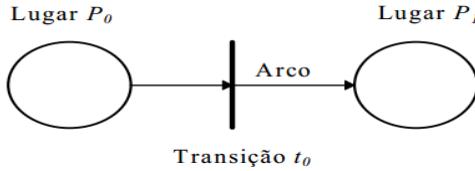


Figura 6. Elementos básicos de uma RdP

Para a modelagem e melhor interpretação de sistemas, utiliza-se marcas (*tokens*) atribuídas aos lugares, que permitem representar a situação de estado. A movimentação das marcas, através de regras bem definidas, representa a dinâmica do sistema.

No campo da análise de protocolos de rede, as Redes de Petri Estocásticas (SPN – sigla em inglês), variantes das RdP, são constantemente aplicadas na análise de desempenho nas redes de computador e sistemas de comunicação, uma vez que a SPN é isomórfica e possibilita, juntamente com as cadeias de Markov [14], a análise de probabilidade de estados do sistema. Contudo, mesmo com estas importantes características, as SPNs possuem limitantes em modelos complexos e em modelos de dimensões industriais.

As Redes de Petri Colorida Estocástica (CSPN) tem maior capacidade de abstração. Isto permite que cada lugar possua vários tipos de marcas e as transições representem vários tipos de funções, reduzindo assim o número de nós. Um ponto chave para a aplicação deste tipo de Redes de Petri a sistemas de comunicação é justamente a conexão com linguagens de programação como exemplo a linguagem *Meta Language* (ML) utilizada no *software CPN Tools* [15].

Formalmente, a definição para a CSPN é representada a seguir e pode ser verificada em [16] e [17]:

$$\text{CSPN} = \{P, T, CB, C, W, W^+, W^h, \text{Pri}, M_0, \theta\}$$

- P conjunto finito de lugares;
- T conjunto finito de transições temporizadas e imediatas, $P \cap T = \emptyset, P \cup T \neq \emptyset$;
- CB família das classes de cores básicas: $CB = \{C_1, \dots, C_n\}$ com $C_i \cap C_j = \emptyset$;
- C é uma função de $P \cup T$ que associa a qualquer nó r um domínio de cor $C(r)$ que é o produto cartesiano dos elementos de CB ;
- $W, W^+, W^h : W(p, t), W^+(p, t), W^h(p, t) \in [C(t) \rightarrow \text{Bag}(C(p))]$ são funções que rotulam respectivamente os arcos de entrada, saída e inibidores entre as transições t e lugares p ;
- Pri é a função de prioridade definida como se segue: $\forall t \in T, \text{Pri}(t) : C(t) \rightarrow \mathbb{N}$. $\text{Pri}(t)(c)$ é a prioridade da instância $[t, c]$.

- M_0 é a marcação inicial que descreve o estado inicial do sistema;
- θ é a função definida no conjunto de transições T dado que $\theta(t)$ é a função de tempo do modelo.

IV. METODOLOGIA

De posse da base teórica apresentada, inicia-se então o desenvolvimento de uma metodologia para a modelagem CSPN de aplicações comuns a norma IEC 61850. Para tanto, são definidas duas diretrizes. A primeira trata da parte dos conceitos do sistema envolvendo as designações da norma IEC 61850. Já a segunda, estrutura a forma como devem ser elaborados os modelos em CSPN.

A título de validação da metodologia, um sistema de proteção de distância tal qual apresentado anteriormente na figura 5, é o objeto de estudo.

A. Arquitetura conceitual do sistema

A estruturação dos sistemas baseados na IEC 61850 possui o que é conhecido como liberdade de configuração e é melhor discutido em [18]. Em termos gerais, a liberdade de configuração permite que o sistema tenha a alocação livre de funções (nós-lógicos) nos dispositivos físicos (IEDs). Isto é, pode-se trabalhar igualmente para um sistema centralizado conforme a figura 6, quando as funções são executadas por um único IED, ou descentralizado conforme a figura 7, quando vários IEDs trocam informações para executar as funções.

