

---

# **ETArch-SG: Uma Proposta de Arquitetura Baseada em SDN para Suporte de Comunicação em Smart Grids**

---

**Alex Dias**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Uberlândia  
2018



Alex Dias

**ETArch-SG: Uma Proposta de Arquitetura  
Baseada em SDN para Suporte de Comunicação  
em Smart Grids**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência da Computação.

Área de concentração: Ciência da Computação

Orientador: Pedro Frosi Rosa, PhD

Coorientador: Flávio de Oliveira Silva, PhD

Uberlândia

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

D541e 2018      Dias, Alex, 1969-  
ETArch-SG [recurso eletrônico] : uma proposta de arquitetura baseada em SDN para suporte de comunicação em Smart Grids / Alex Dias. - 2018.

Orientador: Pedro Frosi Rosa.

Coorientador: Flávio de Oliveira Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.315>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Computação. 2. Redes inteligentes de energia. 3. Internet. 4. Sistemas de energia elétrica. I. Rosa, Pedro Frosi, 1959- (Orient.). II. Silva, Flávio de Oliveira, 1970- (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. IV. Título.

---

CDU: 681.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Os abaixo assinados, por meio deste, certificam que leram e recomendam para a Faculdade de Computação a aceitação da dissertação intitulada "**ETArch-SG: Uma Proposta de Arquitetura Baseada em SDN para Suporte de Comunicação em Smart Grids**" por **Alex Dias** como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Doutor em Ciência da Computação**.

Uberlândia, \_\_\_\_de\_\_\_\_de\_\_\_\_

Orientador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Pedro Frosi Rosa  
Universidade Federal de Uberlândia

Coorientador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Flávio de Oliveira Silva  
Universidade Federal de Uberlândia

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Augusto José Venâncio Neto  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Takeo Kofuji  
Universidade de São Paulo

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Henrique de Souza Pereira  
Universidade Federal de Uberlândia

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes  
Universidade Federal de Uberlândia



*Este trabalho é dedicado à minha família e aos amigos que fiz durante todos estes anos.*





---

# Agradecimentos

Inicio agradecendo a Deus por tudo que sou e pelo que construí na incrível jornada da vida.

Agradeço aos meus pais José e Norinda, e também a minha irmã Jacqueline pelo apoio incondicional desde o início.

À minha esposa Kátia, muito obrigado pelo companheirismo e dedicação. José, Júlia e João, "*donum Dei*", filhos de quem me orgulho e que acompanharam minha trajetória de trabalho compreendendo os momentos em que estive ausente.

Agradeço ao meu orientador e amigo Prof. Pedro Frosi que soube direcionar meu trabalho com maestria - os vários "cafés" foram fundamentais para enriquecer as discussões.

Agradeço ao meu co-orientador e amigo Prof. Flávio Oliveira, pelo exemplo de dedicação e por toda ajuda neste trabalho. Ao Prof. Rui Aguiar, meus sinceros agradecimentos pelos aconselhamentos precisos e pelo apoio amigo em sua terra natal.

Agradeço aos amigos que contribuíram de alguma forma para que este objetivo fosse alcançado, não vou citar todos os nomes aqui para não correr o risco de ser injusto esquecendo de fazer menção a alguém, todos foram importantes.

Em nome do Prof. Roberto Gil, reitor do IFTM, agradeço a toda aquela comunidade pela boa convivência e pela oportunidade que tive para que pudesse me dedicar, de forma integral, nas atividades deste doutorado. Por fim, agradeço ao Instituto Tecnológico de Aveiro pela receptividade e à CAPES pelo fomento que possibilitou meus estudos no programa de doutorado sanduíche em Portugal.



*“That bright blue ball rising over the moon’s surface, containing everything we hold dear – the laughter of children, a quiet sunrise, all the hopes and dreams of posterity – that’s what’s at stake. That’s what we’re fighting for. And if we remember that, I’m absolutely sure we’ll succeed.”*

*Barack Obama*



---

# Resumo

As comunicações do Sistema Elétrico de Potência (SEP) revelam um enorme desafio na busca incessante por mecanismos que possam atender a uma série de requisitos inerentes ao bom funcionamento deste sistema, tais como: grande abrangência, confiabilidade, compartilhamento de informações, segurança, disponibilidade, entre outros. Atualmente, quase todas as ações relacionadas a esta comunicação estão vinculadas a processos não automatizados, executados obrigatoriamente por operadores (humanos) de sistemas, basicamente pela falta de confiabilidade da infraestrutura de comunicação.

A criação do conjunto de padrões IEC 61850 trouxe novas facilidades para automação da comunicação no SEP, incluindo a possibilidade de acessar uma quantidade maior de informações, com total independência de fabricantes de dispositivos, sendo este um grande passo para a evolução da *Smart Grid* (SG). Apesar disso, os sistemas de gerenciamento, controle e proteção da rede elétrica permanecem carentes de alternativas que viabilizem o acesso e utilização efetiva destas informações, para superar os desafios previstos para o futuro das *Smart Grids*. Neste cenário, arquiteturas de Internet do Futuro são alternativas que apresentam potencial para o desenvolvimento de novas funcionalidades capazes de atender aos requisitos deste tipo de comunicação. Em particular, este trabalho apresenta uma arquitetura baseada em *Software Defined Network* (SDN), chamada *Entity Title Architecture for Smart Grid Communications* (ETArch-SG), cujo principal objetivo é oferecer um suporte mais eficiente para o sistema de comunicação em *Smart Grids*, quando comparado a tecnologias atuais. O trabalho propõe atender às comunicações realizadas no ambiente interno de subestações e também auxiliar na comunicação entre as centrais de controle e os dispositivos inteligentes, que medem o comportamento das linhas de transmissão.

De posse de um arcabouço de informações sobre o funcionamento geral de um sistema elétrico de potência e sobre os protocolos que governam a comunicação de dados neste ambiente, foi possível propor soluções peculiares para o transporte de informações do sistema supervisor e para a troca de mensagens entre os dispositivos inteligentes, onde

as operações de controle e proteção possuem requisitos temporais bastante severos. Além de melhorias para atender, de forma mais eficaz, os requisitos temporais dos diversos tipos de mensagens que circulam pelo *grid*, este trabalho também apresenta contribuições na automatização do processo de configuração de *Intelligent Electronic Device* (IED)s e na otimização de recursos através da virtualização de dispositivos concentradores, que são imprescindíveis na comunicação entre sincrofasores. Os resultados aqui apresentados demonstram que a Arquitetura ETArch-SG é uma proposta promissora para *Smart Grids*.

**Palavras-chave:** Smart Grid, SEP, ETArch-SG, Internet do Futuro, IED, SDN, IEC 61850.

---

# Abstract

Communication in the *Electrical Power System* (EPS) presents challenges to meet a number of important requirements, such as: wide scope, reliability, information sharing, security, availability, mobility, among others. Currently, almost all actions related to these communications are linked to non-automated processes, which must be performed by system operators (human).

The publication of IEC 61850 standards has made it easier to automate EPS communication, including the ability to access a greater amount of information, with complete independence from device manufacturers, and is a significant step in the evolution of Smart Grids. However, the grid management, control and protection systems still lack alternatives that allow the access and effective use of these information, to overcome the challenges foreseen for the future of Smart Grids. In this scenario, Future Internet architectures have great potential for the development of new functionalities capable of meeting the requirements of this type of communication. In particular, this work presents an architecture based on SDN, called ETArch-SG, whose main objective is to offer more efficient support to the communication system in Smart Grids, when compared to conventional technologies. This work intends to attend the communications performed in the internal environment of the substations and also to help in the communication between the control centers and the intelligent devices, that measure the behavior of the transmission lines.

The analysis of information about the global operation of an energy system and about the protocols governing the communication of data in this environment, allowed to propose peculiar solutions for the transportation of information of the supervisory system and for exchange of messages between intelligent devices, where the control and protection operations have fairly severe time requirements. In addition to improvements to more efficiently meet the time constraint requirements of various types of messages that travel through the grid, this work also presents contributions in automating the process of setting up Intelligent Electronic Devices (IEDs) and in optimizing resources through

virtualization of the concentrator devices, which are essential between the communication of synchrophasors. The results presented here open up a whole range of possibilities for the work to continue in full evolution.

**Keywords:** Smart Grid, EPS, ETArch-SG, Future Internet, IED, SDN, IEC 61850.



---

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama simplificado de um sistema elétrico de potência. . . . .	40
Figura 2 – Integração dos sistemas de supervisão e controle. . . . .	43
Figura 3 – Integração entre infraestruturas: energia elétrica e comunicação. . . . .	44
Figura 4 – Interação de atores em diferentes domínios <i>Smart Grid</i> . . . . .	46
Figura 5 – Modelo hierárquico do DNP3. . . . .	49
Figura 6 – Áreas de abrangência de comunicação em Smart Grids. . . . .	52
Figura 7 – Modelo de dados do padrão IEC 61850. . . . .	56
Figura 8 – Grupos de nós lógicos definidos no padrão IEC 61850. . . . .	57
Figura 9 – Informações acessíveis de objetos para um disjuntor. . . . .	57
Figura 10 – Informações de atributos adicionais de um objeto. . . . .	58
Figura 11 – Exemplo de valor de referência para a informação de status de um disjuntor. . . . .	58
Figura 12 – Níveis e Interfaces lógicas em um SAS . . . . .	59
Figura 13 – Recomendações definidas pelo padrão IEC 61850. . . . .	60
Figura 14 – Encapsulamento de dados e dispositivos reais em objetos VMD. . . . .	62
Figura 15 – Estrutura do quadro Ethernet para mensagens GOOSE. . . . .	63
Figura 16 – Modelo de referência para o fluxo de informação SCL. . . . .	65
Figura 17 – Modelo de comunicação envolvendo Sincrofasores. . . . .	67
Figura 18 – Camadas definidas pela ETArch. . . . .	69
Figura 19 – Principais componentes do ETArch dentro de um <i>workspace</i> . . . . .	70
Figura 20 – Arquitetura do SMARTFlow. . . . .	71
Figura 21 – Definição do escopo do trabalho. . . . .	78
Figura 22 – Modelo funcional do SUPERVISOR. . . . .	79
Figura 23 – Interfaces de comunicação entre as arquiteturas ETArch-SG e ETArch. . . . .	80
Figura 24 – Diagrama temporal para comunicação entre entidades da ETArch-SG. . . . .	81
Figura 25 – Relação de comunicação entre o DTS e as entidades SUPERVISOR e IED. . . . .	81
Figura 26 – <i>Workspace</i> de energia e controle. . . . .	82

Figura 27 – Diagrama de sequência do <i>workspace</i> de energia e controle. . . . .	83
Figura 28 – <i>Workspace</i> de comunicação horizontal. . . . .	85
Figura 29 – Diagrama de sequência do <i>workspace</i> de comunicação horizontal. . . . .	85
Figura 30 – <i>Workspace</i> de comunicação vertical. . . . .	87
Figura 31 – Diagrama de sequência do <i>workspace</i> de comunicação vertical. . . . .	87
Figura 32 – <i>Workspace</i> de aferição de dados. . . . .	88
Figura 33 – Diagrama de sequência do <i>workspace</i> de aferição de dados. . . . .	89
Figura 34 – <i>Workspace</i> de dados fasoriais espontâneos. . . . .	90
Figura 35 – Diagrama de sequência do <i>workspace</i> de dados fasoriais espontâneos. . . . .	91
Figura 36 – <i>Workspace</i> de dados fasoriais sob demanda. . . . .	93
Figura 37 – Diagrama de sequência do <i>workspace</i> de dados fasoriais sob demanda. . . . .	94
Figura 38 – ETArch-SG: Extensão da arquitetura ETArch para <i>Smart Grids</i> . . . . .	96
Figura 39 – Ambiente para execução de experimentos do ETArch-SG em <i>Smart Grids</i> . . . . .	97
Figura 40 – Pacotes transmitidos no <i>workspace</i> de energia e controle. . . . .	99
Figura 41 – Pacotes transmitidos na rede TCP/IP. . . . .	99
Figura 42 – Comparação de latência na configuração de IEDs usando ETArch e TCP/IP. . . . .	100
Figura 43 – Mensagens GOOSE entre IEDs no <i>Workspace</i> de Comunicação Horizontal. . . . .	101
Figura 44 – Tempo de espera pelo acesso ao <i>workspace</i> considerando o aumento gradativo de IEDs. . . . .	102
Figura 45 – Tempo de espera pelo acesso ao <i>workspace</i> considerando 29 IEDs. . . . .	103
Figura 46 – Mensagens SV entre atuadores e P&C IEDs no <i>Workspace</i> de Comunicação Vertical. . . . .	104
Figura 47 – Mensagens MMS no <i>Workspace</i> de Comunicação Vertical. . . . .	106
Figura 48 – Mensagens GOOSE no <i>workspace</i> de dados fasoriais espontâneos. . . . .	107
Figura 49 – Pacotes transmitidos no <i>workspace</i> de dados fasoriais espontâneos. . . . .	107
Figura 50 – Pacotes transmitidos via IP <i>multicast</i> . . . . .	108
Figura 51 – Tempos de resposta do ETArch-SG e IP <i>Multicast</i> para envio de <i>stream</i> de dados. . . . .	109
Figura 52 – Mensagens no <i>Workspace</i> de Dados Fasoriais Sob-demanda. . . . .	110
Figura 53 – Pacotes transmitidos no <i>Workspace</i> de Dados Fasoriais Sob-demanda. . . . .	110
Figura 54 – Formato geral das primitivas da Etarch-SG. . . . .	129

---

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Domínios e Atores no modelo conceitual de <i>Smart Grid</i> . . . . .	46
Tabela 2 – Principais Desafios de Sistemas de Comunicação em Smart Grids . . .	54
Tabela 3 – IEC 61850: Tipos de mensagens e Requisitos temporais . . . . .	61
Tabela 4 – Serviços estendidos do protocolo ETCP para a ETArch-SG . . . . .	94
Tabela 5 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.req . . . . .	130
Tabela 6 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.ind . . . . .	131
Tabela 7 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.resp . . . . .	131
Tabela 8 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.conf . . . . .	131
Tabela 9 – Atributos da primitiva GOOSE-INFORMATION.req . . . . .	132
Tabela 10 – Atributos da primitiva GOOSE-INFORMATION.ind . . . . .	132
Tabela 11 – Atributos da primitiva SV-INFORMATION.req . . . . .	133
Tabela 12 – Atributos da primitiva SV-INFORMATION.ind . . . . .	133
Tabela 13 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.req . . . . .	134
Tabela 14 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.ind . . . . .	134
Tabela 15 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.resp . . . . .	135
Tabela 16 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.conf . . . . .	135
Tabela 17 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.req . . . . .	135
Tabela 18 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.ind . . . . .	136
Tabela 19 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.resp . . . . .	136
Tabela 20 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.conf . . . . .	136
Tabela 21 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.req . . . . .	137
Tabela 22 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.ind . . . . .	137
Tabela 23 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.resp . . . . .	138
Tabela 24 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.conf . . . . .	138



---

# Lista de siglas

**5G-PPP** *5G Public Private Partnership*

**A2RCON** *Arquitetura Adaptável para Redes CONvergentes*

**ACEEE** *American Council for an Energy-Efficient Economy*

**ACSI** *Abstract Communication Service Interface*

**ANEEL** *Agência Nacional de Energia Elétrica*

**ANSI** *American National Standards Institute*

**API** *Application Programming Interface*

**APPID** *Aplication Identifier*

**ASN.1** *Abstract Syntax Notation 1*

**AT** *Alta Tensão*

**BAN** *Building Area Network*

**BPL** *Broadband over Power Line*

**BT** *Baixa Tensão*

**.cid** *Configured IED Description*

**CDC** *Common Data Classes*

**CEMIG** *Companhia Energética de Minas Gerais*

**CFI** *Canonical Format Indicator*

**CIM** *Common Information Model*

**CMC** Conjunto de Manobra e Controle

**COD** Centro de Operações da Distribuição

**COG** Centro de Operações da Geração

**ComSoc** *Communication Society*

**COS** Centro de Operações do Sistema

**COSEM** *Companion Specification for Energy Metering*

**COT** Centro de Operações da Transmissão

**CSMA** *Carrier Sense Multiple Access*

**DA** *Data Attributes*

**DER** *Distributed Energy Resource*

**DLMS** *Device Language Message Specification*

**DNP3** *Distributed Network Protocol - version 3*

**DO** *Data Objects*

**DOS** *Deny Of Service*

**DTS** *Domain Title Service*

**DTSA** *Domain Title Service Agents*

**EV** *Electronic Vehicle*

**EPA** *Enhance Performance Architecture*

**EPS** *Electrical Power System*

**ETArch** *Entity Title Architecture*

**ETArch-SG** *Entity Title Architecture for Smart Grid Communications*

**ETCP** *Entity Title Control Protocol*

**ETSI** *European Telecommunications Standards Institute*

**FAN** *Field Area Network*

**GMRP** *GARP Multicast Registration Protocol*

**GOOSE** *Generic Object Oriented Substation Events*

**GPS** *Global Positioning System*

**GSSE** *Generic Substation State Events*

**HAN** *Home Area Network*

**HMI** *Human Machine Interface*

**.icd** *IED Capability Description*

**.iid** *Instantiated IED Description*

**IAN** *Industrial Area Network*

**TICs** *Tecnologias de Informação e Comunicação*

**ICCP** *Intercontrol Center Communications Protocol*

**IEC** *International Electrotechnical Commission*

**IED** *Intelligent Electronic Device*

**IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

**IETF** *Internet Engineering Task Force*

**IoT** *Internet of Things*

**IP** *Internet Protocol*

**ISO** *International Standard Organization*

**ITU-T** *International Telecommunication Union*

**JAIN SLEE** *Java APIs for Integrated Networks - Service Logic Execution Environment*

**LAN** *Local Area Network*

**LD** *Logical Device*

**LN** *Logical Node*

**LoRa** *Long Range*

**LPWA** *LowPower Wide Area*

**LTE** *Long Term Evolution*

**MCAA** *Multicast Application Association*

**MMS** *Manufacturing Message Specification*

**MPLS** *Multiprotocol Label Switching*

**MT** *Média Tensão*

**NAN** *Neighborhood Area Network*

**NIST** *National Institute of Standards and Technology*

**OFDM** *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

**ONS** *Operador Nacional do Sistema Elétrico*

**OPEX** *Operational Expenditure*

**OSPF** *Open Shortest Path First*

**PDC** *Phasor Data Concentrator*

**PDU** *Protocol Data Unit*

**PES** *Power and Energy Society*

**PLC** *Power Line Carrier*

**PMU** *Phasor Measurement Unit*

**QoS** *Quality of Service*

**QoE** *Quality of Experience*

**RFC** *Request for Comments*

**RTU** *Remote Terminal Unit*

**.scd** *Substation Configuration Description*

**.sed** *System Exchange Description*

**.ssd** *System Specification Description*

**SAC** *Session-Aware Control*

**SAS** *Sistemas de Automação de Subestações*

**SCADA** *Supervisory Control and Data Acquisition*

**SCL** *Substation Configuration Language*

**SDECN** *Software-Defined Energy Communication Networks*

**SDN** *Software Defined Network*



**SEP** Sistema Elétrico de Potência

**SG** *Smart Grid*

**SIN** Sistema Interligado Nacional

**SM** *Smart Meter*

**SMARTFlow** SisteMa Autoconfigurável para Redes de Telecomunicações

**SOCSys** *Session-Oriented Communication System*

**SPC** *Single Point Control*

**SPDC** *Super Phasor Data Concentrator*

**SV** *Sampled Values*

**TASE.2** *Telecontrol Application Service Element 2*

**TC** Transformador de Corrente

**TCI** *Tag Control Information*

**TimeSync** *Time Synchronization Profile*

**TLS** *Transport Layer Security*

**TP** Transformador de Potencial

**TPAA** *Two-Party Application Association*

**TPID** *Tag Protocol Identifier*

**UDP** *User Datagram Protocol*

**UMTS** *Universal Mobile Telecommunication System*

**WAMPAC** *Wide Area Monitoring, Protection and Control*

**WAN** *Wide Area Network*

**WiMAX** *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

**VID** *VLAN Identifier*

**VMD** *Virtual Manufacturing Device*

**VPLS** *Virtual Private LAN Service*

**XML** *Extensible Markup Language*



---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>1.2</b>	<b>Hipótese . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos da Pesquisa . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>1.4</b>	<b>Contribuições . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistema Elétrico de Potência . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>2.2</b>	<b><i>Smart Grids</i> . . . . .</b>	<b>44</b>
2.2.1	Organizações e Padrões no Âmbito de Smart Grids . . . . .	45
2.2.2	Desafios dos Sistemas de Comunicação em Smart Grids . . . . .	51
2.2.3	Padrão IEC 61850 . . . . .	53
2.2.4	Modelo de dispositivos no padrão IEC 61850 . . . . .	55
2.2.5	Comunicação IEC 61850 no escopo de subestações . . . . .	58
2.2.6	IEC 61850: Comunicações externas a subestações . . . . .	66
<b>2.3</b>	<b>Trabalhos Relacionados . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>3</b>	<b>PROPOSTA . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>3.1</b>	<b>Workspace de Energia e Controle . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>3.2</b>	<b>Workspace de Comunicação Horizontal . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>3.3</b>	<b>Workspace de Comunicação Vertical . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>3.4</b>	<b>Workspace de Aferição de Dados . . . . .</b>	<b>88</b>

3.5	Workspace de Dados Fasoriais Espontâneos . . . . .	89
3.6	Workspace de Dados Fasoriais Sob-demanda . . . . .	92
3.7	Entity Title Control Protocol . . . . .	93
4	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .	95
4.1	Planejamento dos Experimentos . . . . .	95
4.1.1	Cenários para realização de experimentos . . . . .	97
4.2	Avaliação dos Resultados . . . . .	111
5	CONCLUSÃO . . . . .	113
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	115
5.2	Contribuições em Produção Bibliográfica . . . . .	116
	REFERÊNCIAS . . . . .	117

## APÊNDICES 125

APÊNDICE A	– PROJETO A2RCON . . . . .	127
A.1	A2RCON . . . . .	127
APÊNDICE B	– PRIMITIVAS DE SERVIÇO . . . . .	129
B.1	SG-REGISTER . . . . .	130
B.1.1	SG-REGISTER.req . . . . .	130
B.1.2	SG-REGISTER.ind . . . . .	130
B.1.3	SG-REGISTER.resp . . . . .	131
B.1.4	SG-REGISTER.conf . . . . .	131
B.2	GOOSE-INFORMATION . . . . .	132
B.2.1	GOOSE-INFORMATION.req . . . . .	132
B.2.2	GOOSE-INFORMATION.ind . . . . .	132
B.3	SV-INFORMATION . . . . .	133
B.3.1	SV-INFORMATION.req . . . . .	133
B.3.2	SV-INFORMATION.ind . . . . .	133

<b>B.4</b>	<b>MMS-SERVICE . . . . .</b>	<b>134</b>
B.4.1	MMS-SERVICE.req . . . . .	134
B.4.2	MMS-SERVICE.ind . . . . .	134
B.4.3	MMS-SERVICE.resp . . . . .	134
B.4.4	MMS-SERVICE.conf . . . . .	135
<b>B.5</b>	<b>PMU-CONTROL . . . . .</b>	<b>135</b>
B.5.1	PMU-CONTROL.req . . . . .	135
B.5.2	PMU-CONTROL.ind . . . . .	136
B.5.3	PMU-CONTROL.resp . . . . .	136
B.5.4	PMU-CONTROL.conf . . . . .	136
<b>B.6</b>	<b>PMU-SERVICE . . . . .</b>	<b>136</b>
B.6.1	PMU-SERVICE.req . . . . .	137
B.6.2	PMU-SERVICE.ind . . . . .	137
B.6.3	PMU-SERVICE.resp . . . . .	137
B.6.4	PMU-SERVICE.conf . . . . .	138



---

## Introdução

A modernização da rede de energia elétrica é fundamental para aumentar a confiabilidade e a eficácia do setor elétrico em toda sua abrangência, sendo um dos principais requisitos indissociáveis para a construção de uma economia sustentável que garanta prosperidade para as gerações futuras. Globalmente, bilhões de dólares são gastos para construir elementos que sejam “inteligentes” para atender a necessidades de controle e gerenciamento de redes de energia elétrica (FRAMEWORK, 2012). O termo *Smart Grid* é usado para definir um conjunto de funcionalidades voltadas para uma rede de energia tecnologicamente avançada, incluindo sistemas de computação e comunicação digital, capazes de coordenar todo o processo, desde a geração de energia até seu consumo pelo usuário final (FANG et al., 2012). Em termos de sustentabilidade, *Smart Grid* dá significado ao conceito de “energia limpa”, englobando a geração, a distribuição e o consumo de energia de forma a minimizar a produção de resíduos ou gases poluentes geradores do efeito estufa e do aquecimento global.

Para converter um sistema de distribuição de energia em uma rede inteligente, três elementos são fundamentais: (i) Monitoramento/Detecção; (ii) Comunicação; e (iii) Controle (YAN et al., 2013). O Monitoramento/Detecção tem a função de monitorar o comportamento da rede e alertar o controle sobre a ocorrência de situações de anormalidade. O controle é feito através de mensagens encaminhadas a diversos dispositivos da rede, resultando em ações apropriadas para cada situação. A comunicação é composta pela infraestrutura de interconexão, que deve garantir o transporte dessas mensagens atendendo alguns requisitos, tais como: *Quality of Service* (QoS) em termos de latência e largura de banda; interoperabilidade entre os diversos sistemas interligados; escalabilidade para acomodar o aumento na quantidade de dispositivos e serviços; segurança de setores críticos vulneráveis a incidentes e *cyber* ataques; resiliência para gerenciamento de inconsistências da rede; além de outros que caracterizam a complexidade de uma rede inteligente, em especial a necessidade de padronização para os sistemas de comunicação (FRAMEWORK, 2012).

A modernização de *Smart Grids* é uma consequência natural para atender expectativas de crescimento da demanda de consumo, por outro lado, isso implica numa série de requisitos que desafiam as tecnologias atualmente usadas na comunicação de dados, em particular destacam-se:

- **Crescimento no volume de dados:** equipamentos dotados de inteligência são capazes de coletar dados em diferentes áreas do *grid* e essa quantidade de dados exige melhorias nas capacidades de comunicação e gerenciamento de tráfego da rede, de forma a garantir QoS;
- **Diminuição da latência:** o tempo de resposta, principalmente nos setores de monitoramento crítico, devem ser adequados para diminuir os impactos de incidentes na rede elétrica, bem como garantir maior eficiência no uso de dados coletados da rede;
- **Gerenciamento de informações:** considerando diferentes tipos de informações que circulam pela rede, faz-se necessário aprimorar os mecanismos de transporte de informações de acordo com a natureza do tráfego *unicast* ou *multicast*;
- **Criação de mecanismos de segurança:** a segurança de dados nos sistemas de comunicação de *Smart Grids* deverá acompanhar o crescimento tanto na quantidade, quanto nos diferentes tipos de informações que possam surgir como consequência da modernização do sistema elétrico.

Várias tecnologias são utilizadas para fazer frente aos desafios impostos pela comunicação de dados em *Smart Grids*. Muitas delas fazem parte de um legado, com funções bastante restritas, às vezes proprietárias, fechadas e inflexíveis (QURESHI et al., 2008); outras com maior flexibilidade como, por exemplo, os protocolos da arquitetura Internet (TCP/IP) que têm sua ligação com a *Smart Grid* definida pela *Request for Comments* (RFC) 6272 (BAKER; MEYER, 2011). Essas tecnologias são responsáveis por realizar diferentes tarefas no *grid*, além de monitorar e manter a geração, transmissão e distribuição de energia, bem como são responsáveis por várias operações de gerenciamento da rede.

Levando em conta a diversidade de dispositivos que trocam informações na rede, a interoperabilidade é um requisito importante, não sendo, contudo, atendido de maneira trivial. Seguindo esta linha de unificação de padrões, um conjunto de especificações da *International Electrotechnical Commission* (IEC), referenciado pelo padrão IEC 61850 (IEC, 2016b), tem sido adotado para a definição de dispositivos físicos e lógicos que fazem parte da rede. Tendo em vista que o padrão IEC 61850 tem acompanhado a evolução dos sistemas de comunicação em *Smart Grids* e que ele também representa a evolução do sistema legado, as recomendações deste padrão serão usadas neste trabalho para validar as



propostas apresentadas. O escopo definido para este trabalho foi dividido em duas áreas: (1) Comunicação na rede local (*Local Area Network* (LAN)), entre dispositivos internos a subestação; e (2) na comunicação de longa distância (*Wide Area Network* (WAN)), envolvendo as centrais de controle e dispositivos inteligentes específicos, chamados de sincrofasores, localizados de forma distribuída pelo *grid*.

Considerando a rede de comunicação como uma parte fundamental da *Smart Grid*, a função primordial dessa rede é prover a troca de informações entre elementos ativos do *grid*, independentemente de sua localização geográfica. Isto inclui o transporte de mensagens do sistema supervisorio de controle e aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA)) e todas as mensagens que passam pelos centros de controle. Atualmente, a comunicação é suportada, principalmente, por enlaces baseados em Ethernet, dentro dos domínios da subestação, ou TCP/IP, para comunicações na rede WAN, além de várias outras tecnologias de comunicação, como *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), *Long Term Evolution* (LTE), *Power Line Carrier* (PLC), WiFi e ZigBee, que também são utilizadas considerando a total abrangência da rede (CLEVELAND, 2008).

Há estudos recentes que consideram a utilização de tecnologias de rede *LowPower Wide Area* (LPWA) como *Long Range* (LoRa) e SigFox (VEJLGAARD et al., 2017) para lidar com aplicações com baixo consumo de banda e alta escalabilidade, como é o caso de medidores inteligentes e alguns sensores localizados em regiões remotas (VEJLGAARD et al., 2017).

A despeito da proposta de utilização do padrão IEC 61850, cabe salientar que este continua sendo um dos grandes desafios das concessionárias de energia. Embora haja uma expectativa de que os sistemas de comunicação da rede elétrica atuais não consigam suportar o crescimento esperado no volume de informações no futuro, por outro lado, não é uma decisão simples abandonar um legado de sistemas funcionais, como é o caso do protocolo *Distributed Network Protocol - version 3* (DNP3), que tem sido usado no Brasil durante todos estes anos. Além disso, em qualquer parte do mundo, o modelo de gestão de informações de um sistema elétrico de potência passa, obrigatoriamente, por uma análise sinóptica feita por operadores que têm capacidade limitada para avaliar todas as informações que estariam disponíveis através do padrão IEC 61850.

Em contrapartida, novas soluções não podem deixar de levar em conta a criação de mecanismos que estejam alinhados para atender as expectativas de comunicação abordadas num dos principais sistemas verticais em destaque na visão do *5G Public Private Partnership* (5G-PPP), denominado *Vertical Energy*, onde é projetado um aumento da automação de procedimentos, principalmente nos domínios da média e baixa tensão, incluindo subestações, sistemas de distribuição e também fontes renováveis de energia. Como ainda há uma limitação muito grande de recursos para prover comunicação nestas

áreas, o 5G pode fornecer soluções *wireless* mais economicamente viáveis do que os sistemas de comunicação conectados por fibra óptica e com maior resiliência em comparação com o LTE, que também faz parte das tecnologias atualmente em uso (5GPPP, 2015).

Em termos de flexibilidade de configuração da rede, paradigmas da chamada Internet do Futuro, como SDN (JARARWEH et al., 2015), têm mostrado grande potencial e podem ser integrados a infraestruturas do SEP para aumentar a capacidade de gerenciamento de dispositivos do *grid*, bem como utilizar funcionalidades lógicas para dirimir a necessidade de alguns equipamentos físicos. O SDN, por exemplo, traz novas perspectivas no âmbito do gerenciamento da rede, com um olhar atento a necessidades das aplicações e com vistas à garantia de QoS.

As limitações das tecnologias utilizadas na atual rede de comunicações da *Smart Grid* - especialmente em termos de: priorização de tráfego; atendimento de requisitos das aplicações; e capacidade de adaptar-se nas diferentes etapas de comunicação do SEP - diante dos desafios deste sistema, como: baixa latência, escalabilidade, volume de tráfego e segurança, fazem com que a busca por novas soluções, inclusive usando protocolos da Internet do Futuro, sejam fortemente incentivadas (CAHN et al., 2013).

Dentre uma gama de arquiteturas em potencial, que poderiam ser utilizadas em uma ou várias etapas da comunicação do SEP, este trabalho destaca a *Entity Title Architecture* (ETArch) (SILVA, 2013), que foi estendida para suportar os requisitos de comunicação em *Smart Grids*, recebendo o nome de ETArch-SG.

## 1.1 Motivação

A preocupação com o impacto ambiental provocado pela crescente demanda de energia elétrica trouxe à tona diversas ações envolvendo países do mundo todo (ISBN, 2015; FCCC, 2016). Em 2014 a *American Council for an Energy-Efficient Economy* (ACEEE) publicou um relatório destacando o comportamento das 16 principais economias do mundo frente ao uso eficiente da energia. Enquanto a União Europeia se destacava nas primeiras posições, o Brasil ocupava apenas o 15º lugar no ranking, indicando que ainda havia muito a ser feito em termos sociais, políticos e também na área científica (YOUNG et al., 2014).

A criação de projetos, para o uso eficiente de energia, gera expectativas que vão além da necessidade de buscar soluções para o meio ambiente, impactando em fatores econômicos, sociais e políticos. Dentre as várias propostas para redução do consumo energético, as *Smart Grids* possuem a maior abrangência, envolvendo todas as fases desde a geração até o consumo da energia elétrica. Neste cenário, as Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) desempenham um papel importante, tanto para os sistemas de comunicação do *grid* quanto para implementação e controle de fontes de energia renováveis (PANAJOTOVIC; JANKOVIC; ODADZIC, 2011) (KURODA et al., 2012).

Em complemento a questões ambientais, outra consideração importante é a expectativa crescente do consumo de energia. Neste aspecto, as companhias de energia estão atentas a novas demandas e ao potencial de crescimento do setor. O Brasil, que possui a maior parte do sistema de geração de energia baseado em hidrelétricas, ainda opera com pouco mais de 1/3 da sua capacidade geradora, segundo dados da Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)<sup>1</sup>. Mesmo assim, a matriz energética brasileira possui uma malha de comunicação bastante extensa, com a capacidade instalada total de energia elétrica de 159.989.408 MW, segundo dados fornecidos em julho de 2018 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)<sup>2</sup>.

Alavancar este crescimento oferecendo disponibilidade e qualidade da energia transmitida é uma tarefa que demanda melhorias nos sistemas de gerenciamento, proteção e controle da rede. Nestas áreas, as informações têm de ser acessadas com rapidez para que a equipe técnica consiga agir no tempo certo, com eficiência, para garantir o funcionamento adequado do sistema. Cada vez mais inteligência tem sido adicionada aos dispositivos e às operações de controle do sistema, reduzindo a carga de trabalho de operadores, sendo esta, portanto, a aplicação do conceito de *Smart Grid* na modernização do SEP.

Todavia, devido à complexidade dos sistemas que compõem a *Smart Grid*, o gerenciamento de dispositivos, e da própria rede de conexão, exige um sistema de comunicação altamente ubíquo. Os sistemas de comunicação que ainda estão em uso carregam um legado de décadas de atraso em inovações tecnológicas. As tecnologias de rede utilizadas também comprometem o processo evolutivo de *Smart Grids*, principalmente em questões de escalabilidade e latência, além das dificuldades em atender outros requisitos também fundamentais como, por exemplo, adotar uma tecnologia de enlace capaz de se adequar a natureza *multicast* de alguns tipos de comunicações.

Finalmente, o aumento no volume de dados, que é esperado para o futuro das *Smart Grids*, representa um acréscimo de trabalho nos moldes atuais para operadores de centrais de controle, tornando imprescindível a busca por processos automatizados que desonerem esses operadores de tarefas que hoje são realizadas de forma manual. Considerando todos os elementos que foram discutidos até aqui, os problemas que serão abordados neste trabalho são relacionados da seguinte forma:

- Dependência do operador para realizar tarefas que poderiam ser automatizadas;
- Necessidade de atender a diferentes requisitos de latência usando tecnologias de enlace, como Ethernet, onde o acesso aleatório ao meio é compartilhado por diversos tipos de mensagens;

---

<sup>1</sup> <http://www.ons.org>

<sup>2</sup> <http://www2.aneel.gov.br/>

- Encaminhamento de mensagens de natureza *multicast*, que atualmente é realizado tanto em enlaces de redes Ethernet, quanto usando recursos do IP-*multicast*;
- Demora no processo de configuração de novos dispositivos e na reconfiguração em caso de falhas;
- Necessidade de segurança para autenticar as entidades aptas a participar nos possíveis cenários de comunicação;
- Expectativa de melhor uso da largura de banda disponível, o que é imprescindível para suportar o aumento no volume de informações esperado para a próxima geração de dispositivos do tipo IED.

Paradigmas de Internet do Futuro possuem um grande potencial para lidar com os desafios de sistemas de comunicação do SEP e podem suportar os avanços tecnológicos necessários em prol da "energia limpa". A solução para os problemas supracitados requer modelos de comunicações para além dos sistemas de comunicação atuais (TCP/IP sobre Ethernet), que tragam inovações disruptivas e avanços significativos, impraticáveis nos sistemas legados, incapazes de atender a novas aplicações e serviços. Em particular, a arquitetura ETArch-SG foi projetada para atender necessidades de comunicações atuais e futuras.

## 1.2 Hipótese

Os sistemas de energia elétrica atuais são caracterizados por: (i) comunicações *broadcast*, onde informações são enviadas por difusão e compartilhadas em vários locais de acesso - sobrecarregando assim a infraestrutura de comunicação; (ii) comunicações que carecem de um nível maior de segurança; e (iii) excesso de operações manuais.

Em 2011, o *Internet Engineering Task Force* (IETF) publicou uma especificação para *Smart Grids* (RFC 6272) onde foi descrito de que forma a infraestrutura baseada no protocolo *Internet Protocol* (IP) poderia ser usada para o transporte de informações da rede. Apesar das sugestões apresentadas naquele documento, é sabido que o TCP/IP possui limitações para lidar com os desafios previstos para o futuro das *Smart Grids*, como por exemplo, a natureza *multicast* do tráfego, requisitos de baixa latência, escalabilidade, etc; sendo estes alguns dos desafios que as arquiteturas de Internet do Futuro se propõem a enfrentar.

Numa outra óptica, as mensagens que circulam pelos equipamentos ativos de subestações (1) utilizam uma infraestrutura de cabeamento totalmente interligada, o que dificulta o gerenciamento das operações e a expansão do sistema, ou (2) utilizam as mensagens propostas no padrão IEC 61850 sobre um barramento Ethernet, onde a replicação

de pacotes é inevitável e a comunicação *multicast*, inerente à natureza de alguns tipos de mensagens, é impraticável.

Tradicionalmente, arquiteturas da Internet do Futuro (FIA) têm sido propostas para solucionar os problemas da arquitetura Internet convencional e, recentemente, têm avançado várias pesquisas voltadas para "Internet das Coisas" (*Internet of Things* (IoT)) (YAQOOB et al., 2017). Em contrapartida, em uma área específica, como os sistemas de energia elétrica, as propostas de aplicação de arquiteturas da Internet do Futuro ainda são bastante modestas.

Com base no que foi exposto anteriormente, a hipótese deste trabalho consiste na proposição de que a ETArch-SG seja capaz de oferecer melhorias para sistemas de comunicação das *Smart Grids*, sobretudo em termos de: diminuição de latência, automação de processos, autenticação de dispositivos e roteamento *multicast*, com potencial para suportar tanto comunicações internas a subestações - para transporte de informações de gerenciamento, controle, proteção e configuração de dispositivos - quanto a troca de informações envolvendo sincrofasores da rede externa a subestações.

### 1.3 Objetivos da Pesquisa

O objetivo geral deste trabalho é especificar uma arquitetura baseada no paradigma das redes definidas por software (SDN), a ser tratada pelo acrônimo ETArch-SG, como uma extensão da arquitetura ETArch (SILVA, 2013), a fim de oferecer suporte aos sistemas de comunicação que envolvem os dispositivos de uma rede de energia inteligente (*Smart Grid*), tornando mais eficientes os mecanismos de comunicação, sobretudo para mensagens que utilizam a infraestrutura do enlace Ethernet e também para a comunicação onde se prevê a utilização do TCP/IP. Considerando a complexidade e abrangência do sistema de comunicação que engloba todo o SEP, o escopo deste trabalho limita-se a comunicação local (LAN), interna a subestações, e a comunicação WAN, entre Sincrofasores, tomando como base o padrão IEC 61850. Os objetivos específicos são listados como segue:

- Propor um SUPERVISOR para arquitetura ETArch-SG, cuja função é gerenciar a configuração de dispositivos inteligentes durante a fase de inicialização da rede (*bootstrap*) e durante os processos de recuperação de falhas em ambientes restritos aos Sistemas de Automação de Subestações (SAS);
- Especificar *workspaces* para comunicação entre IEDs, onde não haja interferência direta do SUPERVISOR, de forma a diminuir a latência das mensagens que circulam dentro da subestação, onde as restrições temporais são severas;
- Criar um mecanismo de suporte *multicast* para a comunicação externa a subestação, envolvendo um tipo de dispositivo inteligente chamado *Phasor Measurement Unit*

- (PMU), de forma mais eficiente e flexível que o IP-*multicast* apresentado como solução atual;
- Propor um *workspace* para comunicação *unicast* entre o SUPERVISOR e um dado IED, para executar procedimentos de consulta de valores aferidos e para ajustes de configurações dos dispositivos "on the fly", considerando uma redução no tempo de resposta em relação à comunicação TCP/IP atualmente utilizada;
  - Configurar a função de agregação de mensagens num componente ligado ao SUPERVISOR da ETArch-SG, com o intuito de substituir os concentradores *Phasor Data Concentrator* (PDC) e *Super Phasor Data Concentrator* (SPDC), de forma a otimizar o roteamento dos pacotes e prover economia de recursos na instalação física da rede;
  - Avaliar o grau de escalabilidade da rede, tendo em vista o aumento no número de dispositivos conectados e do volume de informações, de forma a não comprometer os requisitos mínimos exigidos pelos sistemas de comunicação em qualquer parte do *grid*;
  - Adaptar a arquitetura ETArch-SG para ser usada como *slice* no projeto: Arquitetura Adaptável para Redes CONvergentes (A2RCON) (ver Apêndice A) (UFU, );

## 1.4 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Apresentação de uma alternativa mais eficiente para comunicação de dados em *Smart Grids* através da especificação da arquitetura ETArch-SG;
- Contribuição para otimizar a configuração de dispositivos inteligentes das subestações, durante a fase de inicialização e no restabelecimento da comunicação após interrupções;
- Criação da figura do SUPERVISOR, um elemento central na arquitetura, que contribui para automação de processos e gerenciamento da comunicação;
- Aumento da confiabilidade do sistema através da segurança inerente ao *workspace*, onde cada entidade é autenticada antes de ter seu *attach* autorizado;
- Otimização de recursos da rede através de eliminação de dispositivos de concentração (PDCs e SPDCs) e melhorar o controle dos fluxos de dados entre as centrais de controle e os PMUs;

- Ampliação das áreas de atuação exploradas pelas arquiteturas da Internet do Futuro incluindo o contexto das *Smart Grids*, com intuito de melhorar a capacidade de gerenciamento dos dispositivos inteligentes;
- Contribuição nas pesquisas do grupo A2RCON através da criação de um protótipo para ser usado nos ambientes de testes que estão sendo elaborados para aquele projeto;
- Colaboração para consolidar os grupos de pesquisas da Faculdade de Computação da UFU, em especial o grupo MEHAR<sup>3</sup>, no cenário internacional das pesquisas sobre Internet do Futuro.

---

<sup>3</sup> <http://mehar.facom.ufu.br>





---

## Fundamentação Teórica

Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica são partes de um sistema complexo em que uma série de processos são executados, os quais são permeados por eventos desde a geração até o consumo da energia, onde espera-se que sejam atendidos os requisitos mínimos de funcionamento conforme a demanda. O atendimento do consumidor de acordo com a qualidade do produto demandado só pode ser alcançado mediante a inserção de sistemas de comunicação, permitindo trocas de informações entre as diversas entidades envolvidas em todo o sistema.

O crescimento da demanda de energia e a necessidade de um sistema mais confiável e abrangente têm exigido das companhias elétricas um sistema de comunicação pervasivo e cada vez mais presente em todos os níveis do ciclo energético de um SEP. Este capítulo inicia com uma descrição do sistema elétrico convencional e do processo evolutivo para os sistemas conhecidos por *Smart Grids*, segue com uma discussão sobre os sistemas de comunicação nos diversos contextos da rede e finaliza com um detalhamento sobre o padrão IEC 61850, uma das propostas mais recentes para garantir a interoperabilidade entre os dispositivos da rede.