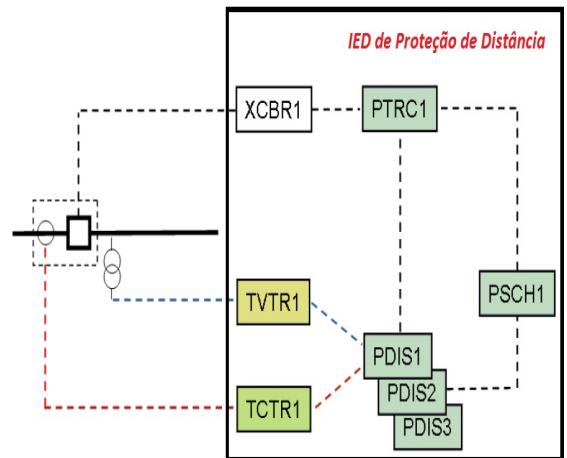


Figura 6. Proteção de distância com um único IED

Cabe ao projetista do sistema a decisão na escolha da melhor configuração que deve atender aos requisitos de tempo nas condições operacionais do sistema, inclusive nas situações de falta. O projetista deve considerar as variáveis mais relevantes na especificação de um modelo IEC 61850, tais como: funções disponíveis no IED, topologia de rede, cabeamento, condições de instalação (ao tempo ou abrigado), interoperabilidade, distribuição física dos nós lógicos, etc.

Do exposto, nota-se que sem antes simular e analisar cautelosamente as duas configurações, nada se pode afirmar sobre qual das duas arquiteturas possui melhor desempenho. Surge então a formalização das Redes de Petri Colorida Estocástica na intenção de elaborar critérios de avaliação mensuráveis.

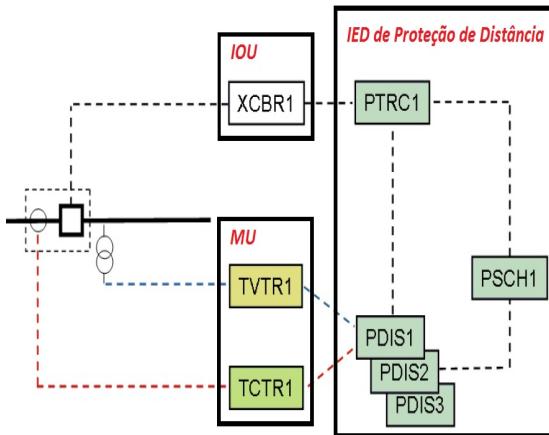


Figura 7. Proteção de distância com funções distribuídas em três IEDs

B. Modelagem CSPN

Os modelos de Rede de Petri Colorida Estocástica desenvolvidos neste trabalho visam representar, em certo nível de abstração, mecanismos e equipamentos dos sistemas elétricos de potência baseados na norma IEC 61850 e, por conseguinte, presentes no contexto das *Smart Grids*.

Na modelagem aqui apresentada, é definida uma sistemática para o desenvolvimento dos modelos a partir do macro sistema em direção ao micro sistema, ou seja, inicialmente mantém-se um nível de abstração básico, conceituando apenas a arquitetura do sistema e em seguida aprofunda-se cada vez mais o nível de detalhamento chegando até a caracterização dos nós-lógicos.

Para tanto, definem-se os seguintes passos:

- 1- Configuração macro do sistema conforme a distribuição de função dos IEDs (topologia de rede, dispositivos da rede, tipos de mensagens a ser transferidas);
- 2- Detalhamento dos dispositivos da rede (IEDs, switches, unidades de medição, etc.)
- 3- Simulações e aperfeiçoamentos de modelo;

Em [5] esta abordagem também é sugerida.

C. Descrição do modelo CSPN do Automatismo de Proteção de Distância

Seguindo o que propõe a metodologia, descreve-se inicialmente a configuração macro do sistema. O modelo IEC 61850 a ser representado em CSPN é o apresentado na figura 7.

A figura 8 mostra a topologia de comunicação e o tipo de mensagens trocadas entre os IEDs, não obstante, entre os nós-lógicos também.