### 2.1 Sistema Elétrico de Potência

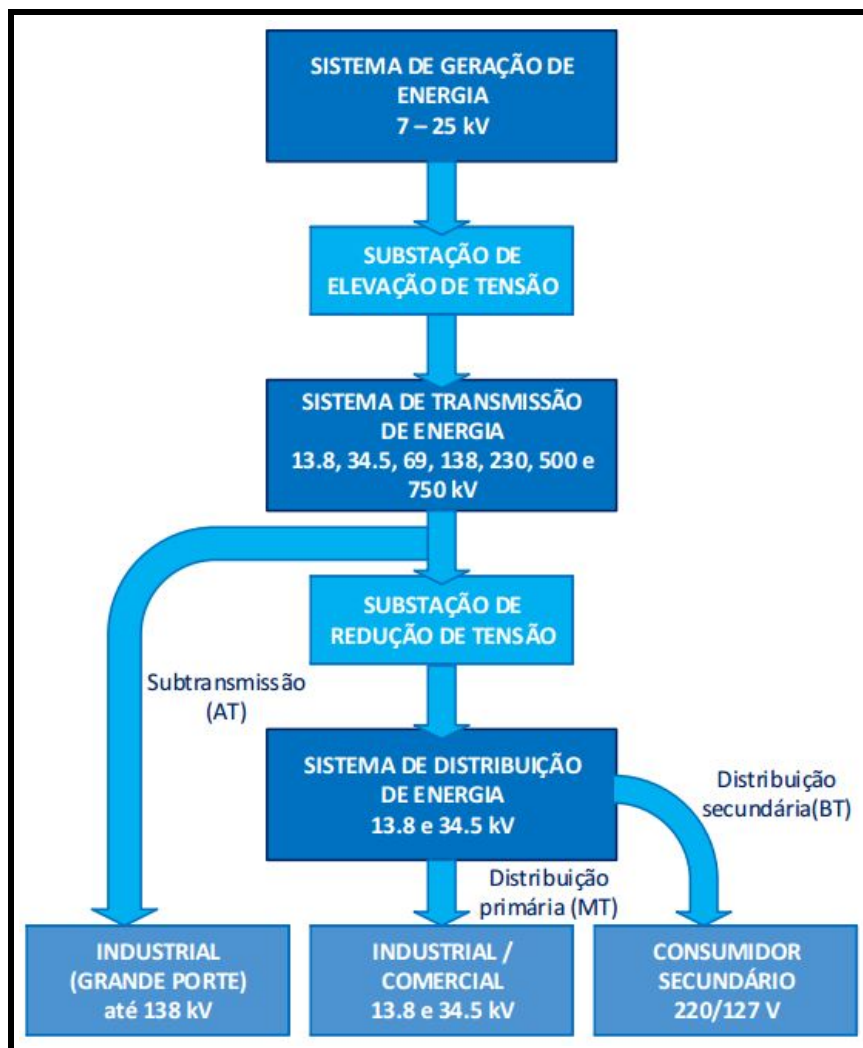
Em 1879, quando Thomas Alva Edison inventou a lâmpada incandescente, nascia ali um caminho sem volta para o surgimento de um sistema onde fosse possível gerar energia e levá-la até um local distante, onde um consumidor pudesse utilizá-la de maneira conveniente.

Num sistema convencional, a energia elétrica é produzida em grande escala, por processos de geração a partir de alguma fonte (hídrica, eólica, gás natural, petróleo, carvão, nuclear, etc), sendo que no caso do Brasil, a geração hidrelétrica está no topo da matriz energética. Em seguida, a tensão é transformada em valores altíssimos, através de subestações de elevação de tensão, com a intenção de evitar perdas durante a transmissão. Em

localidades próximas a consumidores, são instaladas subestações abaixadoras de tensão, que reduzem novamente o valor de tensão antes de distribuir a energia que será consumida pelos usuários demandantes.

A Figura 1 mostra um diagrama simplificado de um SEP e os valores de tensão mais comuns em cada etapa. A subtransmissão ocorre para valores elevados de tensão (Alta Tensão (AT)) que são destinados tanto para uso da própria subestação de redução, quanto para uso de indústrias de grande porte. A distribuição primária é feita para alimentação de vias públicas e para atendimento ao setor industrial/comercial de médio porte, usando um valor de tensão intermediário (Média Tensão (MT)). Após uma nova redução da tensão, através dos transformadores instalados nos postes das linhas de transmissão, a chamada distribuição secundária atende a consumidores comuns com níveis menores de tensão (Baixa Tensão (BT)).

Figura 1 – Diagrama simplificado de um sistema elétrico de potência.



Esse modelo centralizado tem sido usado há mais de um século e traz consigo uma série de problemas que devem ser analisados, para que melhorias sejam realizadas. Em

primeiro lugar, num sistema convencional, a energia produzida tem de ser totalmente consumida para evitar desperdícios, ou seja, não há armazenamento do excedente. Neste caso, ao invés de se ajustar a produção à demanda, o que se faz é produzir um valor que acompanha o nível máximo de consumo (valor de pico), que é totalmente variável ao longo do tempo e leva a subutilização do sistema. Em segundo lugar, a maior parte do processo não é automatizada, fazendo com que a presença dos operadores humanos seja imprescindível.

Dada a dimensão do sistema e a quantidade de dispositivos envolvidos, é fundamental que o operador consiga extrair dados importantes da rede, no menor tempo possível, para fazer as intervenções necessárias. Mal funcionamentos, quer seja por pequenas interrupções, por valores inadequados de tensão ou corrente, quer seja pela ocorrência de blecautes, podem trazer prejuízos incalculáveis em várias dimensões.

A subestação elétrica é um elemento fundamental do SEP e pertence ao escopo principal deste trabalho. Uma subestação é responsável pela interconexão dos três sub-sistemas (geração, transmissão e distribuição) e pela coordenação do funcionamento de vários equipamentos dentro da rede elétrica. De acordo com a função, as subestações podem ser classificadas em 5 tipos:

- Subestação elevadora: localizada na saída de sistemas de geração, é responsável por elevar a tensão para níveis mais altos a fim de minimizar perdas durante a transmissão;
- Subestação abaixadora: localizada nas proximidades de onde a energia será consumida, é responsável por reduzir os níveis de tensão para valores mais próximos do consumo de forma a oferecer menos riscos a usuários;
- Subestação de distribuição: localizada na concessionária de energia ou em instalações próprias de grandes consumidores, é responsável pela diminuição da tensão de transmissão para níveis da distribuição primária (13,8kV e 34,5kV);
- Subestação de manobra: ou subestação seccionadora, é localizada nos domínios da concessionária e possui a função de interligar circuitos em um mesmo nível de tensão, permitindo o seccionamento da energização em diferentes trechos; e,
- Subestação conversora: localizada próxima a sistemas de geração, abriga os equipamentos necessários para conversão de corrente alternada em corrente contínua, que será injetada nas linhas de transmissão.

Acionamentos e medições de parâmetros de diversos equipamentos localizados na rede fazem parte de um processo de comunicação monitorado por um Sistema Supervisório (SCADA), que é um sistema destinado a oferecer uma interface entre operadores e o

sistema elétrico. Isto só é possível em subestações que ofereçam ao menos um nível de semi-automação. Dentre os diversos equipamentos presentes em uma subestação, os principais serão relacionados a seguir:

- Transformador: para efeito de coleta de amostras dentro da subestação, são utilizados os chamados Transformadores de instrumento para Tensão (Transformador de Potencial (TP)) e Corrente (Transformador de Corrente (TC));
- Seccionador: é um dispositivo mecânico usado para abrir ou fechar circuitos de forma a controlar a circulação de corrente;
- Religador: é um interruptor com capacidade para detectar anormalidades interrompendo o circuito em sobrecorrente e automaticamente restabelecendo a energia para o circuito após sua normalidade;
- Disjuntor: é um dispositivo usado para abertura ou fechamento de circuitos elétricos de potência, em operação manual (manobra) ou automática (proteção);
- Relé: é um dispositivo usado para monitorar a corrente, a fim de identificar sobre-correntes e atuar como sistema de proteção, através do acionamento de disjuntores ligados ao circuito.

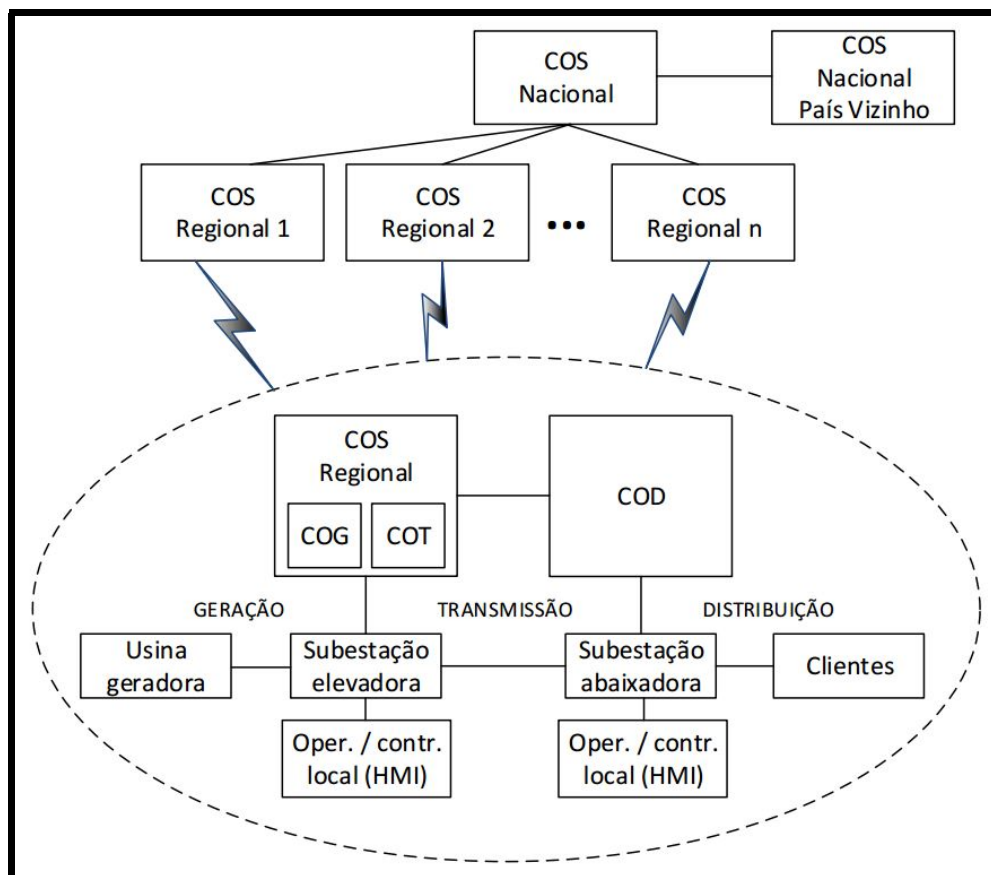
A supervisão e o controle do sistema elétrico possuem uma hierarquia que segue regras de cada país. No Brasil, todas as concessionárias estão submetidas à supervisão da ONS, que é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a regulação e fiscalização da ANEEL.

A Figura 2 ilustra a interligação entre sistemas de supervisão e controle na interligação de sistemas elétricos de potência. Abaixo da ONS, no organograma nacional, estão os centros de operação das concessionárias. A gestão das ações nos três setores da rede (geração, transmissão e distribuição) fica a cargo de cada concessionária e depende dos setores que atuam. Grandes companhias como a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), por exemplo, atuam em todas as áreas do SEP. A organização da gestão e controle do sistema supervisório é feito através dos seguintes agentes:

- Operação e controle local da subestação: através da chamada *Human Machine Interface* (HMI), operadores da subestação coordenam e executam ações diretamente ligadas à subestação e se encarregam de garantir o envio de informações importantes para o sistema de supervisão imediatamente acima;
- Centro de Operações da Distribuição (COD): utiliza um sistema supervisório para monitorar e realizar ações de intervenção diretamente ligadas a subestações de distribuição;

- Centro de Operações da Geração (COG): utiliza um sistema supervisor para monitorar e realizar ações de intervenção diretamente ligadas a usinas de geração de energia e subestações de elevação de tensão;
- Centro de Operações da Transmissão (COT): utiliza um sistema supervisor para monitorar e realizar ações de intervenção diretamente ligadas a linhas de transmissão em alta tensão;
- Centro de Operações do Sistema (COS): ações realizadas pelo COG e COT são normalmente agrupadas na mesma central de controle (COS), sendo que centros de operações regionais são ligados a uma central de controle principal, que gerencia as informações de todos os demais centros de operação do país, além de interligações com outras companhias de países vizinhos, ressaltando-se que no Brasil este papel é realizado pela ONS.

Figura 2 – Integração dos sistemas de supervisão e controle.



A necessidade de um gerenciamento de informações, de forma mais confiável e precisa, aliada ao crescimento da matriz energética que acompanha a demanda de consumo, tem impulsionado o setor em busca de processos automatizados e tem incentivado a inserção de dispositivos "inteligentes" capazes de tratar os dados de forma mais eficaz. Neste

contexto, sistemas elétricos de potência convencionais passam a ser tratados como parte de um legado e emerge um novo conceito de rede inteligente.

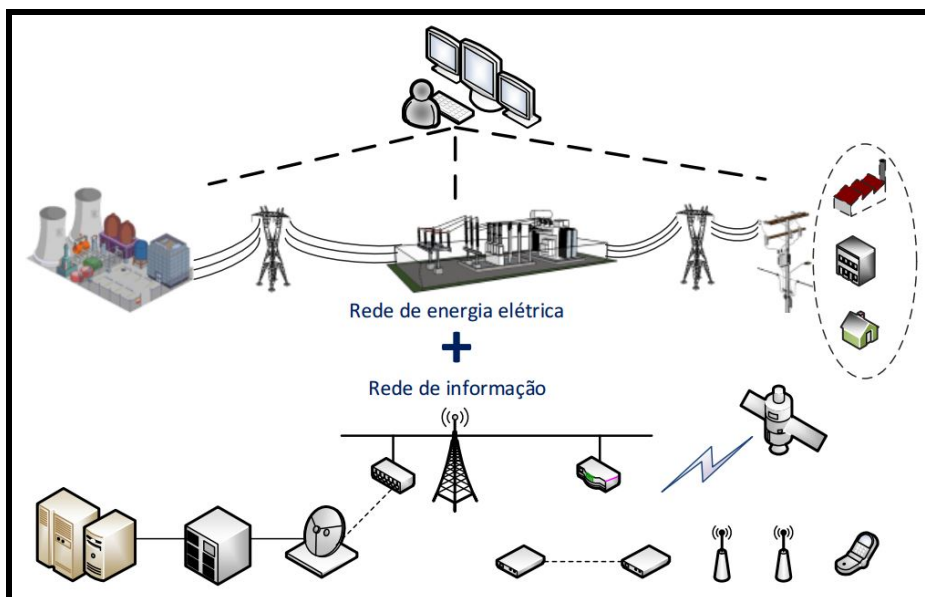
## 2.2 *Smart Grids*

Nos últimos anos, a rede convencional do SEP vem sendo sobreposta por uma infraestrutura de comunicação que, dependendo do nível de sofisticação utilizado, pode determinar se esta combinação de elementos tem atributos suficientes para ser chamada de *Smart Grid*. Dentre várias definições, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) define *Smart Grid* como:

*"...uma modernização do sistema de entrega de eletricidade para monitorar, proteger e otimizar automaticamente o funcionamento de seus elementos interligados, e sua caracterização se dá por um fluxo bidirecional de eletricidade e informações para criar uma rede de entrega de energia automatizada e amplamente distribuída, incorporando os benefícios da computação e de comunicações distribuídas para fornecer informações em tempo real e permitir o equilíbrio quase instantâneo de oferta e demanda no nível do dispositivo"*(BRYSON; GALLAGHER, 2012).

De forma geral, *Smart Grid* representa a integração entre a infraestrutura elétrica (rede de energia elétrica) e a infraestrutura de comunicação (rede de informação), essa junção de infraestruturas é ilustrada na Figura 3. A capacidade de prover comunicação e controle em toda a extensão da rede elétrica permite a criação de uma gama de serviços que beneficia tanto os operadores do sistema, quanto os consumidores de energia.

Figura 3 – Integração entre infraestruturas: energia elétrica e comunicação.



Fonte: (GELLINGS, 2007)

Embora a ideia de um sistema elétrico de potência com capacidade de comunicação bidirecional, integrado e facilmente controlável seja altamente desejável, por outro lado, não é algo fácil ou imediato. A evolução de *Smart Grids* esbarra num legado que não pode ser substituído de forma instantânea, além do que, ainda são muitos os desafios que devem ser superados para atender a todos os requisitos dessa nova rede, a começar pela quantidade de protocolos e padrões existentes, um assunto que será abordado na seção 2.2.1.

### 2.2.1 Organizações e Padrões no Âmbito de Smart Grids

O conhecimento dos padrões que, de certa forma, fizeram parte do processo evolutivo de *Smart Grids* é importante para compreender os avanços que surgiram ao longo dos anos. Todavia, a extensa gama de protocolos e padrões existentes restringe este trabalho a discutir apenas alguns dos padrões mais utilizados. A estratégia de escolha é utilizar uma perspectiva centrada na organização onde cada padrão foi desenvolvido, ao invés de usar uma descrição do ponto de vista funcional de cada padrão, seguindo a mesma abordagem feita em (BUSH, 2014). Desta forma, será possível perceber o envolvimento das grandes organizações e o papel de cada uma no processo evolutivo de *Smart Grids*.

#### 2.2.1.1 National Institute of Standards and Technology (NIST)

Em 2007, o NIST foi responsável por coordenar ações para criação de um *framework* para *Smart Grids*, na tentativa de organizar os padrões que estavam surgindo. O NIST apresentou o primeiro *roadmap* em 2010 (GALLAGHER, 2010), onde propôs um modelo de referência dividindo *Smart Grid* em sete domínios, contendo atores e aplicações, a fim de explicitar o relacionamento entre os diversos dispositivos e redes de interconexão que o compõem. A Tabela 1 relaciona os sete domínios do modelo conceitual de *Smart Grid* proposto pelo NIST e a Figura 4 ilustra a interação dos atores nesses domínios.

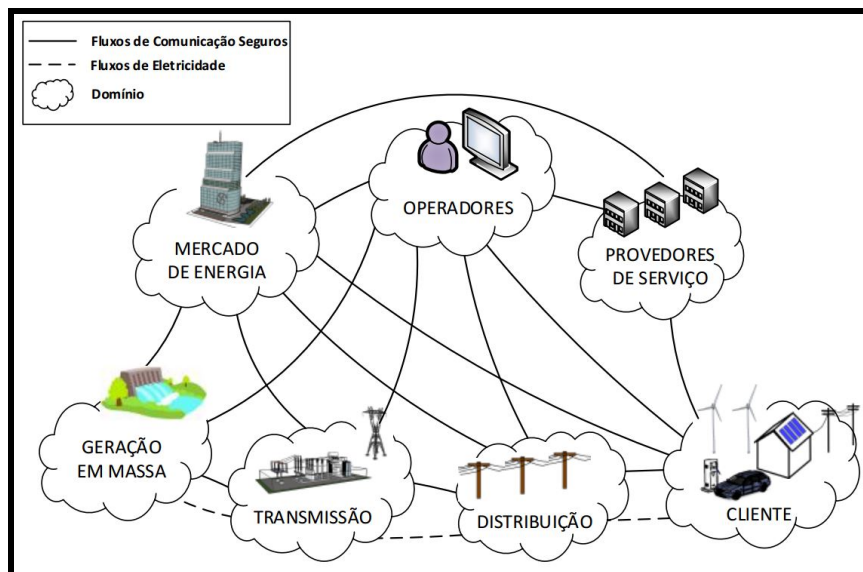
Os domínios englobam atores tais quais: dispositivos, sistemas, programas e *stakeholders* que atuam nas tomadas de decisões, e a troca de informações no contexto das aplicações. Veículos Elétricos (*Electronic Vehicle* (EV)), Medidores Inteligentes (*Smart Meter* (SM)), Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED), Geração Distribuída (*Distributed Energy Resource* (DER)) e Sistemas de Controle são exemplos de dispositivos e sistemas. As aplicações são tarefas realizadas por atores em um determinado domínio.

#### 2.2.1.2 International Electrotechnical Commission (IEC)

A IEC é uma organização internacional, não governamental e sem fins lucrativos, que abrange as áreas elétrica e eletrônica, mais especificamente, ela cobre tecnologias como: geração, transmissão e distribuição de energia, semicondutores, energia solar, nanotecnologia, entre outras (IEC, 2017). Além disso, a IEC gerencia organizações na certificação

Tabela 1 – Domínios e Atores no modelo conceitual de *Smart Grid*

	Domínio	Atores no domínio
1	Cliente	O usuário final de energia elétrica. Também pode gerar, armazenar e gerenciar o uso de energia. Tradicionalmente, três tipos de clientes são incluídos, cada qual com seu próprio domínio: residencial, comercial e industrial.
2	Mercado	Operadores e participantes no mercado de eletricidade.
3	Provedor de Serviço	Organização que presta serviço a clientes de eletricidade e utilidades.
4	Operador	Gestor de movimentação da eletricidade
5	Geração em massa	Gerador de eletricidade em grandes quantidades. Também pode armazenar energia para posterior distribuição.
6	Transmissão	Portador de grande quantidade de eletricidade em longas distâncias. Também pode armazenar e gerar eletricidade.
7	Distribuição	Distribuidor de eletricidade de/para clientes. Também pode armazenar e gerar eletricidade.

Figura 4 – Interação de atores em diferentes domínios *Smart Grid*.

Fonte: (BRYSON; GALLAGHER, 2012)

de equipamentos em conformidade com seus padrões. Existem mais de 100 padrões IEC relacionados a *Smart Grids*, todavia alguns deles têm mais relevância para este trabalho e serão apresentados, resumidamente, a seguir:

- **IEC 62351** é um padrão, composto por 11 partes, relativo a segurança cibernética especificado pelo IEC Technical Committee 57 e incorpora uma grande parte dos esforços de padronização da *Smart Grid* (CLEVELAND, 2012). Entre os *profiles* mais relevantes estão inclusos o IEC 60870-6 ou *Telecontrol Application Service Element*



2 (TASE.2) da *Intercontrol Center Communications Protocol* (ICCP) abordado na seção 2.2.1.6, IEC 9506 sobre o *Manufacturing Message Specification* (MMS) apresentado na seção 2.2.5.1, IEC 61850-8-1 que inclui o *Generic Object Oriented Substation Events* (GOOSE) e o *Generic Substation State Events* (GSSE) abordado na seção 2.2.5.2, o IEC 61850-9-2 sobre o *Sampled Values* (SV) discutido na seção 2.2.5.3 e o IEEE 1815 sobre o DNP3 tratado na seção 2.2.1.3.

O IEC 62351 faz uso extensivo de *Transport Layer Security* (TLS) para prevenir problemas de segurança na camada de transporte, usada por protocolos cliente/servidor da camada de aplicação (DIERKS, 2008). TLS não é recomendado para conexões seriais DNP3, por ser muito pesado, e também não é recomendado para mensagens do tipo GOOSE, cuja restrição de latência é muito rígida durante as operações críticas do sistema de proteção e cabeçalhos adicionais aumentariam o *overhead* de comunicação.

- **IEC 62056** é um padrão para a troca de dados de leitura, tarifação e controle de carga de medidores elétricos. De fato, este padrão é a versão internacional do *Device Language Message Specification* (DLMS)/*COmpanion Specification for Energy Metering* (COSEM). A COSEM contém informações a respeito das camadas de transporte e de aplicação do protocolo DLMS. A *DLMS User Association* é responsável por manter a especificação do protocolo, organizando os perfis por meio dos chamados livros coloridos: o Livro Azul descreve o modelo do objeto medidor e a identificação do sistema; o Livro Amarelo descreve os testes de conformidade; o Livro Verde descreve as arquiteturas e protocolos; e o Livro Branco contém o glossário (DEVICE..., 2016).
- **IEC 61850** é um padrão que foi inicialmente designado para operar sobre redes físicas cabeadas no padrão Ethernet, instaladas dentro de subestações. Para que o padrão IEC 61850 alcance outros domínios, por exemplo, sistemas de transmissão e distribuição, os pacotes devem ser traduzidos para diferentes protocolos da rede WAN ou estendendo-se a abrangência da rede Ethernet, para aumentar o alcance de cobertura. Uma maneira de se conseguir isso é usar tunelamento de quadros Ethernet sobre uma grande área de redes de comunicação, por exemplo, utilizando o serviço de *Virtual Private LAN Service* (VPLS) que fornece uma comunicação baseada em Ethernet (multiponto-a-multiponto) sobre redes *Multiprotocol Label Switching* (MPLS). Numa versão atualizada do IEC 61850 foi incluído o transporte de informações sobre redes TCP/IP. Por se tratar do elemento chave deste trabalho, o padrão IEC 61850 será detalhado na seção 2.2.5.

### 2.2.1.3 *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*

As sociedades IEEE que mais se destacam na área de *Smart Grids* são: IEEE *Power and Energy Society* (PES) e IEEE *Communication Society* (ComSoc). Dentre os protocolos mais importantes para a rede elétrica está o padrão IEEE 1815-210, conhecido por DNP3 (IEEE. . . , 2010b).

O DNP3 é um protocolo aberto que continua sendo muito utilizado pelas companhias de energia como base para comunicação entre os dispositivos de uma subestação e a central de controle. Os computadores da central de controle, chamados de mestres, trocam informações com as estações remotas para coleta de dados e envios de comandos de controle. Esta comunicação envolve diferentes tipos de dados como: binário (por exemplo, para saber se um disjuntor está ativo ou desarmado), dados analógicos (informações de tensão, corrente e potência), contadores de dados (reportam informações em kilowatt/hora, por exemplo) e arquivos contendo dados para configuração de dispositivos.

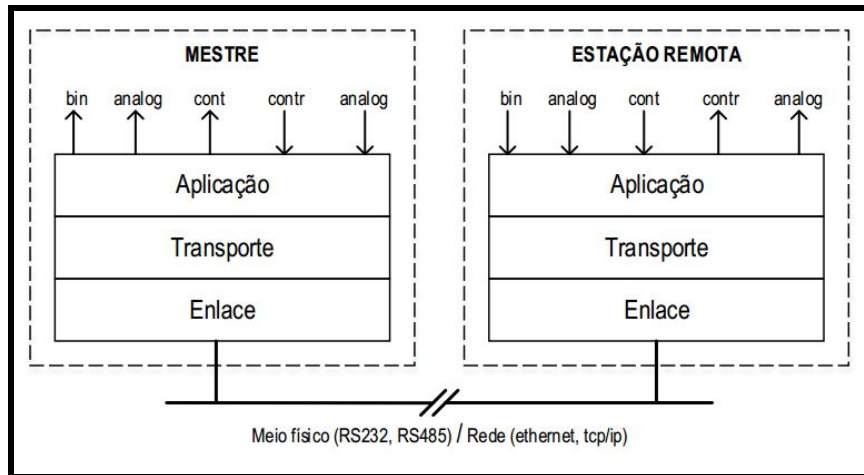
O modelo hierárquico do DNP3 tem como base o *Enhance Performance Architecture* (EPA) compreendendo três camadas: aplicação, enlace de dados e transporte. A Figura 5 mostra a relação de comunicações entre a estação mestre e a unidade remota. Os diferentes tipos de dados representados na figura são codificados/decodificados na camada de aplicação de forma a suportar diferentes formatos. Possíveis fragmentos de mensagens são controlados pela camada de transporte cuja função principal é garantir que os dados da aplicação sejam entregues no destino, de acordo com o tipo de enlace utilizado.

A camada de enlace tem a responsabilidade de prover confiabilidade para os dados que seguem pela camada física, para tal são utilizados mecanismos de detecção de erros (CRC-16bits) e detecção de quadros duplicados. A comunicação usando DNP3 também pode ser feita sobre uma rede TCP/IP, sendo que neste caso a verificação dos quadros não é realizada e uma interface (*Application Programming Interface* (API)) é adicionada para facilitar o uso da conexão.

### 2.2.1.4 *American National Standards Institute (ANSI)*

ANSI é uma organização sem fins lucrativos, que não é voltada diretamente para o desenvolvimento de padrões, mas que supervisiona um grande número de padrões desenvolvidos nos Estados Unidos, com credibilidade para avaliar se um determinado padrão atende a requisitos internacionais e funciona como um selo de qualidade para vários padrões existentes, como é o caso dos padrões IEEE. Tais creditações os tornam padrões ANSI. Desta forma, a maioria dos padrões descritos nesta seção são, também, padrões ANSI, sendo de especial interesse os padrões ANSI C12 (SNYDER; STUBER, 2007), que naturalmente recebe o acrônimo ANSI como prefixo de cada um dos padrões aplicados aos medidores inteligentes (*Smart Meters*) de energia.

Figura 5 – Modelo hierárquico do DNP3.



Fonte: (IEEE..., 2010b)

Outro padrão relevante para este trabalho é o IEEE C37.118-2005, que originalmente especificava aspectos relacionados a medições e transferências em tempo real para dados de microfasores. Em 2010, o padrão foi dividido em duas partes, C37.118.1-2011 *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems* e C37.118.2-2011 *IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems*, com a intenção de desacoplar padrões de medições e de qualidade dos padrões para transmissão em tempo real (RANA et al., 2015).

#### 2.2.1.5 International Telecommunication Union (ITU-T)

A ITU-T é uma agência das Nações Unidas para normatizar tecnologias de comunicação, sendo que o grupo FG Smart, que iniciou seus trabalhos em 2010, tem como objetivo cinco entregáveis para *Smart Grid*: (1) visão geral de *Smart Grid*; (2) definições de termos e conceitos; (3) especificação de casos de uso; (4) especificação de requisitos; e (5) definição da arquitetura (ITU-T, 2011).

O FG Smart mantém relacionamentos com outras entidades padronizadoras, tais como IEC, *International Standard Organization* (ISO) e *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI). A cooperação com a IEC, por exemplo, se dá principalmente pela participação no IEC TC-57/WG20 e estende-se por outros comitês técnicos.

Em termos de padrões publicados, o G.9955 e o G.9956 especificam as camadas Física e de Enlace de Dados para utilização da chamada *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), em banda estreita, nas transmissões de corrente contínua e alternada, em frequências abaixo de 500 KHz (ITU-R, 2016). Estas normas são importantes pelas especificações de comunicações em baixa e média tensão, através do uso de transformadores, abrangendo áreas urbanas e zonas rurais distantes.

### 2.2.1.6 Outras atividades de padronização

Existe uma grande quantidade de padrões diretamente relacionados a *Smart Grid*. Alguns desses padrões são apresentados nesta seção sendo: (1) Modbus, um padrão de fato usado em subestações; (2) PLC, padronizado pelo IEEE para transmissão de dados através das linhas de energia; (3) *Common Information Model* (CIM), um padrão dentro do guarda-chuva da IEC para facilitar a troca de dados entre as companhias do sistema elétrico; e (4) ICCP, padrão da IEC ainda muito utilizado na comunicação entre as subestações e a central de controle.

1. Modbus foi criado em 1979 pela Modicon, sendo um protocolo de enlace de dados originalmente projetado para operar sobre linhas de comunicação serial, mas tem sido usado sobre vários outros protocolos, incluindo Ethernet e IP. Modbus padroniza o formato de mensagens entre dispositivos mestre/escravo com informações gerenciadas pelo supervisão SCADA. As mensagens contêm o endereço do dispositivo, comandos a serem executados e o campo de dados, acrescido de um *checksum* para controle de erro. O formato específico da mensagem muda dependendo da arquitetura usada, por exemplo, se TCP/IP, o *checksum* não é necessário.

Dispositivos escravos respondem a transmissões unicast, e desprezam transmissões *broadcast*. As respostas consistem em mensagens de *status* ou código de exceção, o que caracteriza a implementação de um protocolo do tipo *request-response*. O tamanho máximo de uma mensagem é de 260 bytes, quando o protocolo utiliza uma rede TCP/IP (MODBUS..., 2012).

2. O IEEE 1901-2010<sup>1</sup>, especifica o uso de PLC (IEEE..., 2010a). Este padrão também é conhecido por *Broadband over Power Line* (BPL) e foi projetado para cenários em que a rede elétrica é utilizada tanto para o transporte de energia, quanto para a comunicação de dados. O estabelecimento de comunicações PLC pode ser feito em linhas de média (15/50kV) e baixa (110/230V) tensão. Apesar de ser uma solução atrativa, principalmente por questões de alcance geográfico e utilização da infraestrutura física instalada, ainda existem vários problemas técnicos e questões reguladoras para serem resolvidos (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2010).
3. O CIM é especifica termos e conceitos de sistemas de energia, cujo objetivo é permitir que aplicações troquem informações sobre a configuração e o status de um sistema elétrico. Especificamente, CIM é definido por um vocabulário comum e uma ontologia que representa o conhecimento fundamental no domínio da energia elétrica, esse idioma comum permite que a informação seja representada em XML e compartilhada entre aplicativos. A IEC incorporou a CIM em seus padrões e é reconhecida como IEC 61970 (IEC, 2013).

<sup>1</sup> IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks

4. O IEC 60870 (IEC, 1989), também conhecido por ICCP ou TASE.2, apresenta uma solução para o problema de troca de dados entre os centros de controle de companhias de energia. A primeira versão, TASE.1, foi desenvolvida para atender a necessidades do mercado europeu, no TASE.2 foi incorporado o uso de MMS, não havendo até este momento uma nova versão.

ICCP especifica os formatos para troca dos seguintes tipos de informações: valores de medições, informações sobre o status de dispositivos, informações de controle, dados de contabilidade energética, ações agendadas e mensagens de operadores. ICCP também pode ser utilizado entre grupos organizacionais diferentes, que atuam em diversos setores do SEP.

O ICCP usa um paradigma cliente/servidor, onde o centro de controle (cliente) requisita informações e o centro de controle (servidor) responde com informações. Como foi mencionado, o TASE.2 usa o MMS para fornecer serviços de mensagens, sendo que em comunicações entre subestações, ele usa o TCP/IP. TASE.2 também pode ser utilizado sobre protocolos de enlace Ethernet (GUO et al., 2010) para trocas de mensagens internas a subestações.

### 2.2.2 Desafios dos Sistemas de Comunicação em Smart Grids

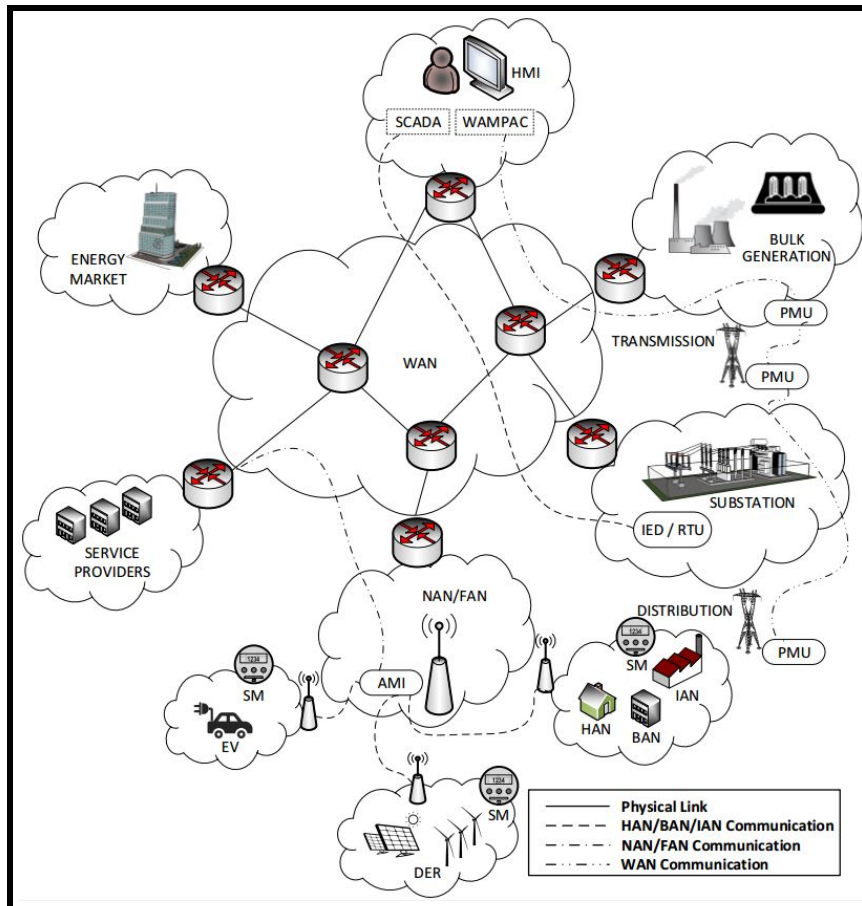
Conforme descrito na seção 2.2, conceitualmente, uma *Smart Grid* representa a incorporação das infraestruturas de comunicação nos domínios da rede de energia elétrica. A habilidade de prover comunicação e controle em todo âmbito da rede elétrica, pode trazer benefícios tanto para os operadores do sistema quanto para os consumidores de energia.

Para que se tenha uma visão mais compreensiva sobre esta rede de comunicação, procurou-se representá-la através de uma arquitetura hierárquica multi-camadas, ilustrada na Figura 6, classificada pela taxa de transmissão, área de cobertura e aspectos de funcionalidade.

Na Figura 6, observa-se a nomenclatura usada em (SABBAH; EL-MOUGY; IBN-KAHLA, 2014), onde as funcionalidades de sistemas de comunicação em *Smart Grids* estão concentradas nas seguintes áreas:

- Rede de instalações do cliente que inclui: *Home Area Network* (HAN), *Building Area Network* (BAN) e *Industrial Area Network* (IAN);
- Redes de curto alcance: *Neighborhood Area Network* (NAN)/*Field Area Network* (FAN);
- Redes de abrangência distribuída: WAN.

Figura 6 – Áreas de abrangência de comunicação em Smart Grids.



O escopo deste sistema de comunicação também leva em conta diferentes serviços que devem ser suportados pela rede, tais como: SCADA; sistemas de proteção e monitoramento internos à subestação; sistemas de proteção, monitoramento e controle de grande abrangência (*Wide Area Monitoring, Protection and Control* (WAMPAC)); serviços de voz/vídeo; e vários outros serviços que acompanham as perspectivas de evolução do IoT. Todos os serviços de monitoramento passam pela central de controle e são observados pelos operadores através de uma interface para visualização sinóptica dos dados (HMI).

A necessidade de um sistema mais abrangente, capaz de suportar requisitos da *Smart Grid* em todos os domínios, traz à tona uma variedade de tecnologias de comunicação, como por exemplo: UMTS, LTE e MPLS, que se utilizam da vantagem da infraestrutura óptica das redes WAN existentes; WiMAX e PLC, comumente utilizadas nas redes NAN; IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, adequadas para áreas de menor cobertura como as HANs; e a tecnologia Ethernet que suporta a infraestrutura de comunicação de subestações. De fato, a maioria destas tecnologias não é exclusiva de um único domínio e pode ser aplicada em várias partes do *grid*. Em (SAPUTRO; AKKAYA; ULUDAG, 2012), é apresentada uma descrição mais detalhada sobre protocolos de roteamento e aplicações que envolvem cada um dos domínios de um *Smart Grid*.

Como não há uma separação bem definida entre as áreas em termos dos aspectos de comunicação, então, muitas funcionalidades e requisitos estão presentes repetidamente em diferentes áreas. Portanto, faz-se necessário um sistema pervasivo e flexível para suportar essa diversidade de informações. Tal cenário fez com que o protocolo IP fosse visto como um potencial candidato para satisfazer algumas destas necessidades, o que culminou na publicação da RFC 6272 (*Internet Protocol for the Smart Grid*). Grande parte do *grid* de comunicação atual, incluindo redes de suporte a sistemas de aquisição de dados SCADA, é baseado na arquitetura Internet, onde as funcionalidades da rede (p.ex. roteamento) foram fixadas na fase de concepção dos protocolos TCP/IP, de forma que, em tempo de execução, muitas vezes é trabalhoso, complicado, e até mesmo impossível, fazer reconfigurações a tempo de reagir a eventos acidentais e maliciosos que prejudicam a eficácia e segurança da rede (DONG et al., 2015).

A quantidade de dispositivos e o volume de informações, presentes em grids, apontam para vários desafios a serem enfrentados pelos sistemas de comunicação de *Smart Grids*, tais como largura de banda, escalabilidade, segurança, padronização e flexibilidade. A Tabela 2 apresenta um resumo dos principais desafios encontrados dentro de uma área de abrangência específica e também um conjunto de itens que fazem parte de todo o escopo da comunicação.

Com foco em sistemas elétricos de potência, surgiram propostas baseadas em arquiteturas de Internet do Futuro, SDN e NFV, capazes de oferecer algum suporte a sistemas de comunicação de *Smart Grids* (DONG et al., 2015), (JIANG et al., 2015), (THOMPSON, 2016), (CAHN et al., 2013) e (NGUYEN; CHERIET, 2013). A utilização de abordagens *clean slate*, como o ETArch-SG, pode contribuir para minimizar alguns dos problemas enfrentados para garantir a comunicação entre os elementos do *grid*, sendo esta uma área de pesquisa que ainda precisa ser melhor explorada.

### 2.2.3 Padrão IEC 61850

Há várias tecnologias de comunicação que podem ser aplicadas a ambientes de *Smart Grid*. Todavia, os sistemas de comunicação vêm sendo utilizados em situações particulares de acordo com o tipo de informação e o local onde a comunicação acontece, ou seja, não há uma padronização para os tipos de mensagens que circulam pela rede. Na tentativa de viabilizar uma rede completamente automatizada, com padrões e protocolos comuns e com alto grau de interoperabilidade entre os dispositivos, a IEC iniciou a especificação do padrão IEC 61850, por meio do Technical Committee 57 (TC57), que define um conjunto de *profiles* para troca de informações entre dispositivos (IEC, 2016b).

Atualmente, verifica-se que o processo de comunicação entre dispositivos de subestações está adotando o padrão IEC 61850, com adaptações necessárias para manter em funcionamento todo o legado. Embora não seja definido como um protocolo de comunica-

Tabela 2 – Principais Desafios de Sistemas de Comunicação em Smart Grids

Domínio	Desafios Específicos	Desafios Gerais
WAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Proteção totalmente automática contra grandes “apagões”, congestionamentos de transmissão e condições de estresse com tempo de reação muito curto;</li> <li>– Restabelecimento automático e controle rápido de equipamentos com requisitos de desempenho e disponibilidade rigorosos;</li> <li>– Fornecimento de dados do sistema em tempo real para fins de monitoramento, com requisitos de alta confiabilidade e tempos de resposta na ordem de segundos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Largura de banda: espera-se um elevado nível de utilização à medida que mais e mais equipamentos se tornem interligados;</li> <li>– Escalabilidade: com o aumento da complexidade de gerenciamento da rede e dos recursos, a capacidade de acomodar este crescimento também deve ser escalável;</li> <li>– Segurança: requisito indispensável para enfrentar o potencial crescente de cyber-ataques e incidentes inesperados em setores críticos;</li> </ul>
NAN/FAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Requisitos temporais rigorosos para teleproteção;</li> <li>– Confiabilidade para evitar comandos indesejados, perdidos ou erros, durante a comunicação entre dispositivos;</li> <li>– Adaptabilidade para lidar com sistemas legados;</li> <li>– Resiliência para a rápida recuperação de anomalias;</li> <li>– Configuração dinâmica e rápida de dispositivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Padronização: a quantidade de padrões diferentes dificulta a interoperabilidade da comunicação;</li> <li>– Flexibilidade para alcançar diferentes níveis de requisitos e QoS (p.ex., latência é um requisito presente em todo grid);</li> </ul>
HAN/BAN/IAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Interoperabilidade entre diferentes equipamentos e serviços;</li> <li>– Segurança e privacidade para lidar com dados privados;</li> <li>– Alta acessibilidade para prover comunicação em um ambiente distribuído.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Modelagem, análise e projeto: não são tarefas fáceis para uma infra-estrutura de comunicação complexa.</li> </ul>



ção, o IEC 61850 propõe mecanismos para troca rápida de informações entre dispositivos e sem a quantidade de conexões físicas que são necessárias em outros padrões existentes.

O IEC 61850 foi proposto inicialmente em 2003, por meio da especificação técnica IEC TS 61850-2:2003, tendo como principal objetivo especificar um sistema de comunicação para subestações que fosse mais abrangente e voltado a questões de interoperabilidade entre dispositivos. Em 2012, o padrão já contava com diversos documentos divididos em 10 grandes seções. O próximo passo buscava sair do ambiente local da subestação para especificar novas recomendações envolvendo a comunicação de outras partes do SEP, culminando com a criação de vários outros documentos incluindo normas, especificações técnicas e relatórios técnicos. O último documento publicado, até o momento, é o IEC TR 61850-90-17:2017, que trata de redes de comunicação e sistemas para automação de sistemas elétricos de potência com foco em informações sobre a qualidade da energia transmitida.

Em Sistemas de Automação de Subestações (SAS), com milhares de pontos de conexão de dados, dispositivos compatíveis com o padrão IEC 61850 proporcionam uma estrutura muito bem organizada para acessar dados. Neste contexto, os dados são contidos em modelos virtuais que representam uma função lógica ou um equipamento físico que faz parte do *grid*. Este modelo permite que a organização de dados seja feita de modo compreensivo para todos os tipos de dispositivos, independentemente do fabricante (MACKIEWICZ, 2006).

Alguns dispositivos utilizam arquivos de configuração especificados em uma linguagem chamada *Substation Configuration Language* (SCL), tais arquivos precisam ser carregados para os dispositivos durante a inicialização ou reconfiguração do sistema. Uma vez que este processo pode ser feito remotamente, usando a própria rede de comunicação, o resultado é uma grande economia de custos e de esforços (Operational Expenditure (OPEX)) para configurar um dispositivo baseado no IEC 61850 (MACKIEWICZ, 2006). O modelo de dispositivos e a modelagem da comunicação em subestações são definidos pelo *profile* IEC 61850-5 (IEC, 2003a) e serão apresentados na seção 2.2.4.