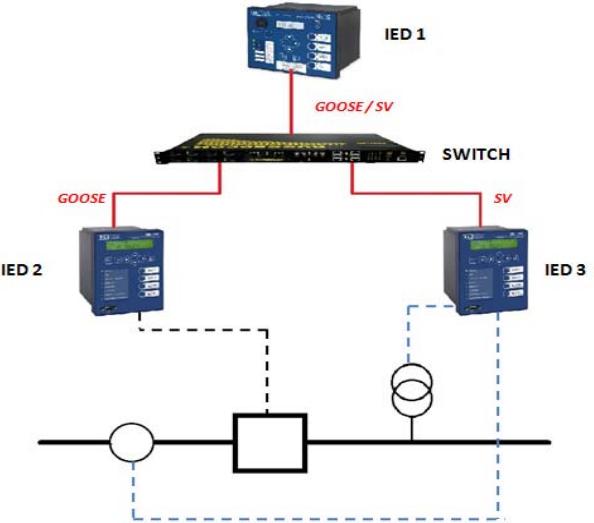


Figura 8. Disposição física do sistema de proteção de distância

A arquitetura mostrada possui três IEDs e um *switch* para chavear os dados. O primeiro IED (IED 1) é o que representa os nós-lógicos da parte de proteção, definido na figura 7 como “IED de Proteção de Distância”. Neste IED, estão inseridos os nós de cálculo de proteção (PDIS1, PDIS2 e PDIS3), o modelo de esquema de proteção (PSCH1) e o condicionador de mensagens *trip* (PRTC1).

O IED 2 compõe a fase de atuação sobre o disjuntor (XCBR1). Este utiliza os dados vindos do nó PRTC1, para abrir ou fechar a linha de transmissão. Na figura 7 este IED é definido como “IOU” (unidade de entrada e saída). O dispositivo IED 3 combina as funções de medição de corrente e tensão da linha, caracterizado pelos nós lógicos TCTR1 e TVTR1 respectivamente. Estes nós fazem parte do IED denominado “MU” (unidade de medição - *merging unit*) definido também na figura 7.

Por fim, o *switch* de comunicação é usado para interconectar os equipamentos. A figura 9 é a representação da arquitetura descentralizada no ambiente *CPN Tools* (*software* de modelagem CSPN).

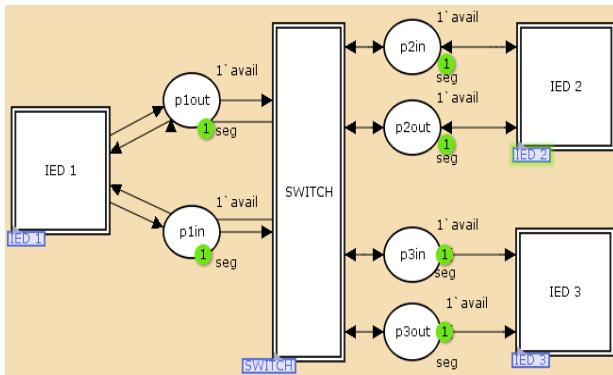


Figura 9. Arquitetura do sistema de proteção

Analizando ainda a figura 8, outra característica importante dos sistemas baseados na norma IEC 61850 é salientado. Trata-se justamente dos tipos de mensagens trocadas entre os dispositivos. Definem-se para o mecanismo de proteção de distância as mensagens do tipo GOOSE e SV (*Sampled Value*), e desta forma o modelo CSPN deve conter a dinâmica destes tipos de mensagens.

Na figura 10 apresenta-se o modelo da *switch*. Definem-se três portas de comunicação, conectando exatamente os três equipamentos da rede. As transições In_x e Out_x possuem a função $netDelay()$ representando uma distribuição exponencial que modela os atrasos de chaveamento no *switch*. A tabela de chaveamento, necessária ao *switch*, é representada no lugar $SwTa_x$.