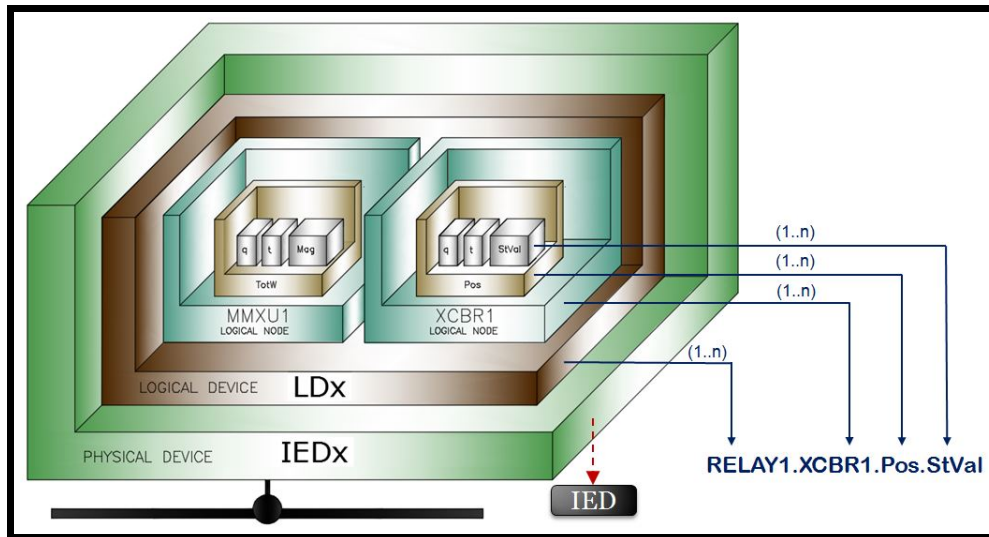
## 2.2.4 Modelo de dispositivos no padrão IEC 61850

A modelagem proposta pelo IEC 61850 começa pela definição do dispositivo físico, que é ligado à rede, e seu endereçamento. Um dispositivo físico é disponibilizado por meio de um ou mais dispositivos lógicos (*Logical Device* (LD)). O LD abriga um ou mais conjuntos de nós lógicos (*Logical Node* (LN)), os quais são agrupados de acordo com suas características funcionais, tais como funções de proteção, controle do supervisor, sensores, atuadores, monitoramento, controle automático etc.

Do ponto de vista da granularidade do modelo de dados do padrão IEC 61850, um

LN contém um ou mais objetos (*Data Objects* (DO)), cada qual possuindo um conjunto de atributos (*Data Attributes* (DA)). A Figura 7 representa o modelo de dados do padrão IEC 61850, ilustrando as várias entidades que o compõem e mostra um exemplo de referência de objetos para a estrutura hierárquica.

Figura 7 – Modelo de dados do padrão IEC 61850.



O modelo de dados do padrão IEC 61850 garante a unicidade de informações. Por exemplo, para obter a informação de *status* de um disjuntor, identificado como um dispositivo lógico chamado "Relay1", é especificada uma hierarquia de informações, garantindo que esta informação pertença única e exclusivamente a este dispositivo. Para garantir a unicidade, o primeiro passo é identificar o nó lógico ao qual pertence o disjuntor. A Figura 8 apresenta os 13 grupos de nós lógicos definidos pelo padrão IEC 61850 num total de 91 nós lógicos. Como existem diferentes fabricantes, os nós lógicos são agrupados em categorias de acordo com a função realizada. Seguindo com o exemplo, a sequência XCBR faz referência ao elemento disjuntor. A letra X identifica o grupo lógico de uma classe de dispositivos responsáveis por impedir ou permitir a passagem de corrente elétrica entre a fonte e a carga através de manobras (ligar/desligar), este grupo é conhecido por Conjunto de Manobra e Controle (CMC), também referenciado como *Switchgear*.

Cada dispositivo possui um conjunto de objetos acessíveis, identificados pelo nome do atributo (*Attribute Name*). Alguns são obrigatórios, outros são opcionais, para o caso do disjuntor usado no exemplo, a Figura 9 mostra a informação de posição (Pos) da chave do disjuntor. O tipo de atributo deve estar relacionado a uma das 30 classes (*Common Data Classes* (CDC)) definidas no *profile* IEC 61850-7-3. Neste caso, o valor é conhecido por *Single Point Control* (SPC), que é o *status* controlável de uma única ação (abrir ou fechar).

Cada objeto possui vários atributos, stVal é o valor booleano que define se a chave do

Figura 8 – Grupos de nós lógicos definidos no padrão IEC 61850.

Grupo	Nome	Qte de nós lógicos
A	Automatic Control	4
C	Supervisory Control	5
G	Generic Function References	3
I	Interfacing and Archiving	4
L	System Logical Nodes	2
M	Metering and Measuring	8
P	Protection	28
R	Protection Related	10
S	Sensors Monitoring	4
T	Instrument Transformer	2
X	Switchgear	2
Y	Power Transformer	4
Z	Further Power System Equipment	15

**XCBR** – disjuntor  
(circuit breaker)

**XSWI** – seccionador  
(circuit switch)

Figura 9 – Informações acessíveis de objetos para um disjuntor.

XCBR class			
Nome do Atributo	Tipo	Explicação	Obrigatório / Opcional
LNName		Shall be inherited from LN class (IEC 61850-7-2)	
Dados			
Informação Comum ao LN			
		LN shall inherit all Mandatory Data from Common Logical Node Class	M
Loc	SPS	Local operation	M
EEHealth	INS	External equipment health	O
EEName	DPL	External equipment name plate	O
OpCnt	INS	Operation counter	M
Controles			
Pos	SPC	Switch position	M
BlkOpn	SPC	Block opening	M
BlkCls	SPC	Block closing	M
ChgMotEna	SPC	Charger motor enabled	O
Valores Medidos			
SumSwARs	BCR	Sum of Switched Amperes, resetable	O
Informação de Status			
CBOpCap	INS	Circuit breaker operation capability	M
POWCap	INS	Point On Wave switching capability	O
MaxOpCap	INS	Circuit breaker operation capability when fully charged	O

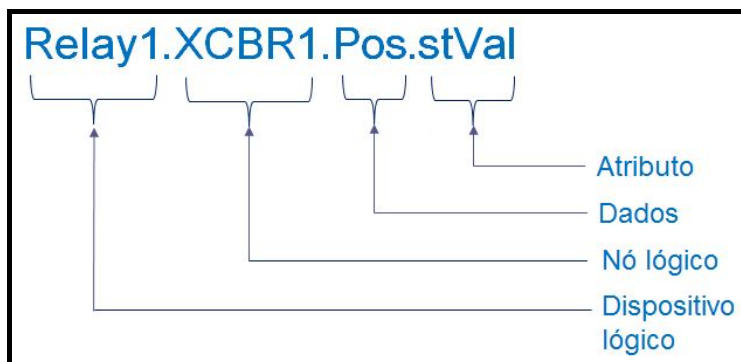
disjuntor está na posição aberta ou fechada. Outros atributos poderiam ser consultados, como mostra a Figura 10, sendo que para o objeto 'Pos' existem mais de 20 atributos possíveis.

A Figura 11 mostra a referência final para a informação de status do disjuntor, concluindo o exemplo dado.

Figura 10 – Informações de atributos adicionais de um objeto.

Pos		
Nome do Atributo	Tipo do Atributo	Requisitos funcionais
stVal	BOOLEAN	Status (ST)
q	Quality	Status (ST)
t	Time Stamp	Status (ST)
d	Visible String255	Description (DC)
subVal	BOOLEAN	Substitution (SV)
subQ	Quality	Substitution (SV)
ctlVal	BOOLEAN	Control (CO)
ctlModel	CtlModels	Control (CO)
Mais de 20 atributos...		

Figura 11 – Exemplo de valor de referência para a informação de status de um disjuntor.



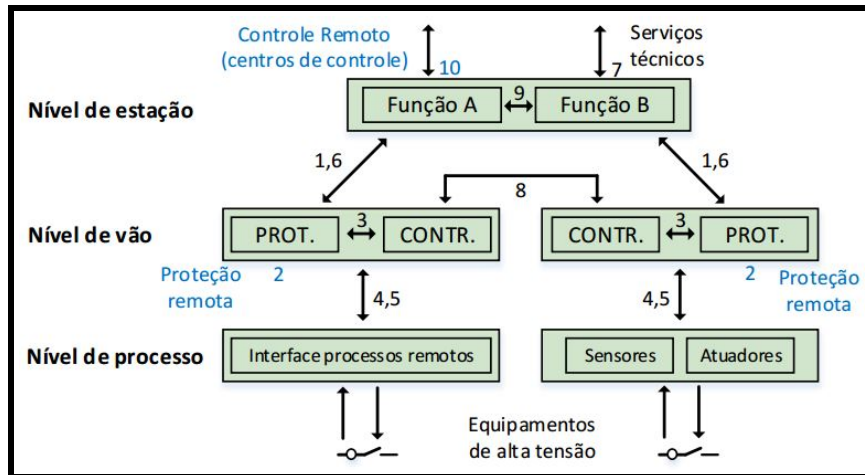
### 2.2.5 Comunicação IEC 61850 no escopo de subestações

As funções realizadas no SAS têm foco em controle, monitoramento e proteção de equipamentos de subestações. Além disso, funções adicionais de configuração do sistema, gerenciamento da comunicação e sistema de supervisão, fazem parte do escopo de comunicação definido no *profile* IEC 61850-5. As funções de SAS são alocadas logicamente em três níveis: nível de estação, nível de Vão e nível de processo. A Figura 12 mostra esta divisão em níveis e o posicionamento lógico de interfaces, numericamente definidas com valores de 1 a 10.

As funcionalidades de cada nível podem ser assim descritas:

- Nível de processo: estabelece a relação de interação com processos envolvendo equipamentos de alta tensão como: CMC, transformadores, medidores de alta tensão etc. A comunicação com o nível de Vão é feita pelas interfaces lógicas 4 e 5. O nível de processo e o nível de vão eventualmente são integrados em um mesmo dispositivo físico, mas ainda assim a estrutura lógica não é alterada.
- Nível de Vão: executa funções típicas de proteção e controle realizadas por con-

Figura 12 – Níveis e Interfaces lógicas em um SAS



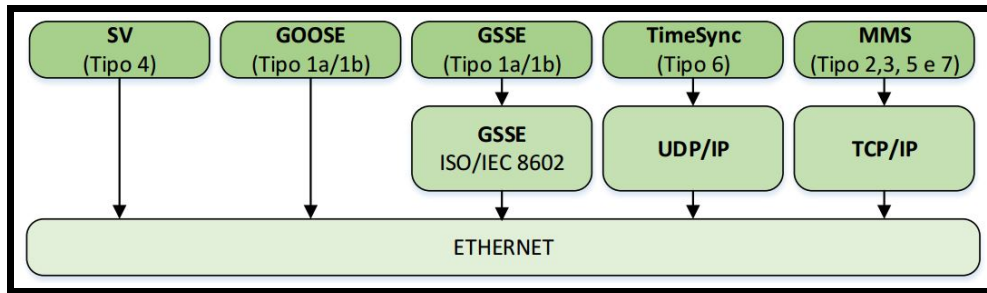
juntos de relés e disjuntores. Entre tais dispositivos, a comunicação é feita pela interface lógica 3, para comunicação com outros Vãos é usada a interface lógica 8. A comunicação com HMI, bem como as funções de telemonitoramento, são feitas pelas interfaces 1 e 6. A interface 2 é usada para comunicação, no nível de Vão, entre subestações distintas ou remotas, sendo que este acesso não é discutido na norma IEC 61850-5.

- Nível de estação: realiza funções de controle e monitoramento das informações obtidas a partir dos outros dois níveis. As interfaces 1 e 6 são usadas para este fim. Funções distintas são executadas por operadores diferentes em mais de um computador (HMI), a comunicação entre eles é feita pela interface 9. Sistemas de telecontrole e telemonitoramento executam serviços técnicos através da troca de mensagens entre operadores da subestação e a equipe de engenharia, neste caso é usada a interface 7. A interface de controle remoto, interface 10, também está fora do escopo da IEC 61850-5 e geralmente é feita usando os padrões IEC 60570-5-101 e 60570-5-104, sendo por esta interface que é feita a comunicação com o centro de controle de operações principal do SEP.

As interações processadas nestas interfaces lógicas são definidas, pelo padrão IEC 61850, em cinco tipos de mensagens: MMS, através da interface *Abstract Communication Service Interface* (ACSI), GOOSE, GSSE, SV e o *Time Synchronization Profile* (TimeSync). A Figura 13 mostra estes tipos de mensagem e a comunicação com a camada de enlace.

O ACSI, descrito no padrão IEC 61850-7-2 (IEC, 2003b), é a interface pela qual as aplicações conversam com os servidores. A semântica definida pelo ACSI permite a comunicação entre nós lógicos. Todos os serviços do ACSI são do tipo cliente/servidor

Figura 13 – Recomendações definidas pelo padrão IEC 61850.



(*Confirmed Services*) e utilizam o modelo *Two-Party Application Association* (TPAA) para comunicação de mensagens MMS, descritas na seção 2.2.5.1.

Mensagens GOOSE, especificadas nos padrões IEC 61850-7-2 (IEC, 2003b) e IEC 61850-8-1 (IEC, 2004b), são usadas para troca de dados no nível de Vão atuando diretamente no sistema de proteção e, geralmente, possuem restrições temporais bastante rígidas. Este tipo de mensagem utiliza o modelo *Multicast Application Association* (MCAA), característico do paradigma *publish/subscriber* para comunicação *multicast*. As mensagens GOOSE serão detalhadas na seção 2.2.5.2.

Da mesma forma, mensagens GSSE são responsáveis por atualizações de status de IEDs, e sendo mais simples do que o GOOSE, ele possui limitações de interoperabilidade e flexibilidade, por isso já não é mais recomendado para novas instalações no padrão IEC 61850 (BRAND; OSTERTAG; WIMMER, 2003) e não será abordado neste trabalho. Também não serão abordadas diretamente neste trabalho mensagens do tipo TimeSync, cujo propósito é sincronizar as informações para verificar se os dados ainda são válidos para uso.

O SV é descrito no padrão IEC 61850-9-2 (IEC, 2004c), consistindo em um método para transmissão de amostragens de valores medidos, através de transdutores, em equipamentos de alta tensão localizados no nível de processo. O SV pode usar tanto o modelo TPAA quanto MCAA, dependendo da aplicação. Os detalhes deste tipo de mensagem serão apresentados na seção 2.2.5.3.

As recomendações representadas na Figura 13, referem-se a restrições temporais e classes de desempenho do padrão IEC 61850. As classes de desempenho são separadas em dois grupos distintos: (1) controle e proteção; e (2) medição e qualidade de energia. Em termos práticos, os grupos são usados para definir parâmetros de precisão e desempenho esperados em cada um dos níveis de subestações.

A Tabela 3<sup>2</sup> apresenta os valores temporais esperados para cada tipo de mensagem das recomendações relacionadas na Figura 13. Alguns destes requisitos temporais são

<sup>2</sup> Extraída no padrão IEC 61850-5

usados como referência para os valores experimentais obtidos com o uso da arquitetura proposta neste trabalho.

Ressalte-se que, apesar de serem definidos 8 tipos de mensagens, que poderiam ser tratadas de forma a criar um nível completo de priorização, atualmente isso não é feito. Usando o enlace Ethernet, para conectividade de dispositivos de subestações, o único esquema de priorização é feito apenas para as mensagens GOOSE e SV com requisito temporal mais rigoroso. Para separar estes tipos de mensagens das demais, é utilizado o padrão IEEE 802.1Q.

Tabela 3 – IEC 61850: Tipos de mensagens e Requisitos temporais

Tipo	Atividade	Exemplos	Protocolo	Requisito temporal (ms)
1a	Mensag. rápidas	Execução imediata: <i>"trip"</i> .	GOOSE	$3 < t < 10$
1b	Mensag. rápidas (outras)	Mensagens com requisitos menos exigentes: <i>"start"</i> , <i>"stop"</i> , <i>"status"</i> , etc.	GOOSE	$20 < t < 100$
2	Mensag. velocid. média	Medidas obtidas de parâmetros dos IEDs	MMS	$t < 100$
3	Mensag. velocid. baixa	Medidas que exigem marcação do tempo: alarmes, temperatura, pressão, etc.	MMS	$t < 500$
4	Mensag. de dados em formato bruto	Dados de saída dos transdutores em fluxo contínuo	SV	$3 < t < 10$
5	Transfer. de arquivos	Transferência de blocos de arquivos	MMS	$t > 1000$
6	Mensag. de sincronismo	Mensagens de sincronismo para os IEDs	TimeSync	não definido <sup>3</sup>
7	Mensag. de comando com controle de acesso	Comandos de controle emitidos pelo operador com alto grau de segurança	MMS	$t < 500$

### 2.2.5.1 Protocolo MMS – ISO/IEC 9506

MMS é um protocolo da camada de aplicação, baseado em objetos, que especifica um conjunto de serviços para troca de dados em tempo real e mensagens de controle entre

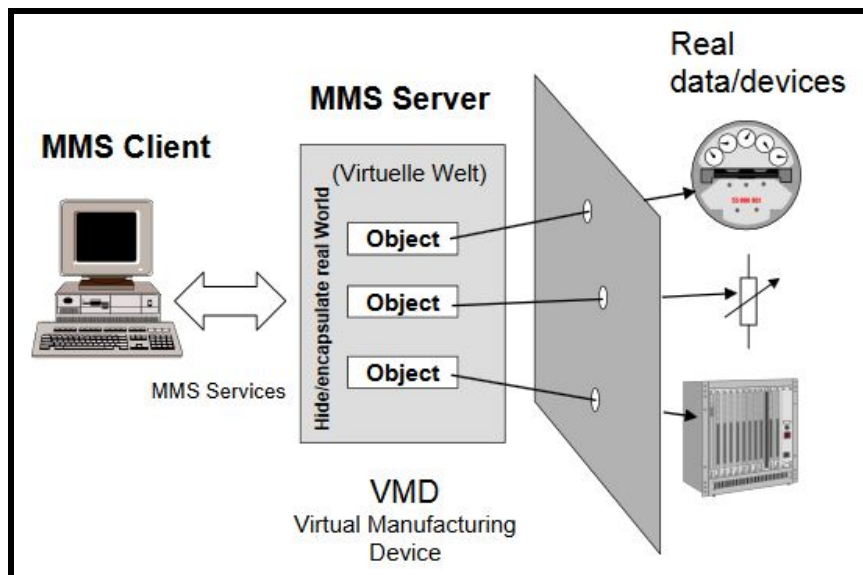
<sup>3</sup> Embora não haja indicação de restrição temporal, o padrão IEC 61850 define valores de precisão para sincronismo dos relógios de IEDs. A variação é entre 1 e  $25\mu\text{s}$  dependendo da classe de desempenho.



dispositivos e aplicações do sistema supervisor. Este protocolo foi especificado em dois *profiles*, a saber: ISO/IEC 9506-1 (ISO, 2003a) e ISO/IEC 9506-2 (ISO, 2003b).

Basicamente, o MMS lê/escreve parâmetros de/em equipamentos, em um modo baseado em objetos, e a comunicação segue a abordagem cliente/servidor. Para acessar dispositivos conectados a rede e associar diferentes tipos de informações a um dispositivo virtual denominado *Virtual Manufacturing Device* (VMD) (SORENSEN; JAATUN, 2007). Uma representação de como o VMD encapsula objetos do mundo real (dados e dispositivos reais) em objetos acessíveis para aplicações MMS, é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Encapsulamento de dados e dispositivos reais em objetos VMD.



Fonte: (SCHWARZ, 2008)

De acordo com a ISO/IEC 9506-2, mensagens MMS são especificadas pela sintaxe abstrata *Abstract Syntax Notation 1* (ASN.1), que fornece as regras sintáticas de codificação e decodificação do protocolo MMS. ASN.1 flexibiliza a formatação de mensagens, pois a aplicação passa a manipular estruturas abstratas de dados e não fica dependente de formatos fixos de mensagens (FALK; BURNS, 1997).

Dentro de subestações, informações de/para dispositivos são reunidas num concentrador, *Remote Terminal Unit* (RTU), que interfaceia com sistemas SCADA, nos quais informações são analisadas por operadores do sistema supervisor. Em geral, MMS é utilizado por aplicações que não possuem restrições temporais rígidas, de forma que a infraestrutura de comunicação, geralmente, é TCP/IP. Por outro lado, melhorias em tempos de resposta implicam em maior eficiência nas comunicações com a central de operações do sistema.

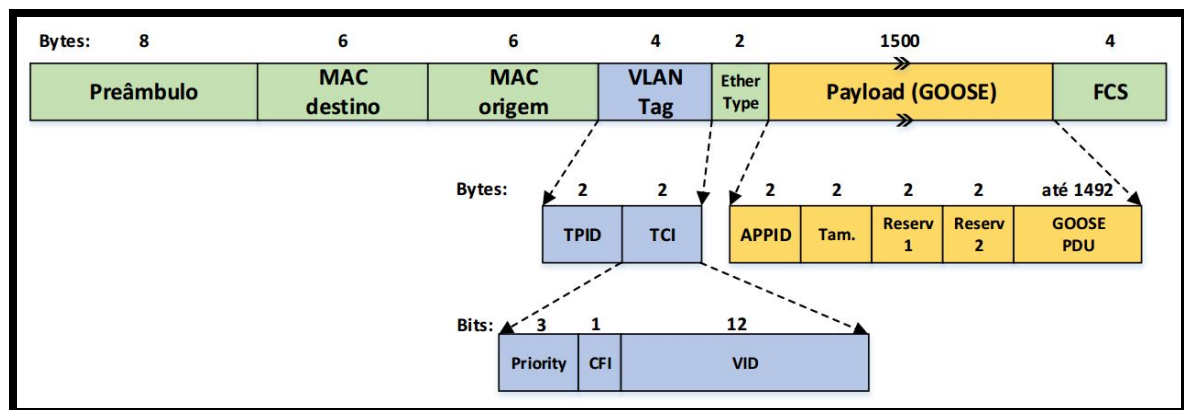


### 2.2.5.2 GOOSE – Padrão IEC 61850-8-1

GOOSE, diferentemente do protocolo MMS, tipicamente utiliza comunicação *multicast* para a troca de informações entre IEDs de uma subestação. Mensagens GOOSE são transportadas como *payload* de *frames* Ethernet. Como o protocolo Ethernet é não-confiável (i.e., não tem *Ack*), GOOSE inicia a transmissão pelo envio sucessivo de mensagens de *status*. Quando algum evento é detectado, são enviadas mensagens para acionamento dos dispositivos de proteção, os possíveis erros de transmissão são contornados pelo envio de mensagens sucessivas até que o IED perceba que o sistema voltou ao *status* de normalidade.

O padrão IEC 61850-8-1 especifica o formato do quadro Ethernet para mensagens GOOSE, bem como especifica a *Protocol Data Unit* (PDU) GOOSE. A Figura 15 apresenta o formato GOOSE e o quadro Ethernet.

Figura 15 – Estrutura do quadro Ethernet para mensagens GOOSE.



As descrições detalhadas de cada campo e os valores atribuídos a eles encontram-se no padrão IEC 61850-8-1 (IEC, 2004b). A VLAN Tag, definida no padrão IEEE 802.1Q, é separada em dois campos *Tag Protocol Identifier* (TPID) e *Tag Control Information* (TCI). O TPID indica o Ether type atribuído para os quadros IEEE 802.1Q e seu valor deve ser 0x8100. O TCI é dividido em três campos:

- **Priority:** para mensagens GOOSE o valor é zero, para mensagens de baixa prioridade, ou 4, para mensagens de alta prioridade. Observe-se que apenas um nível de prioridade é usado durante uma transferência de mensagens GOOSE.
- **Canonical Format Indicator (CFI):** indica o formato canônico para o endereço MAC, sendo que o valor é zero para GOOSE.
- **VLAN Identifier (VID):** identificador da VLAN, caso nenhuma VLAN seja configurada o valor é zero.