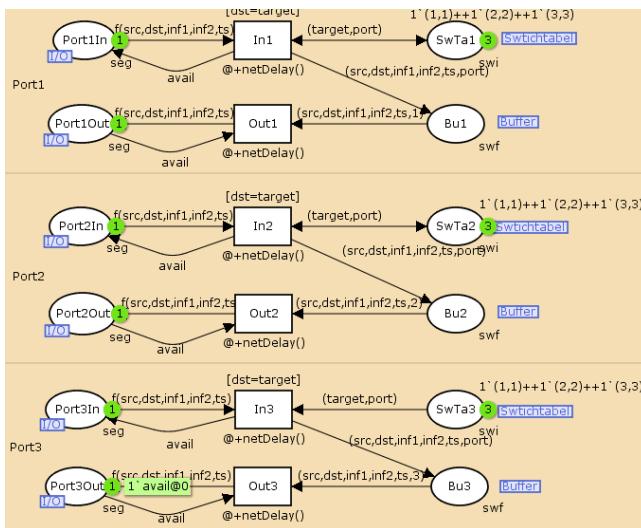


Figura 10. Modelo da *switch*

O IED 1 é mostrado na figura 11. Os nós-lógicos presentes neste equipamento são representados pelo lugar *PSCH* e pela transição *PDIS*. A transição é responsável por calcular as medidas de corrente e tensão vindas do IED 3, e por conseguinte verificar se a linha está ou não em condição de falta. Atribui-se estocástica nas transições *Receive* e *Send* usando a função *uPDelay()*, que indica o tempo gasto no processamento dos cálculos. Além disso, no arco entre a transição *Send* e lugar *LAN Out* lança-se mão de mais uma

função nomeada de $OK(s,r)$ para indicar a probabilidade de perdas de pacote.

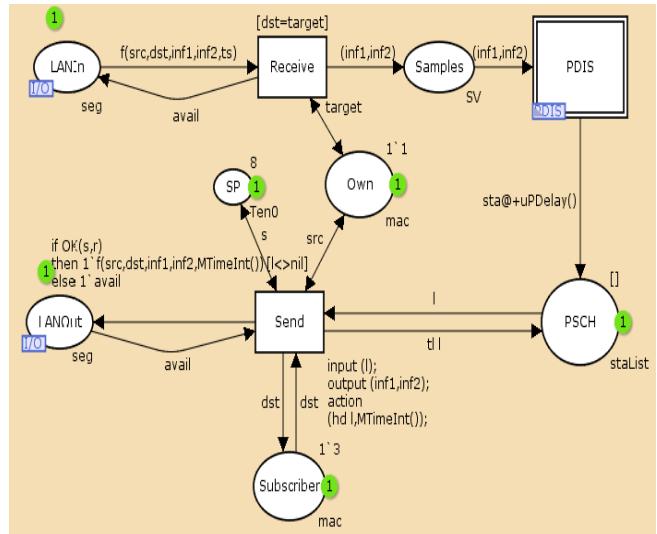


Figura 11. Modelo do IED 1

A figura 12 representa o IED 2 (atuação sobre o disjuntor). Este modelo é simples e indica, através do lugar $XCBR$ da figura 12, a atuação sobre a linha, evidenciando o estado do disjuntor (aberto ou fechado).

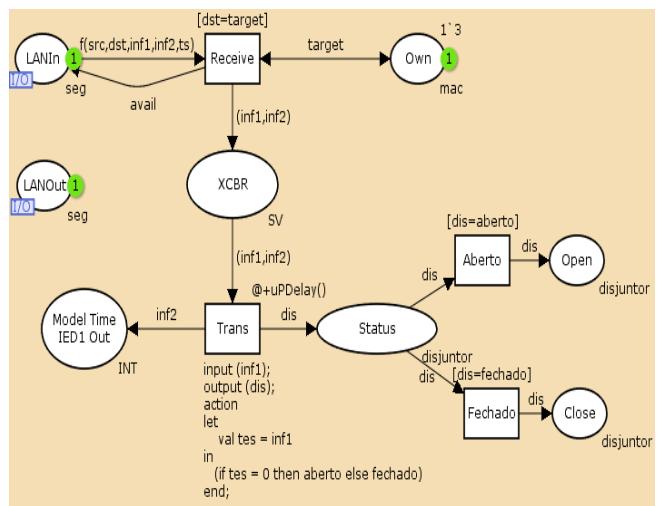


Figura 12. Modelo do IED 2

Finalmente, na figura 13, modela-se o IED 3 que é responsável pela medição das grandezas de corrente e tensão. Os lugares *TCTR* e *TVTR* mostram os valores das medições. Utiliza-se uma função aleatória *Ran()* para a geração dos sinais que simulam um transformador de corrente e um transformador de tensão.