Para mensagens GOOSE, o conteúdo do campo Ethertype é 0x88B8 e o campo *Application Identifier* (APPID) recebe o valor 00. O campo APPID é usado para distinguir mensagens GOOSE (valor 00) e SV (valor 01). O campo "Tamanho" (Tam.) define o número de octetos, incluindo APPID e GOOSE-PDU, sendo que este último não deve ultrapassar 1492 bytes. Os campos "Reserv1" e "Reserv2" são reservados para futuras aplicações, sendo que por enquanto devem conter o valor zero. A faixa de endereços *multicast* recomendada para o GOOSE vai de 01:0C:CD:01:00:00 até 01:0C:CD:01:01:FF.

### 2.2.5.3 SV – Padrão IEC 61850-9-2

O padrão SV é especificado pelo padrão IEC 61850-9-2 e é destinado a transportar informações sobre medições de equipamentos no nível de processo. SV se propõe a substituir a malha de conexões físicas, necessárias para se obter valores de transdutores. Um nó SV é conectado por um único cabo ao barramento Ethernet. Um dispositivo conhecido por *Merging Unit* mede dados analógicos e os converte para dados digitais, que os envia por meio de mensagens SV para o sistema de proteção no nível de Vão.

Ao contrário do que acontece com o GOOSE, mensagens SV não são retransmitidas, tendo em vista que não se tratam de informações críticas para o sistema. A estrutura do quadro Ethernet para mensagens SV é a mesma usada para o GOOSE, alterando apenas o Ethertype para 0x88BA e o APPID para o valor 01. A faixa de endereços *multicast* recomendada para o SV vai de 01:0C:CD:04:00:00 até 01:0C:CD:04:01:FF (IEC, 2004c).

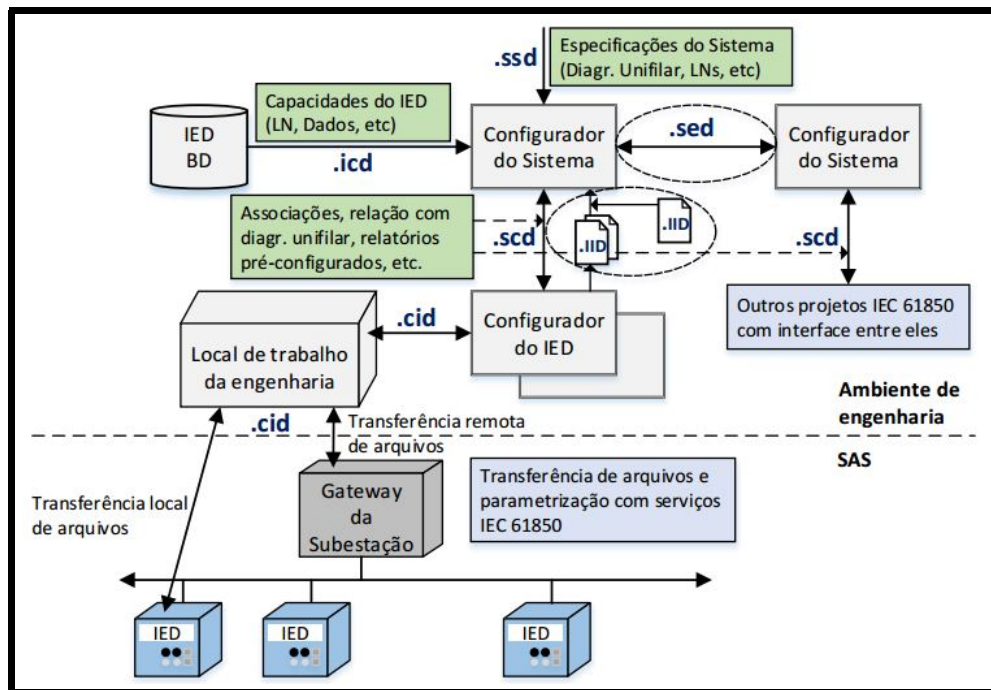
### 2.2.5.4 SCL – Padrão IEC 61850-6

A linguagem SCL (*Substation Configuration Language*) (IEC, 2004a), descreve os parâmetros de IEDs e sistemas de configuração, em conformidade com as especificações IEC 61850-5 e IEC 61850-7-x. A linguagem de configuração é baseada em *Extensible Markup Language* (XML) versão 1.0.

Configurações e procedimentos de subestações passam pelo processo de engenharia, que define as configurações de dispositivos bem como a alocação de funcionalidades para IEDs pré-configurados. Cada subestação tem uma configuração de inicialização (*bootstrap*) e as inferências em cada dispositivo são realizadas de acordo com dinamismo de funcionamento do sistema elétrico, em conformidade com padrões utilizados e normas definidas pela gerência da subestação. A Figura 16 apresenta um modelo que descreve o fluxo de informações na subestação usando arquivos SCL.

Inicialmente, especificações de funcionamento de subestações (diagrama unifilar, LNs etc) são entregues para configuração do sistema usando o formato *System Specification Description* (.ssd). Essa configuração é feita com uma ferramenta (configurador) capaz de importar e exportar arquivos de configuração da subestação. Ainda ao configurador do sistema são encaminhados arquivos, de uma base de dados, contendo informações sobre

Figura 16 – Modelo de referência para o fluxo de informação SCL.



Fonte: (IEC, 2009)

IEDs conectados a rede. O tipo de arquivo utilizado para este fim é o *IED Capability Description* (.icd).

Informações recebidas pelo configurador do sistema são agrupadas e encaminhadas ao configurador de IEDs usando o formato *Substation Configuration Description* (.scd). O configurador de IEDs é responsável por trocar informações com a equipe de engenharia através de arquivos específicos para configuração de IEDs, e estes arquivos têm o formato *Configured IED Description* (.cid).

O relatório técnico IEC 61850-90-2 (IEC, 2015) trouxe adendos ao IEC 61850-6 de forma a incorporar a comunicação entre subestações e centros de controle. Na Figura 16, os configuradores do sistema de subestações distintas trocam informações entre si, o formato de arquivo usado é o *System Exchange Description* (.sed). Geralmente estas informações são relativas a teleproteção, mas outras especificações de interface podem ser usadas.

Em complemento, o IEC 61850-90-2 apresenta o conceito de um arquivo *Instantiated IED Description* (.iid) com regras bem definidas, que permite fazer alterações em um IED específico já integrado em um sistema. Estas configurações podem ser feitas dentro da própria subestação ou através da central de controle remota, que utiliza o gateway da subestação para a transferência dos arquivos.

### 2.2.6 IEC 61850: Comunicações externas a subestações

A primeira edição do padrão IEC 61850 apresentou o estado da arte para o SAS. O título principal de todos os documentos nesta edição é: "Sistemas e redes de comunicação em subestações" (*Communication networks and systems in substations*). A partir de 2009, os trabalhos de padronização foram estendidos para a parte externa das subestações passando a incluir, por exemplo, DER, usinas hidrelétricas, usinas eólicas, veículos elétricos, etc. Em 2012, a segunda edição deste padrão foi enfim publicada e o novo título passou a ser: "Sistemas e redes de comunicação para automação de companhias elétricas" (*Communication networks and systems for power utility automation*) (SCHOSSIG, 2012).

Os principais documentos IEC 61850 usados neste trabalho, servindo como base da comunicação externa à subestação são:

- IEC 61850-90-1 (IEC, 2009), primeiro relatório técnico com aspectos importantes para a definição da troca de informações entre subestações;
- IEC 61850-90-2 (IEC, 2015), relatório técnico complementar ao IEC 61850-90-1, incorporando a comunicação entre os centros de controle e subestações;
- IEC 61850-90-5 (IEC, 2011), relatório técnico que trata das comunicações envolvendo PMUs, PDCs, WAMPAC e aplicações de centros de controle, sendo que o documento inclui, ainda, informações sobre o roteamento de pacotes GOOSE e SV na rede WAN.

#### 2.2.6.1 Sincrofasores

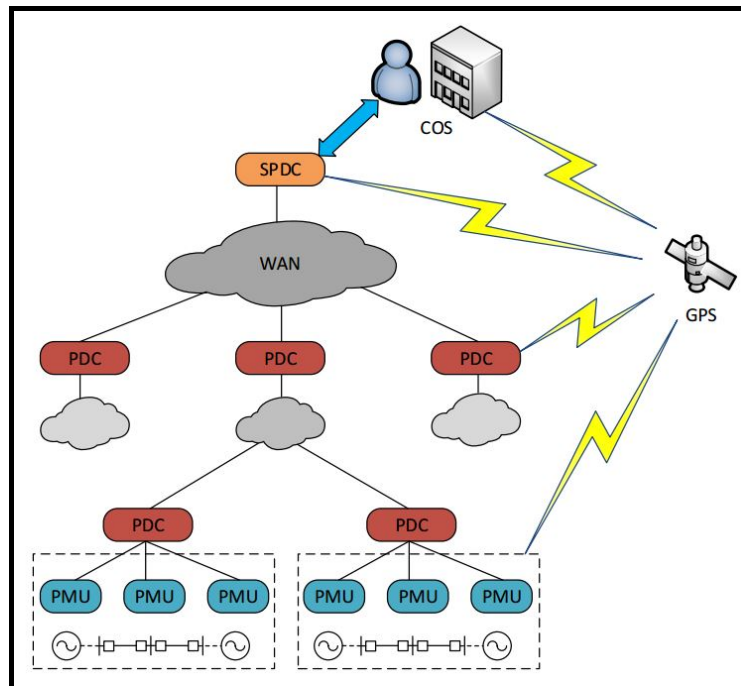
De forma geral, Sincrofasores, ou PMUs, são dispositivos que colocam grandezas medidas de qualquer parte da rede elétrica em uma mesma base de tempo absoluto, permitindo que as medições sejam comparadas de forma eficiente. Isso é feito incluindo um *timestamp* para que haja correlação de valores medidos em diferentes locais, com os valores que chegam ao ponto de coleta em instantes também diferentes (BUSH, 2014).

Esta técnica é usada para visualizar o sistema de energia de forma mais holística e para comparar, com precisão, medidas de diferentes pontos espaçados no tempo. O advento do *Global Positioning System* (GPS) e a precisão com que ele fornece o tempo, permitem que sincrofasores sejam amplamente implantados ao longo de redes elétricas.

PMUs são conectados a uma hierarquia de PDCs, que concentram medições realizadas em determinada área. No final, os dados são entregues a operadores de centrais de controle para análises e acionamentos necessários. Medições são enviadas em cadeias de dados, com uma frequência que varia de 30 a 120 amostras por segundo, dependendo da rede ao qual o PMU está conectado. Grandes centros de controle precisam receber

informações de todas as áreas de forma organizada e de acordo com as aplicações utilizadas. Superconcentradores, SPDCs, são colocados na rede para concentrar os maiores fluxos de dados. A função do sistema de comunicação é prover a interligação entre todos os elementos da rede, considerando diferentes infraestruturas de comunicação, com taxas de transmissão e amostragens também diferentes. A Figura 17 mostra o modelo de comunicação envolvendo PMUs e concentradores.

Figura 17 – Modelo de comunicação envolvendo Sincrofasores.



A comunicação entre PMUs é tipicamente *multicast*, funcionando sobre uma infraestrutura de rede baseada em TCP/IP. O IP-multicast não é trivial neste tipo de conexão, tendo em vista que os dispositivos (PMUs) não possuem suporte ao endereçamento multigrupo. Outro inconveniente que precisa ser tratado é a questão de diferentes taxas de transmissão na rede (*multi-rate*), cujas soluções atuais consistem no envio de pacotes na maior taxa, neste caso os descartes são inevitáveis, ou na criação de árvores *multicast* para cada taxa, o que compromete a eficiência da rede. Finalmente, uma questão inerente ao processo de comunicação está na obrigatoriedade do uso de PDCs, de forma que todas as informações passam por eles, deste modo, o posicionamento destes dispositivos pode comprometer a escolha de rotas mais convenientes, causando latência e *jitter* em transmissões (GOODNEY et al., 2013).

Finalmente, uma questão inerente ao processo de comunicação está na obrigatoriedade do uso dos PDCs, de forma que todas as informações passam por eles para serem ordenadas e agrupadas antes de serem encaminhadas para o sistema supervisor. O posicionamento geográfico destes dispositivos pode comprometer a escolha de rotas mais

convenientes, causando latência e *jitter* à transmissão (GOODNEY et al., 2013).

## 2.3 Trabalhos Relacionados

Embora haja um grande potencial de interoperabilidade com o uso do IEC 61850, ainda é preciso buscar mecanismos de gerenciamento e controle para a quantidade de dados que circulam pela rede. Uma barreira encontrada pelas centrais de controle e operação é a dificuldade em lidar com este grande volume de informações que seriam possíveis pelo uso intensivo do padrão IEC 61850. O que se observa é que, de uma forma geral, grandes empresas do setor energético mantêm grande parte de seus sistemas de comunicação usando os mesmos mecanismos há várias décadas. As informações mais importantes são analisadas pelos operadores da central de controle, não obstante, a presença humana nos diversos setores do sistema elétrico continua sendo imprescindível.

Ainda assim, a inserção de recursos de *Smart Grid* é algo que parece inevitável, porém, isto tem sido feito de forma lenta e gradual em vários países, inclusive no sistema elétrico brasileiro. A expectativa é que estes recursos sejam cada vez mais utilizados até atingirem a automatização em todos os setores do *grid*. Pesquisas nesta área permitem que seja traçado um panorama para o futuro das *Smart Grids* e os caminhos a serem percorridos até lá. Na sequência serão apontados os principais trabalhos de pesquisa relacionados a propostas da arquitetura ETArch-SG:

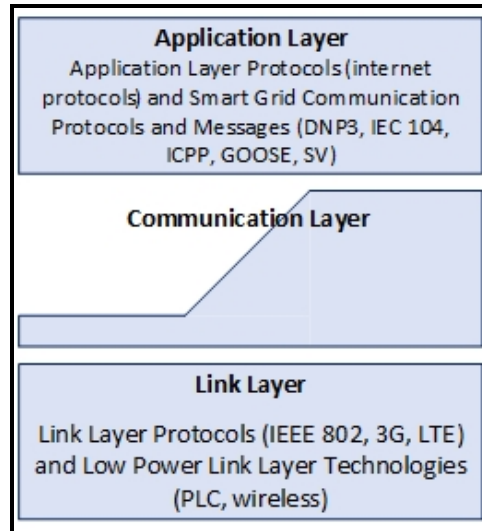
- 1) *Entity Title Architecture (ETArch)*: Em 2011, o modelo de referência *Entity Title Model* (PEREIRA et al., 2011) foi apresentado pela primeira vez, modelo este que trouxe uma visão sobre como uma entidade pode descrever, semanticamente, os requisitos necessários para comunicação. Uma arquitetura de referência para este modelo foi proposta em (SILVA, 2013) e recebeu o nome de ETArch (*Entity Title Architecture*), esta arquitetura se diferencia de outras tradicionais por lidar com um modelo de camadas flexível, cujo tamanho varia em função de como a camada de aplicação se relaciona com a camada de enlace, esta flexibilidade pode ser observada na Figura 18, assim como alguns indícios de como os componentes de *Smart Grid* se encaixam no modelo.

A camada Comunicação possui uma representação não usual, refletindo a capacidade de se ajustar à complexidade dependente dos requisitos impostos pela aplicação, sendo que esta capacidade inexistente na arquitetura Internet.

Para explicar o funcionamento da ETArch é preciso detalhar alguns dos seus principais conceitos (SILVA et al., 2012b):

- Entidade: é o elemento fundamental da arquitetura, o qual possui requisitos e capacidades de comunicação que podem ser semanticamente compreendidos em

Figura 18 – Camadas definidas pela ETArch.

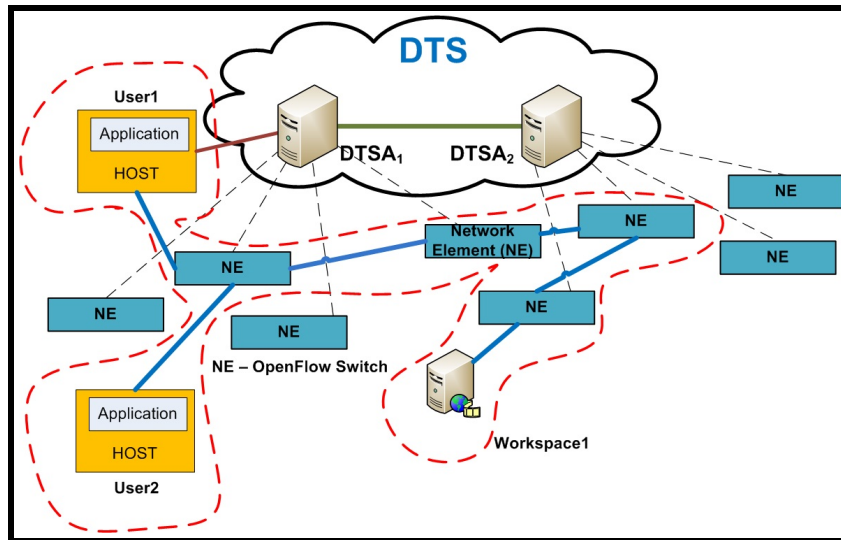


todas as camadas do modelo de rede. Exemplos de entidades: uma aplicação, um serviço, um usuário, um relé, um transformador etc;

- **Título**: identifica uma entidade de forma única e não ambígua e independente da topologia e da natureza dos meios de comunicação.
- **Domain Title Service (DTS)**: é a parte do modelo que lida com todos os aspectos de controle da rede. Possui um conjunto de agentes interconectados denominados *Domain Title Service Agents* (DTSA), cuja filosofia está alinhada às definições das redes definidas por software. Os elementos de conexão da rede são controlados pelos DTSA's, cujo comportamento (do elemento de rede) pode ser alterado em tempo real para atender a variação de requisitos;
- **Workspace**: é um barramento lógico, que independe da topologia e da natureza do meio, capaz de promover naturalmente a comunicação *multicast* e mobilidade de entidades. Este barramento lógico é capaz de prover capacidades de comunicações a duas ou mais entidades.

A Figura 19 apresenta os principais componentes da arquitetura ETArch, onde algumas Entidades (hosts) estão associadas com um exemplo de *Workspace*. Um *Workspace* é criado sempre que uma entidade precisa se comunicar, por algum propósito específico, que pode ser uma necessidade definida pelo usuário, por exemplo, uma transferência de arquivos para configuração de dispositivos, ou ainda uma ação automatizada, como eventos acionados por sensores, por exemplo. Antes do início da comunicação, as entidades devem definir quais os requisitos que devem ser atendidos para que a comunicação seja aceita. É neste momento que a eficiência energética, por exemplo, pode ser proposta como um dos elementos decisórios na criação do *Workspace*.

Figura 19 – Principais componentes do ETArch dentro de um *workspace*.



Fonte: (SILVA et al., 2012b)

O que chama atenção é a diferença em relação a protocolos de redes tradicionais onde a localização ou endereço fixo (IP) é a peça chave do processo de comunicação. No caso do endereçamento baseado em títulos o que importa é o conteúdo que se pretende utilizar, independente de sua localização. Usando o conceito de *workspace*, é o conteúdo que serve como referência de conexão, onde quer que ele esteja, podendo inclusive ser obtido de forma conjunta por mais de uma fonte, e ainda com a possibilidade de escolher esta fonte tendo como base diferentes requisitos de conexão: maior confiabilidade, priorização de pacotes, fonte com maior segurança ou ainda, em termos de eficiência energética, conectar-se a fonte que proporcionar a maior economia de energia.

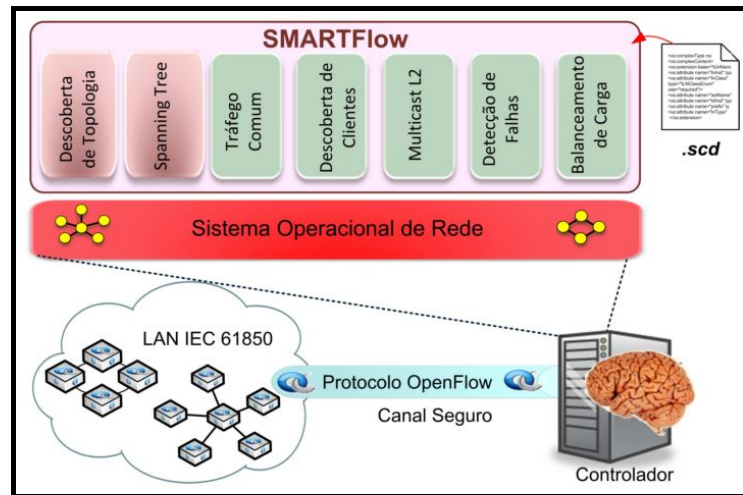
O processo evolutivo da ETArch trouxe contribuições nas seguintes áreas: (1) comunicação *multicast* (GONÇALVES et al., ; SILVA et al., 2012a); (2) mobilidade (GUIMARÃES et al., 2014); (3) QoS (LEMA, 2014); (4) segurança (MELO, 2017). Atualmente a arquitetura passa por transformações e caminha para uma nova versão para atender a outros requisitos de aplicações e também para suportar comunicações com outras áreas, tais como *Smart Grids* (DIAS et al., 2018).

- 2) Em (LOPES, 2013), a autora descreve o "SisteMa Autoconfigurável para Redes de Telecomunicações (SMARTFlow)", um controlador (OpenFlow) que se propõe a garantir granularidade e flexibilidade ao fluxo de dados dentro de uma subestação. O SMARTFlow apresentou quatro propostas importantes: (1) realizar a configuração inicial da rede da subestação usando arquivos SCL; (2) criar árvores multicast para gerenciamento do tráfego de dados para mensagens GOOSE e SV; (3) definir um método para recuperação de falhas e diminuir as redundâncias da rede; (4) definir prioridades em diferentes níveis de tráfego. O SMARTFlow foi implementado no



controlador OpenFlow POX, usando a linguagem Phyton para a escrita dos elementos que compõem sua arquitetura. A Figura 20 mostra a estrutura do SMARTFlow composta por um conjunto de aplicações de controle para redes de subestações baseadas em IEC 61850.

Figura 20 – Arquitetura do SMARTFlow.



Fonte: (LOPES; FERNANDES; MALCHER, 2014)

Os resultados dos testes com o SMARTFlow, usando o MININET para configuração da rede e um emulador de pacotes IEC 61850, apontam para uma redução de até 20 vezes no atraso em redes controladas pelo OpenFlow e uma diminuição de 44% da carga comparada ao uso de switches convencionais. O trabalho também apresenta uma comparação entre a solução *multicast* proposta e o uso de filtros *multicast* como o *GARP Multicast Registration Protocol* (GMRP) (GARP é o acrônimo para Generic Attribute Registration Protocol), que apresenta restrições por não poder ser implementado nos IEDs (LOPES, 2013).

Todos os cenários utilizados no SMARTFlow são limitados ao ambiente local das subestações, onde a rede é predominantemente Ethernet, ou seja, não foram abordadas as comunicações com a rede WAN nem as trocas de mensagens entre as subestações. Dentro da subestação, somente as mensagens GOOSE e SV foram abordadas, de fato o MMS não foi utilizado nesse trabalho.