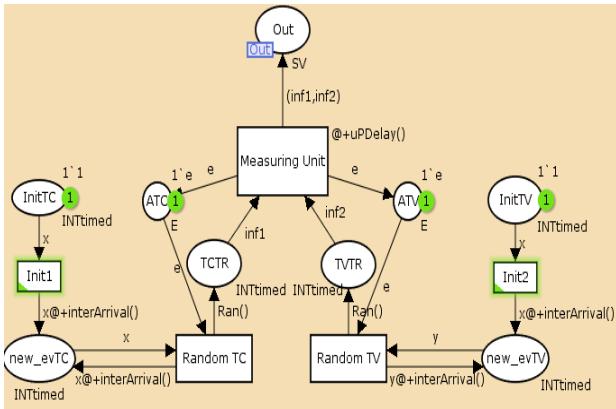


Figura 13. Modelo do IED 3

D. Simulação

Para análise de desempenho do sistema, utilizam-se as ferramentas de simulação disponíveis no *software CPN Tools*. Os tempos e estocásticas apresentados aqui são ilustrativos. Em trabalhos futuros busca-se a descrição exata da estocástica presente nos sistema de comunicação IEC 61850, como tempo de processamento do IED, atraso de mensagens, perdas de pacote, mecanismo de reenvio de mensagens entre outras condições importantes de avaliação de redes.

Evidenciado anteriormente na descrição do modelo, tem-se definidas algumas estocásticas. São elas, *uPDelay()*, *netDelay()* e *OK(s,r)*, que representam respectivamente o tempo de processamento do IED, o tempo de trânsito da mensagem e a probabilidade de perda de pacotes. É valido ressaltar que existem dois tempos de trânsito de mensagem, um entre o IED 3 e o IED 1, definido como *Atraso 1* e um entre o IED 1 e o IED 2, denominado *Atraso 2*.

Na tabela I podem ser vistos a determinação dos parâmetros estocásticos.

TABELA I. PARÂMETROS DO MODELO CSPN

Parâmetro	Função	Estocástica
Tempo de processamento	<i>uPDelay</i>	exponential (0,08)
Tempo de trânsito	<i>netDelay()</i>	exponential (0,05)
Perdas de pacotes	<i>OK(s,r)</i>	$\lambda = 10\%$

A função *exponential* é definida no *software* e permite criar distribuições exponenciais. No parâmetro *Tempo de processamento* define-se uma distribuição com média de 12,5 ms que é o inverso do parâmetro 0,08 enquanto que o *Tempo de Trânsito* possui uma distribuição exponencial com média 20 ms (inverso de 0,05). Já o parâmetro *Perdas de pacotes* utiliza a propriedade λ que indica a probabilidade do não disparo da transição *Send*. Estes parâmetros permitem criar no modelo o não determinismo do processo, garantindo assim certa legitimidade com relação ao sistema real.

A seguir é apresentado alguns resultados levantados a partir das simulações do modelo. A figura 14 e 15 indicam os

atrasos do sistema conforme a mensagem enviada entre o IED 3 e IED 1 (*Sampled Values*) e entre IED 1 e IED 2 (*GOOSE*).