- 3) Augusto Neto et al. propôs o *Session-Oriented Communication System* (SOCSys) (NETO et al., 2011), um sistema que utiliza os recursos de uma rede M-Mesh e aspectos de QoS relacionados ao protocolo IEEE 802.11e, para oferecer suporte a comunicações em *Smart Grids*. O artigo considera a heterogeneidade dos sistemas de comunicação para propor um mecanismo de controle baseado em sessão, no qual é possível separar diferentes tipos de tráfego de acordo com um esquema do tipo *publish/subscriber*, onde uma aplicação se inscreve para obter o conteúdo gerado por IEDs dos quais ela tem interesse.

Considerando diferentes categorias de acesso, baseadas nas classes de serviço do padrão IEEE 802.11e, foram realizados experimentos para comparar o desempenho, em termos de vazão, entre sistemas configurados de forma regular e o SOCSys. O ambiente experimental foi configurado para submeter os fluxos de dados em uma rede com alto nível de congestionamento. Os resultados mostraram um ganho de 70% na utilização de largura de banda ao se usar o SOCSys. Também foram realizados testes para comprovar a redução dos atrasos na rede e a consequente melhoria de *Quality of Experience* (QoE) em transmissões multimídia pela rede.

Um mecanismo de controle, *Session-Aware Control* (SAC), garante a interoperabilidade entre diversos padrões como: DNP3, IEEE C37.117 e IEC 61850. Tendo em vista que um dos principais desafios da comunicação nas *Smart Grids* é a necessidade de envolver diferentes tecnologias de enlace, a fim de atender a requisitos de QoS compatíveis com a diversidade de dispositivos e as condições geográficas das subestações, seria importante testar o comportamento do SOCSys utilizando interfaces de conexão cabeadas ou mesmo em tecnologias *wireless* diferentes de uma topologia mesh.

- 4) Cahn, Adam et. al. (CAHN et al., 2013) apresentou o protótipo de uma arquitetura, chamada *Software-Defined Energy Communication Networks* (SDECN), para configuração de IEDs usando um controlador SDN (Ryu). Embora tenha sido usado um emulador para geração de mensagens e um ambiente MININET para os switches SDN, os IEDs testados foram equipamentos reais.

O artigo relata resultados de latência próximos de 4ms no encaminhamento de mensagens para configuração dos IEDs usando o controlador OpenFlow, este valor está bem abaixo dos valores obtidos a partir de testes onde foram usados os mesmos procedimentos em switches ethernet comuns. Os encaminhamentos multicast também foram testados sem que fosse necessário a configuração de VLAN's para cada fluxo.

Embora não seja explícito qual tipo de mensagem foi gerada pelo emulador e os experimentos tenham ficado restritos a configuração de IEDs na rede, o trabalho trouxe uma contribuição importante para a perspectiva de automatização de processos na subestação, de forma mais eficiente que o modelo convencional, e com benefícios para otimização da carga de trabalho dos operadores da rede. Este deve ser o primeiro passo para a virtualização do *grid*, permitindo a incorporação de tecnologias comuns aos data centers para automatizar outros tipos de serviços.

- 5) Em (DONG et al., 2015), os autores apresentaram um *position paper* para discutir as oportunidades de aplicação do SDN em termos de resiliência da *Smart Grid* e os desafios relacionados a segurança do *grid*. O escopo desta discussão é a comunicação fora da subestação envolvendo PMUs, onde o paradigma IP não é adequado para

o restabelecimento da rede, após a ocorrência de incidentes indesejáveis, tão rápido quanto seria necessário.

Três questões permeiam as principais abordagens do artigo: (1) a habilidade com que o SDN pode configurar dinamicamente a rede e melhorar a resiliência; (2) os riscos que o SDN pode trazer para *Smart Grids*, basicamente as vulnerabilidades no software do plano de controle e a possibilidade de ataques *Deny Of Service* (DOS) à central de controle; (3) a criação de um ambiente de testes para validação da proposta.

Segundo os autores, ao lançar mão de todas as funcionalidades do plano de controle, o SDN pode ser usado para implementar um monitoramento da rede com grande alcance e granularidade, desta forma o controlador pode ser configurado para resetar ou restabelecer o funcionamento de uma rede.

O ambiente de testes proposto utilizou o MININET para emular o controlador SDN e uma ferramenta, chamada PowerWorld<sup>4</sup>, para simular os aspectos físicos do sistema de potência. Os resultados dos aspectos de segurança foram apresentados em um artigo complementar (GHOSH et al., 2016), onde se destaca como as falhas nos controladores SDN podem impactar nos atrasos da comunicação em *Smart Grids*.

O modelo usado para o ambiente de testes procurou ajustar-se ao máximo para proporcionar uma aproximação mais realista com o ambiente real da rede. A ferramenta utilizada para simulação do *grid*, PowerGrid, fornece várias opções para geração de diferentes cenários de um sistema elétrico de potência. Todavia, as mensagens no nível de aplicação não são geradas em diferentes formatos, para testes envolvendo o padrão IEC 61850, por exemplo, seria necessário construir um *parser* para cada tipo de mensagem (GOOSE, SV ou MMS). Neste artigo, todos os cenários propostos para simulação devem, obrigatoriamente, usar um *parser* que foi codificado em Phyton, unicamente para mensagens DNP3.

- 6) Em (DORSCH et al., 2014), Dorsch, Nils et al. apresentam uma análise do uso de um controlador SDN no atendimento dos requisitos de comunicação dos sistemas de transmissão e distribuição do SEP.

Para verificação das considerações realizadas, o artigo propôs a criação de um ambiente de testes para simulação em dois cenários: (1) Restabelecimento rápido da comunicação na SG; e (2) Garantia de QoS. O ambiente de testes contou com o uso de switches reais (não virtualizados) e computadores, onde foram instalados o controlador OpenFlow Beacon e o gerador de tráfego.

No cenário (1), foi criado um algoritmo para cálculo de rotas alternativas em caso de falhas. Os testes foram feitos usando mensagens MMS e SV e os resultados

---

<sup>4</sup> <https://www.powerworld.com/>

mostraram que a resiliência da rede é mais eficiente com o uso do controlador SDN do que quando comparada com outros protocolos como Open Shortest Path First (OSPF) e MPLS.

No cenário (2), foram apresentadas duas propostas para garantia de QoS, seguindo as recomendações do padrão IEC 61850 para largura de banda e máxima latência, em diferentes tipos de serviços executados no *grid*. A primeira proposta considerou o uso de reserva de banda para serviços de tempo crítico, enquanto a segunda proposta considerou o uso de link dedicado para o mesmo tipo de serviços. As duas abordagens de QoS foram avaliadas inserindo sucessivos fluxos de tráfego. Os resultados obtidos não violaram os limites recomendados pelo padrão IEC 61850.

Uma combinação das abordagens de QoS e recuperação rápida podem tornar desnecessários os links de backup dedicados que hoje são utilizados.

7) Uma arquitetura de alcance global dentro da *Smart Grid*, também baseada em SDN, foi proposta em (JARARWEH et al., 2015). Os autores apresentaram um modelo em quatro camadas:

- camada de Ativos (*Assets layer*): representa o *grid* como um todo, contendo os recursos de geração de energia, recursos de armazenamento e recursos de consumo;
- camada de Sensoriamento (*Sensing layer*): representa o monitoramento de todos os dispositivos que fornecem algum tipo de valor a ser medido ou a ser acionado (PMUs, IEDs, RTUs, sensores etc);
- camada de Controle (*Control layer*): representa a parte principal do modelo onde todas as transações de controle e gerenciamento são realizadas. Todos os controladores aqui propostos são baseados em software;
- camada de Aplicação (*Application layer*): representa a parte que é visível ao usuário final para acesso a informações das camadas subjacentes.

O artigo traz uma importante contribuição ao descrever, de forma geral, como poderia ser construído um controlador para funcionar como um *middleware* centralizado para acesso a todos os níveis do *grid*, abrindo possibilidades para continuidade do trabalho onde a ETArch-SG pode ser estendida por outras áreas do sistema elétrico de potência. Embora haja promessas para validação da proposta através de experimentos, até o momento desta escrita, não foi encontrado nenhum trabalho disponível a este respeito.

8) Em (GOODNEY et al., 2013) foi apresentada uma proposta de aplicação do SDN na comunicação envolvendo Sincrofasores. Nesta proposta os PDCs são substituídos por controladores SDN capazes de calcular o melhor caminho em termos de

roteamento utilizando parâmetros baseados em QoS. Usando uma rede baseada em SDN, o trabalho mostrou como criar uma estratégia para comunicação *multicast* e *multi-rate*, sem a necessidade de múltiplas cópias do mesmo pacote no enlace e sem exigir mudanças para que os PMUs tenham suporte ao endereçamento *multicast*.

Num primeiro experimento, o ambiente de testes criado para validação da proposta usou um conjunto de *softswitches*<sup>5</sup> e o controlador OpenFlow NOX. Os dados foram gerados com base nos pacotes C37.118, um precursor do IEC 61850, a uma taxa de 120 pacotes por segundo, para verificação das operações com *multi-rate*. Os resultados mostraram o número de pacotes transmitidos e recebidos entre as interfaces dos switches correspondendo a utilização ótima da rede.

O segundo experimento realizado utilizou configurações para simulação de comutação baseada em software e hardware e comparou os resultados com o *middleware* GridStat. Os resultados obtidos mostraram ganhos da ordem de 15 vezes em termos de diminuição da latência para o ambiente de rede proposto.

Todos os trabalhos supracitados apresentam importantes contribuições para o futuro dos sistemas de comunicação em *Smart Grids*. Todavia, a ETArch-SG é a única proposta que, até onde se sabe, apresenta uma solução para a comunicação envolvendo todos os tipos de mensagens recomendados pelo padrão IEC 61850, visando atender aos requisitos da comunicação no ambiente da subestação e também a comunicação entre dispositivos que coletam informações das linhas de transmissão localizadas na parte externa das subestações.

---

<sup>5</sup> <http://www.openvswitch.org>



---

## Arquitetura ETArch-SG

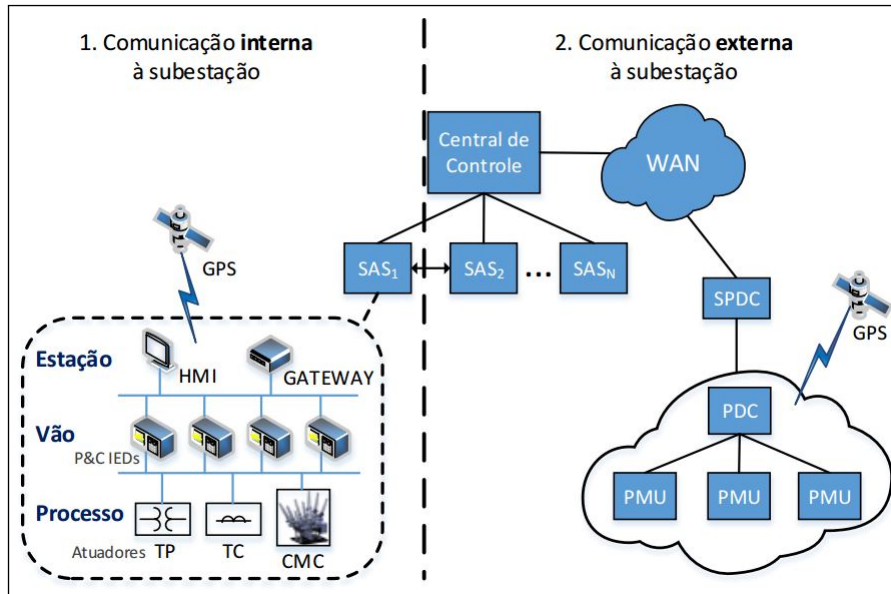
A hipótese deste trabalho é que a utilização da arquitetura ETArch-SG pode melhorar a gerência e a operação de dispositivos eletrônicos inteligentes em um ambiente SAS. O suporte a transmissão naturalmente *Multicast* entre Centrais de Controle e dispositivos do tipo PMU, de forma mais eficiente do que o IP-*Multicast* atualmente em uso e sem a necessidade de concentradores (PDC e SPDC), torna ETArch-SG uma arquitetura atraente para *Smart Grids*. A camada de aplicação da presente proposta foi desenvolvida para suportar o padrão IEC 61850.

A arquitetura ETArch-SG foi projetada para atender os requisitos de comunicações de Subestações tanto (i) Internos quanto (ii) Externos, representados na Figura 21. Para tanto, são apresentados experimentos que foram planejados para provar a hipótese e demonstrar o alcance dos objetivos deste trabalho. Foram desenvolvidos protótipos, em ambiente virtualizado, para suportar as conexões de dispositivos e aplicações de uma *Smart Grid* utilizando a arquitetura ETArch-SG.

A configuração dos equipamentos, que farão parte de um ou mais cenários de comunicação dentro da *Smart Grid*, deve ser realizada de acordo com políticas definidas pela gerência de cada sistema elétrico de potência, sendo que políticas propriamente ditas fogem do escopo deste trabalho e, portanto, os conteúdos das mensagens não são relevantes. Apenas o desempenho do processo de comunicação será considerado para fins de análise. Dispositivos baseados em IEC 61850 são configuráveis por meio da linguagem SCL (IEC, 2004b), respeitando as características técnicas definidas pelos fabricantes destes equipamentos.

Tarefas relacionadas a configuração de equipamentos, assim como vários procedimentos operacionais internos a subestações, não são automatizados, ou seja, técnicos da companhia elétrica devem configurar cada dispositivo *in loco*, após receberem os arquivos de configuração, previamente ajustados pela equipe de engenharia, conforme as definições de estratégia operacional da própria empresa. Diante disso, a primeira proposta é a criação da figura do SUPERVISOR, uma entidade central no processo de comunicação entre

Figura 21 – Definição do escopo do trabalho.



operadores, que monitoram a rede através de alertas e informações representadas num quadro sinóptico, e dispositivos inteligentes, conectados ao *grid* de energia.

De forma geral, tarefas tais como configuração inicial de dispositivos, reinicialização da configuração em casos de falhas, registro de informações para realização de *analytics* etc, podem ser feitas automaticamente pelo SUPERVISOR. Do mesmo modo, ações sob demanda, que não são tarefas automatizadas, como, por exemplo, a verificação de medições aferidas ao nível de processo da subestação, acionamento de relés, entre outras, podem ser solicitadas por operadores com acesso ao sistema supervisorio da rede.

Uma visão funcional do SUPERVISOR é mostrada na Figura 22. Neste caso a proposta é utilizar o *Java APIs for Integrated Networks - Service Logic Execution Environment* (JAIN SLEE) (PONT; PUJOLLE; RAGHAVAN, 2010), que define um servidor de aplicações relacionado a sistemas de telecomunicações, implementado através de uma plataforma *open source* chamada Mobicents. Esta plataforma define dois tipos de artefatos:

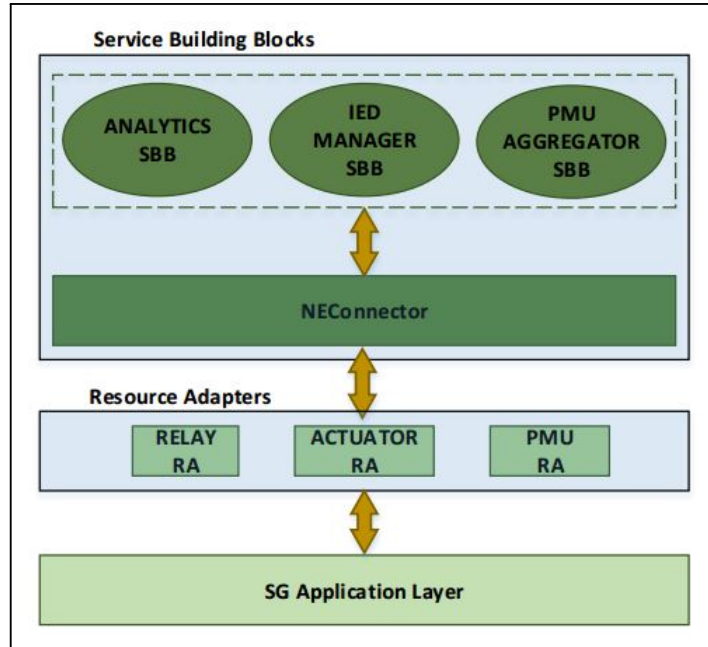
- *Resource Adaptors* (RA): responsáveis por abstraírem detalhes de baixo nível associados a comunicações com recursos existentes, tais como interfaces de dispositivos da *Smart Grid* (relés, atuadores, PMUs etc); e
- *Service Building Blocks* (SBB): que são artefatos de mais alto nível responsáveis por implementar a lógica de negócio.

Dados obtidos por diversos RAs podem ser combinados em um SBB para desempenhar um determinado serviço, por exemplo, fazer um *analytics* a partir de dados coletados



por RAs. Uma outra possibilidade é um SBB que faça a ordenação de dados obtidos por RAs associados a PMUs, que é uma tarefa de AGREGADOR apresentado na seção 3.5.

Figura 22 – Modelo funcional do SUPERVISOR.

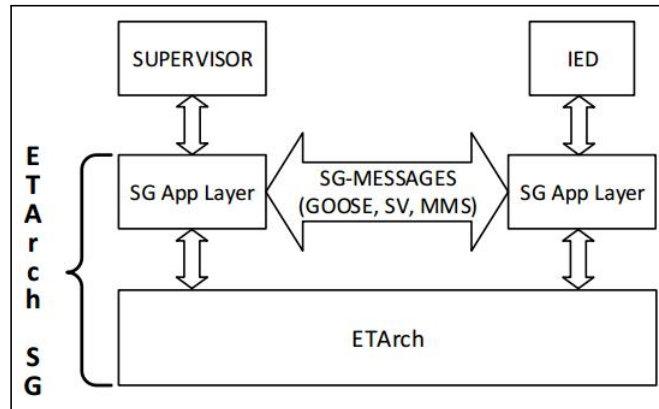


A ETArch-SG define um conjunto de serviços pertinentes ao contexto de *Smart Grid*. Tarefas exclusivas ao plano de controle da arquitetura ETArch, como por exemplo o registro de uma entidade no DTSA, devem ser transparentes à ETArch-SG. A Figura 23 apresenta a estrutura de comunicação usada por entidades da ETArch-SG, considerando os diferentes tipos de mensagem no contexto da *Smart Grid*. O registro de Entidades da ETArch-SG é realizado no DTSA da arquitetura ETArch, por meio do protocolo *Entity Title Control Protocol* (ETCP) (SILVA, 2013), assim como a criação de *Workspaces*. A camada de Aplicação da ETArch-SG (*ETArch-SG Application Layer*) fornece uma interface para execução dos serviços realizados no plano de controle da arquitetura ETArch, sendo tais serviços transparentes a entidades da ETArch-SG.

Usando um diagrama de ordem temporal, a comunicação, entre entidades dos tipos IED e SUPERVISOR, pode ser vista na Figura 24. O registro do IED no DTSA e o *attachment* desta entidade no *workspace* são serviços da arquitetura ETArch, representados por linhas verdes no diagrama. Uma vez concluídos estes serviços, as entidades SG iniciam a solicitação de serviços pertinentes a *Smart Grid*, representadas na figura como SG-MESSAGE para efeito de simplificação (linha preta). Estas mensagens serão nomeadas adequadamente dentro dos contextos de comunicação apresentados nas próximas sessões, de forma que o tipo da mensagem (GOOSE, SV e MMS) será utilizado como identificador.

A Figura 25 mostra a relação de comunicação entre o DTSA e as entidades SUPER-

Figura 23 – Interfaces de comunicação entre as arquiteturas ETArch-SG e ETArch.



VISOR e IED. Observe-se que estas entidades precisam trocar primitivas no plano de controle ETArch, e o fazem com o DTSA. Contudo, a entidade SUPERVISOR implementa o plano de controle da ETArch-SG e, portanto, o IED precisa trocar primitivas de controle ‘da rede de energia’ com o SUPERVISOR. É interessante notar que o plano de controle da arquitetura ETArch-SG (isto é, o plano de controle de *Smart Grids*) se desenvolve através do plano de dados ETArch.

Para a implementação das funcionalidades que se espera de *Smart Grids* e visando a ‘conexão’ de dispositivos inteligentes da planta de energia ao plano de controle da rede de energia, foram desenvolvidos *Workspaces* de controle para suportar as relações internas e externas a Subestações. As próximas seções são dedicadas às especificações destes *workspaces*.

### 3.1 Workspace de Energia e Controle

O *Workspace* de Energia e Controle permite que o SUPERVISOR da rede tenha conhecimento de todos os dispositivos (IED) ligados ao sistema elétrico de potência, dentro de seu domínio de atuação. A funcionalidade principal deste *workspace* é garantir que cada IED, que passa a ser tratado como uma entidade do tipo IED no contexto da ETArch-SG, tenha seu Título registrado no DTS, como uma entidade ETArch, e também na base de dados do SUPERVISOR, como uma entidade IED da ETArch-SG. O SUPERVISOR é responsável por criar este *workspace* no DTS, que, doravante, fica disponível para a conexão de IEDs da planta de energia.

Uma entidade do tipo IED, que tem seu registro confirmado no SUPERVISOR, é tratada como entidade ativa. Ao se registrar na base de dados do SUPERVISOR, a entidade solicita o arquivo de configurações correspondente a seu Título, que contém as instruções de funcionamento do IED. Como dito anteriormente, estas configurações são fornecidas por fabricantes e ajustadas pela equipe de engenharia da companhia energética.

Figura 24 – Diagrama temporal para comunicação entre entidades da ETArch-SG.