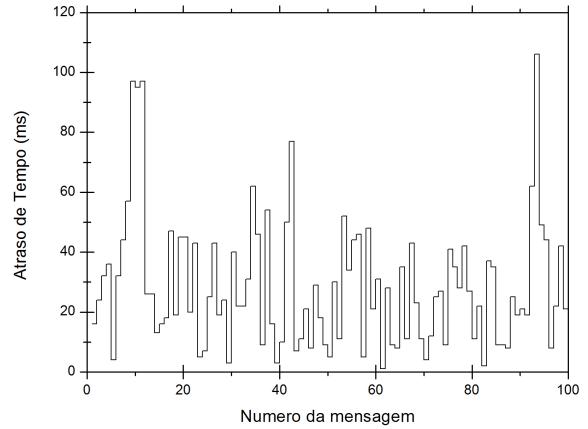


Figura 14. Atraso 1 - IED 3 para IED 1 (*Sampled Values*)

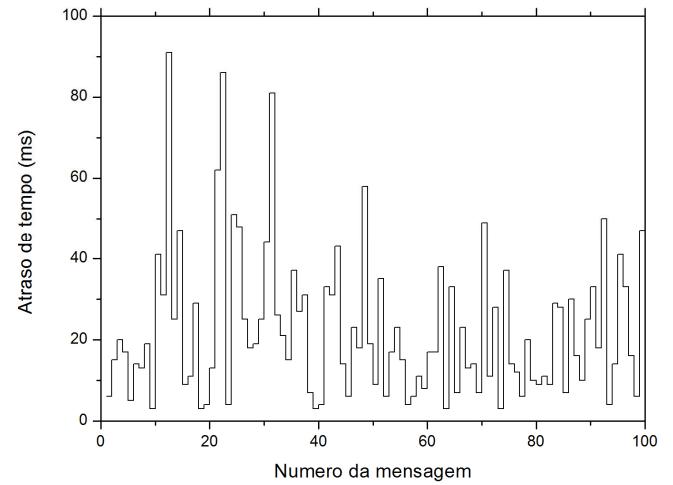


Figura 15. Atraso 2 - IED 1 para IED 2 (*GOOSE*)

Como resultados apresentam-se ainda a média do tempo de trânsito das mensagens e a perda de pacotes para o envio de mensagens no processo *Atraso 1* e *Atraso 2*.

No processo *Atraso 1* tem-se os seguintes valores:

- média de tempo de trânsito = 22,6 ms;
- pacotes enviados = 161;
- pacotes recebidos = 126;
- perdas = 22%;

Para o processo *Atraso 2*, tem-se:

- média de tempo de trânsito = 27,8 ms;
- pacotes enviados = 144;
- pacotes recebidos = 127;
- perdas = 12%;

V. DISCUSSÃO

Os resultados apresentados são interessantes e relevantes na estruturação de um sistema de redes de comunicação baseadas na IEC 61850. A metodologia apresentada trouxe condições suficientes para a análise de desempenho. O modelo é condizente com uma estrutura real deste mecanismo de proteção, permitindo avaliar a interconexão entre os nós lógicos e IEDs, observando como estes se comportam na rede.

Avaliando-se os dados, o modelo deve ser mais criterioso na comunicação entre os IED 3 e IED 1 (*Atraso 1*) no sentido de melhorar as perdas de pacotes. Em relação a comunicação entre o IED 1 e IED 2 (*Atraso 2*) o critério deve levar em conta a melhoria no tempo de transporte da mensagem. Sugere-se então um novo estudo da disposição dos equipamentos juntamente com a troca dos dispositivos por outros de menor tempo de processamento.

Este tipo de avaliação é o que se busca com a metodologia apresentada, verificando se a arquitetura condiz com o desempenho esperado. Os levantamentos aqui apresentados são valiosos na etapa de projeto, uma vez que evita problemas na implementação do sistema real.

VI. CONCLUSÃO

Conforme o que se apresentou neste artigo, conclui-se que a modelagem CSPN é perfeitamente aplicável aos sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850. A metodologia apresentada é simples, mas consegue fundamentar alguns detalhes importantes no processo de projeto das arquiteturas IEC 61850.

Os resultados levantados com as simulações são representações interessantes do sistema de proteção de distância. Não foram usados valores reais de estocástica, mas as características de não determinismo foram mantidas, o que confirma mais uma vez que a modelagem CSPN é concisa com o ambiente da norma.

Projetos futuros incluem a utilização das cadeias de Markov para melhores descrições das distribuições probabilísticas e condicionamento dos modelos em sistemas de processo decisório avaliando quais arquiteturas possuem melhor desempenho, consolidando ainda mais os conceitos de inteligência nas redes de comunicação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho está sendo desenvolvido no escopo do projeto P&D APLPED2393_PROJETO PED_0003_S01, entre a TANGARA ENERGIA e UNIFEI. Os autores agradecem ao apoio financeiro obtido, sem o qual, estes resultados preliminares não seriam obtidos. O primeiro autor também agradece ao programa CAPES Demanda Social pelo apoio financeiro recebido na modalidade de bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- [1] *Smart grid –a rede elétrica inteligente do futuro* [Online]. Disponível: <http://www.siemens.com.br/desenvolvimento-sustentado-em-megaciudades/smart-grid.html>. Acessado em 27 de julho de 2014.
- [2] *The Smart Grid* [Online]. Disponível: https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid. Acessado em 28 de julho de 2014.
- [3] IEC 61850-1, *Communication networks and systems in substations – Part 1: Introduction and overview*, Ed. 2.0., 2010.
- [4] D. M. E. Ingram, P. Schaub, R. R. Taylor, D. A. Campbell, “Performance Analysis of IEC 61850 Sampled Value Process Bus Networks”, IEEE Transaction on Industrial Informatics, Vol 9, Agosto 2013, pp 1445-1454.
- [5] A. Ghannam, G. A. Borges and G. Frey, “Estimating Delays in Network Control Systems Using Colored Petri Nets and Markov Chains Models”, IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009, pp. 1-6.
- [6] R. Feng, X. Cheng-Jun, M. Peng, X. Yang, “Performance Analysis for Substation Automation Systems: A PICOM Approach and Improvement”, IEEE/PES Trasmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, 2005, pp. 1-6.
- [7] IEC 61850-5, *Communication networks and systems in substations – Part 5: Communication requirements for functions and device model*, Ed. 2.0., 2010.
- [8] IEC 61850-7-2, *Communication networks and systems in substations – Part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Abstract communication service interface (ACSI)*, Ed. 2.0., 2010.
- [9] IEC 61850-6-1, *Communication networks and systems in substations – Part 6: configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs*, Ed. 2.0, 2010.
- [10] M. E. C. Paulino, A. Cascaes Pereira, D. Cáceres, R.T.S. Alexandre, L. Biondi Neto, E. Silva, “Procedimentos de teste de conformidade e interoperabilidade à luz da norma IEC 61850 aplicados a subestações”, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 14-17 de Julho, 2007.
- [11] C. Kriger, S. Behardien and J. Retonda-Modiya, “A Detailed Analysis of the GOOSE Message Structure in IEC 61850 Standard-Based Substation Automation System”, INT J COMPUT COMMUN, ISS 1841-9836, Outubro 2013.
- [12] IEC 61850-9-2, *Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Sampled values over ISO/IEC 8802-3*, Ed. 2.0, 2010.
- [13] T. Murata, “Petri Nets: Properties, Analisys and Application”, Proceedings of the IEEE [0018-9219] Murata, Tadao yr:1989 vol:77 iss:4 pg:541 -580.
- [14] J. R. Norris, “Markov Chains”, Cambridge University Press, Julho 1998.
- [15] CPN Tools: Disponível em: <http://cpn-tools.org/>. Acessado em 30 de Julho de 2014.
- [16] N. Ghabi, C. Dutheillet and M. Ioualalen, “Colored stochastic Petri nets for modelling and analysis of multicass retrial systems”, Mathematical and Computer Modelling 49 (2009), pp. 1436-1448.
- [17] G. Chiola, D. Dutheillet, G. Franceschinis and S. Haddad, “Stochastic Well-Formed Colored nets and symmetric modeling applications”, IEEE Transactions on Computers 42 (1993), pp. 1343-1360.
- [18] M. E. C. Paulino, “Liberdade de configuração com funções distribuídas através da decomposição funcional estabelecida pela norma IEC 61850”, em: XIII Encunetro Regional Iberoamericano de Cigré, 2009, Puerto Iguazú, Argentina.