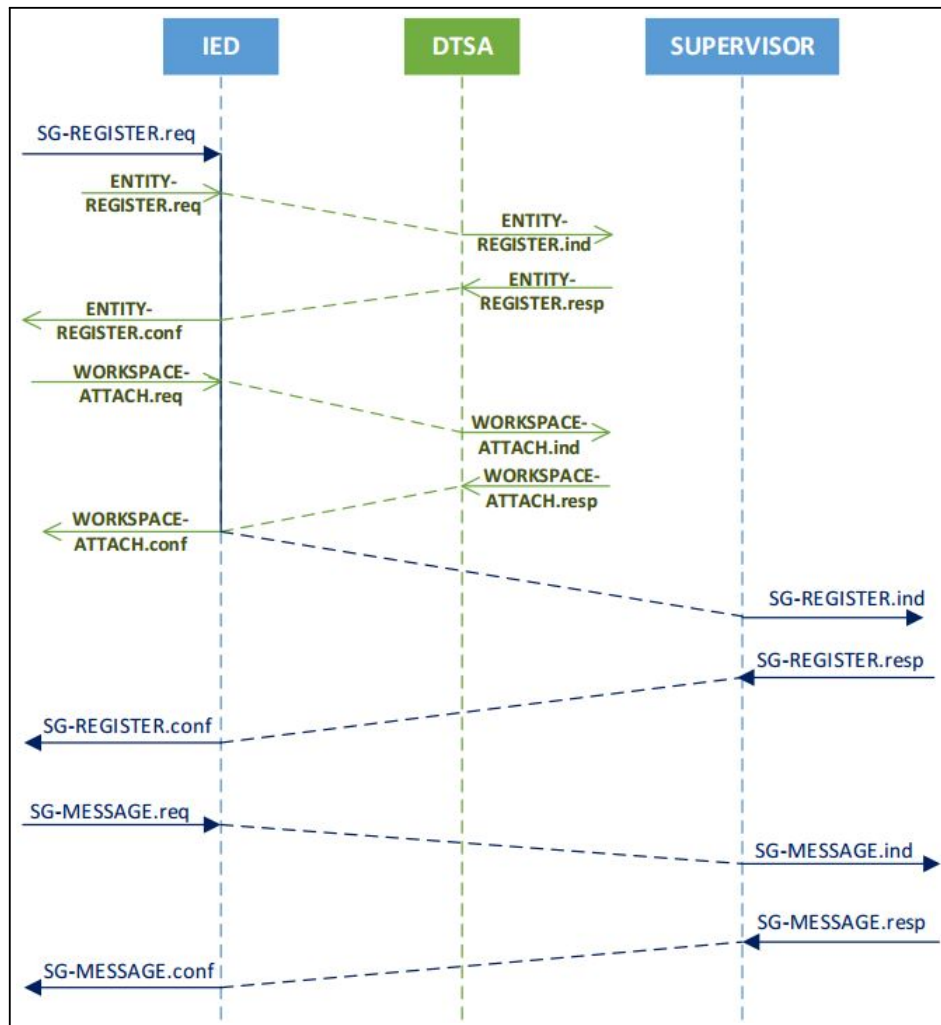
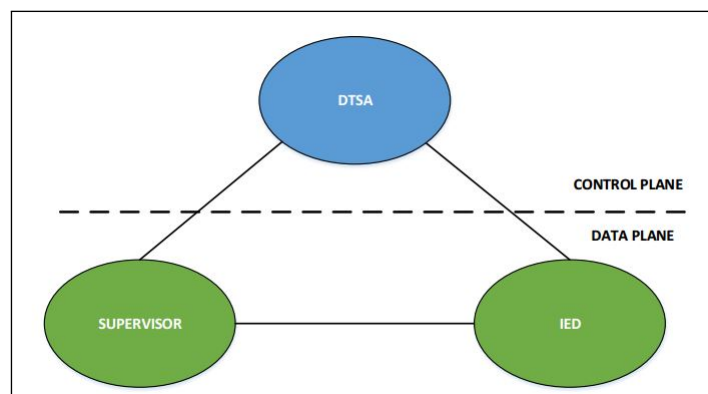


Figura 25 – Relação de comunicação entre o DTS e as entidades SUPERVISOR e IED.

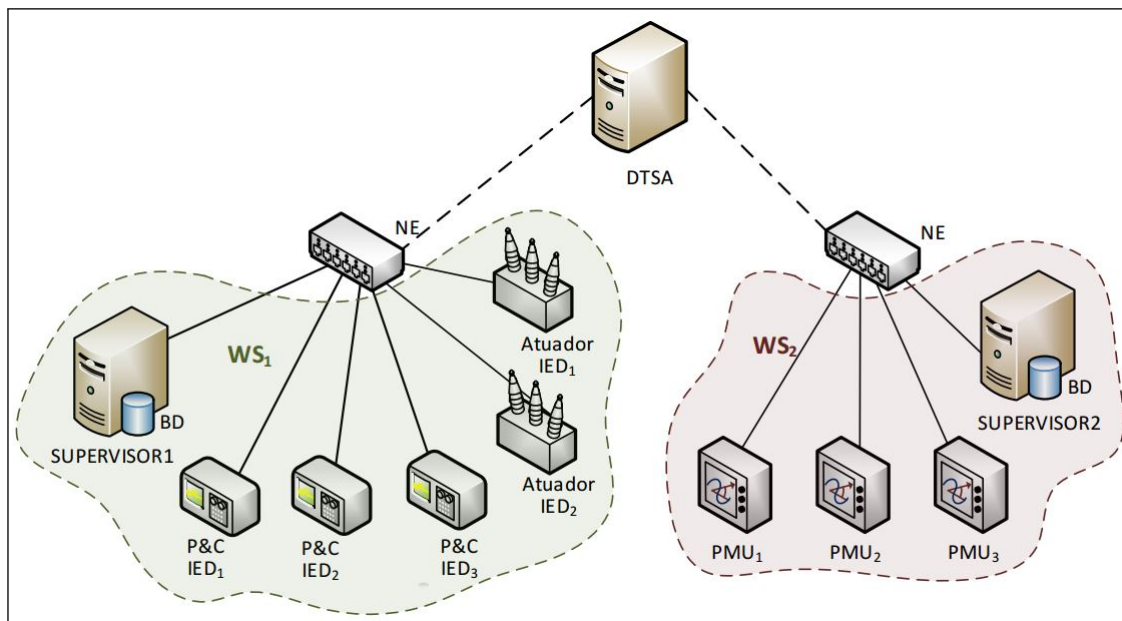


Com relação à nomenclatura de entidades que fazem parte da *Smart Grid*, o padrão IEC 61850 especifica mais de 300 Nós Lógicos (LN), para os quais foram padronizados universalmente: Identificação; forma de Endereçamento; e Objetos de Dados (podendo ser um ou mais) (IEC, 2016a) que podem conter.

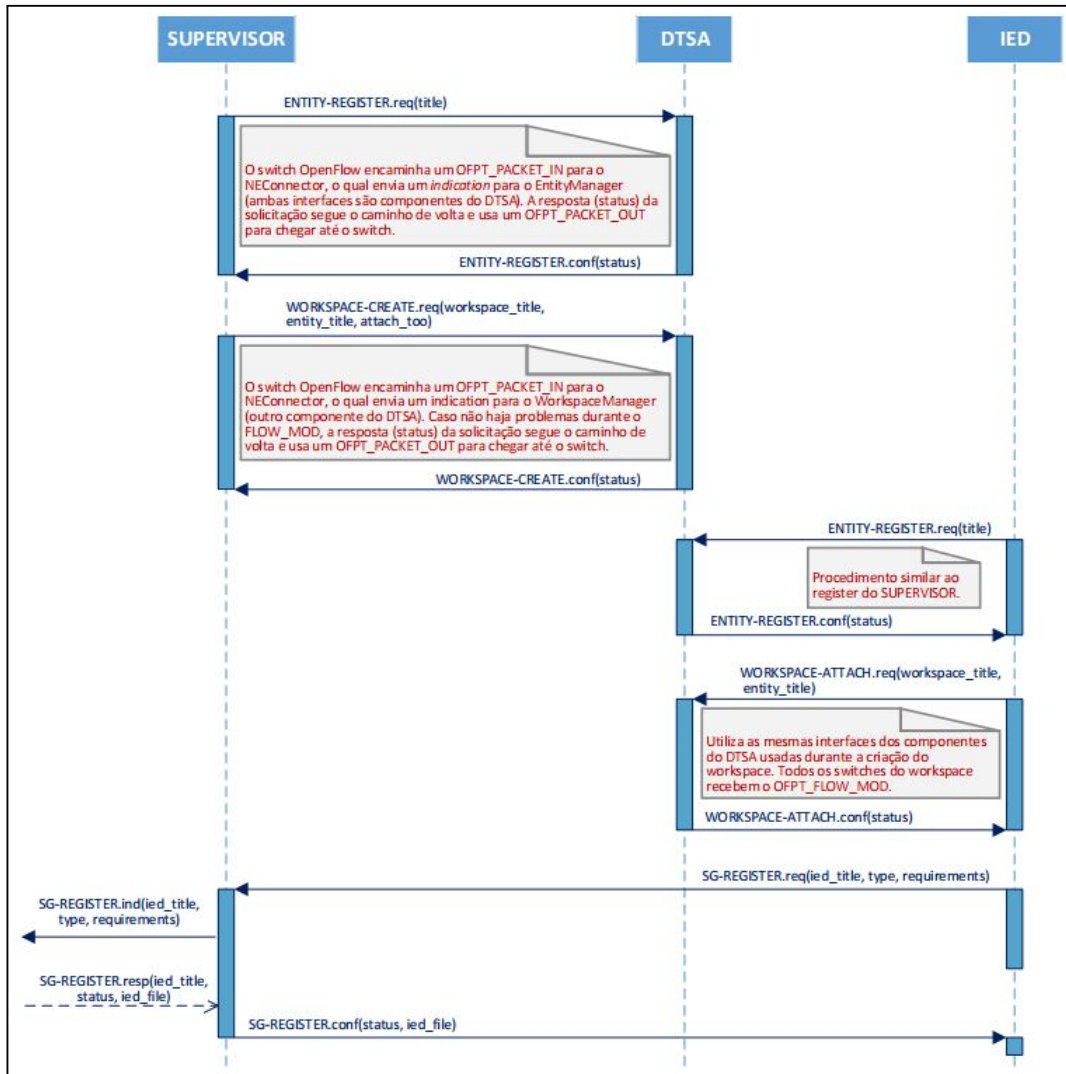
Tais atributos (Identificação/Endereço) podem ser utilizados como Títulos de entidades que se comunicam através do *workspace*, proporcionando uma maior granularidade para acesso aos dados disponíveis que, de fato, representam elementos endereçáveis de um IED, desde a identificação do próprio dispositivo físico, até atributos de um objeto de dados do nó lógico, conforme mostrado no exemplo da subseção 2.2.4. Todavia, neste trabalho, as entidades até o momento definidas são relacionadas, exclusivamente, a IEDs e não a cada um dos componentes internos capazes de realizar funções distintas. O propósito deste trabalho é oferecer uma arquitetura de comunicação que atenda requisitos de comunicação de *Smart Grids*.

A Figura 26 mostra o alcance do *Workspace* de Energia e Controle separado em duas áreas: WS1 e WS2, respectivamente, correspondendo à comunicação interna e externa à subestação, onde foram destacados os tipos de dispositivos encontrados em cada área. Embora, de forma ilustrativa, o *Workspace* de Energia e Controle seja apresentado em duas instâncias, destacando as áreas de abrangência definidas pelo escopo do trabalho, conceitualmente suas propriedades são as mesmas.

Figura 26 – *Workspace* de energia e controle.



O diagrama de sequência do *Workspace* de Energia e Controle pode ser visto na Figura 27. As primitivas criadas para este, e para os demais *workspaces* apresentados nas seções seguintes, são melhor detalhadas no Apêndice B. Os detalhes envolvendo o registro de entidades (*ENTITY\_REGISTER*) e a criação de *workspaces* (*WORKSPACE\_CREATE*), que fazem parte do plano de controle da arquitetura ETArch, serão descritos apenas neste diagrama, a intenção é simplificar um processo que seria repetitivo nos diagramas dos *workspaces* das seções subsequentes.

Figura 27 – Diagrama de sequência do *workspace* de energia e controle.

As propriedades do *Workspace* de Energia e Controle são apresentadas da seguinte forma:

- **Título:** o *Workspace* de Energia e Controle possui uma identificação de entidade representada pela primitiva de controle *workspace\_title*, nativa do protocolo ETCP da arquitetura ETArch. A padronização proposta neste trabalho para representar o título deste *workspace* é dada pela seguinte nomenclatura: ENERGY-CONTROL-ID, onde ID é um identificador que diferencia as instâncias de cada *workspace* dentro do escopo de abrangência do SEP. Cada entidade da *Smart Grid* possui uma identificação única definida, de forma genérica, pela primitiva de controle também nativa do ETCP chamada *entity\_title* e aqui nomeada como: SG-TYPE-ID, onde TYPE indica o tipo de entidade e ID é um identificador de valor numérico que diferencia outras entidades do mesmo tipo. Esta nomenclatura é usada para simplificação do trabalho, obviamente, como já foi mencionado, os títulos podem ser todos baseados

na nomenclatura usada pelo padrão IEC 61850. Os tipos de entidade utilizados neste trabalho são: SUP (SUPERVISOR), PC(Proteção e Controle), AT(Atuador) e PMU (*Phasor Measurement Unit*), todos os títulos referentes a IEDs são de conhecimento do SUPERVISOR.

- **Controle de registro:** ao ingressar na rede, cada IED é responsável por fazer o registro da sua entidade no DTS, o próximo passo é o registro da mesma entidade na base de dados do SUPERVISOR, feito isto, o IED é considerado "ativo". O SUPERVISOR também tem sua entidade registrada no DTS e é ele o responsável pela criação de todos os *workspaces* para o funcionamento da arquitetura ETArch-SG. O SUPERVISOR possui uma base de dados contendo todas as possíveis entidades que podem fazer conexão (*attach*) no *Workspace* de Energia e Controle. Desta forma, as entidades registradas ficam disponíveis para que o SUPERVISOR crie os demais *workspaces* e ele mesmo seja responsável por fazer o *attach* das entidades que farão parte deles.
- **Configuração de dispositivos:** quando uma entidade faz o registro na base de dados do SUPERVISOR, logo em seguida ela solicita o envio do arquivo de configurações do IED, para isso foi proposta a primitiva de serviço SG-REGISTER.req. Ao receber a solicitação, o SUPERVISOR consulta sua base de dados usando a primitiva SG-REGISTER.ind, faz o registro da entidade e tem acesso às informações solicitadas (status do registro e arquivo de configurações do IED) que chegam através da primitiva SG-REGISTER.resp. Na sequência o SUPERVISOR encaminha os dados para o IED solicitante usando a primitiva SG-REGISTER.conf. O arquivo de configuração, que é fornecido pelo fabricante do dispositivo, normalmente é ajustado de acordo com as políticas estabelecidas pela companhia de energia. A configuração é feita automaticamente pelos IEDs que recebem estes dados através do *workspace*, exceto no caso dos PMUs, onde pode ser necessário fazer ajustes de configuração durante o funcionamento, normalmente os demais dispositivos mantêm a mesma configuração inicial.

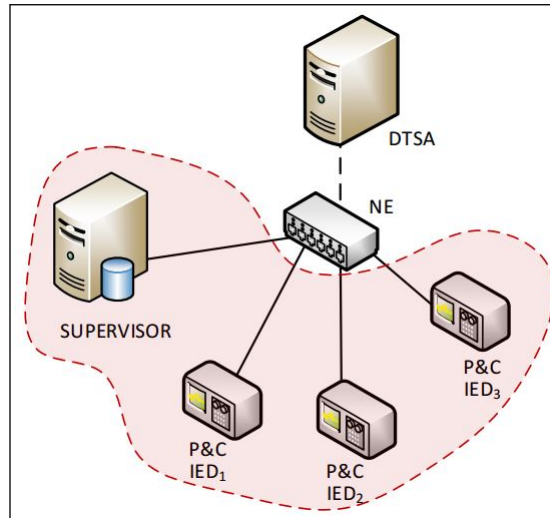
## 3.2 Workspace de Comunicação Horizontal

O *Workspace* de Comunicação Horizontal, que é criado dentro do ambiente da subestação pelo SUPERVISOR, engloba a troca de dados ao nível de Vão realizada pelos dispositivos de proteção e controle. Neste *workspace* trafegam as mensagens do tipo GO-OSE, que monitoram as condições de funcionamento da rede e acionam os dispositivos de proteção em caso de sobrecorrente ou sobretensão. Os requisitos temporais das mensagens deste tipo podem ser bastante rígidos (por exemplo, mensagem *Trip*), conforme observado na Tabela 3.



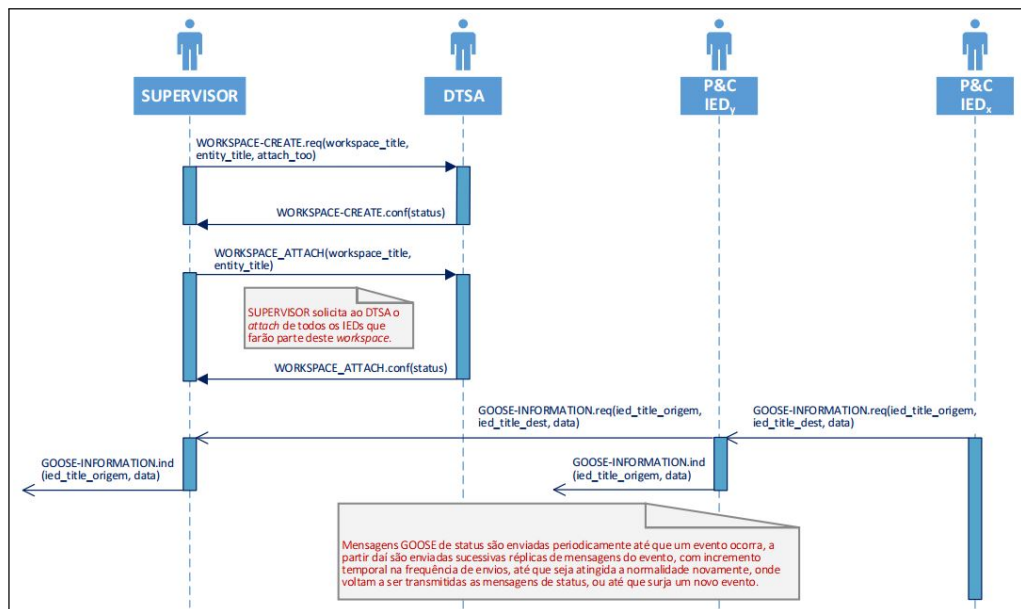
Além de criá-lo, o SUPERVISOR conecta (*attach*) as entidades IED ativas, que passam a fazer parte deste espaço, e, enquanto houver tráfego de dados, é sua função promover o *analytics* de mensagens que trafegam pelo barramento lógico. A Figura 28 mostra os elementos que fazem parte do *Workspace* de Comunicação Horizontal.

Figura 28 – *Workspace* de comunicação horizontal.



O diagrama de sequência do *Workspace* de Comunicação Horizontal é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Diagrama de sequência do *workspace* de comunicação horizontal.



As propriedades deste *workspace* são apresentadas a seguir:

- **Título:** o título deste *workspace* é dado pela seguinte nomenclatura: HORIZONTAL-COM-ID, onde ID é um identificador que diferencia as instâncias de cada *workspace*

dentre diversas subestações. Uma vez que as entidades que farão parte deste *workspace* têm de estar ativas, os títulos destas entidades permanecem os mesmos e estão disponíveis para uso em outros *workspaces*.

- **Attach de entidades:** é função do SUPERVISOR verificar quais IEDs estão ativos, consultando a base de dados que contém informações das entidades registradas durante o *attachment* no *Workspace* de Energia e Controle, e definir quais entidades farão parte do *Workspace* de Comunicação Horizontal.
- **Envio de mensagens:** as mensagens neste *workspace* são do tipo GOOSE, sendo que, para este tipo de serviço, não há confirmação de entrega. Uma alternativa para garantir que as informações cheguem aos seus destinos é obtida quando os dispositivos de proteção e controle enviam mensagens de *status* periodicamente no barramento, até que um evento (*trip*, *stop*, *start* etc) ocorra. A partir daí, as mensagens do evento são replicadas e a janela de transmissão vai aumentando, até que se atinja o mesmo intervalo de tempo das mensagens de *status*. Neste instante o envio periódico das mensagens de *status* é retomado. As mensagens enviadas no *workspace* de comunicação horizontal são definidas pela primitiva de serviço GOOSE-INFORMATION.req.
- **Analytics de mensagens:** o SUPERVISOR tem acesso a todas as mensagens que trafegam pelo *workspace* de Comunicação Horizontal, de posse destas informações ele faz o *analytics* das mensagens e pode executar alguma ação de interferência ou simples registro de dados para análises estatísticas e de controle. Os dados que trafegam pelo *workspace* são coletados e armazenados na base de dados do SUPERVISOR, a análise destes dados e as ações decorrentes fogem ao escopo deste trabalho.

### 3.3 Workspace de Comunicação Vertical

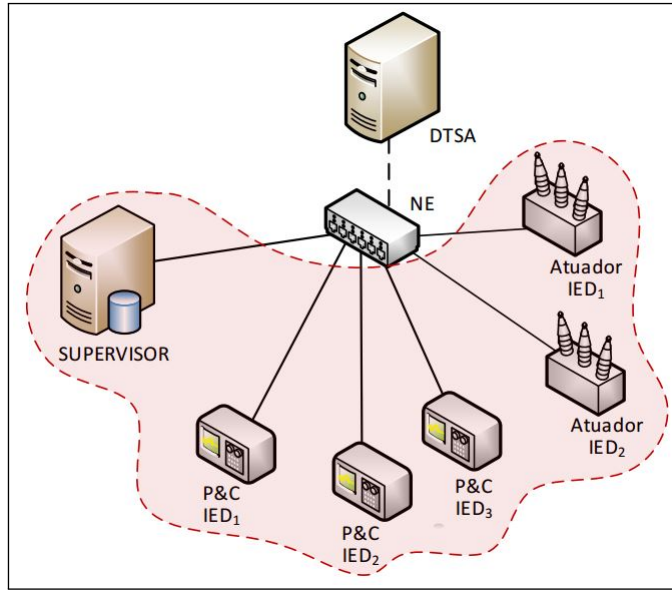
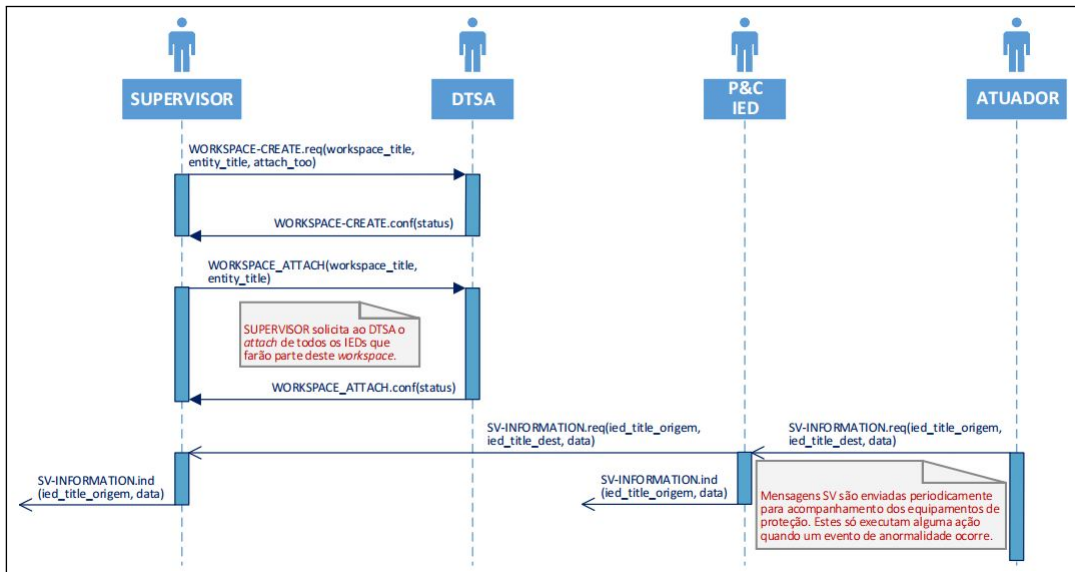
O *Workspace* de Comunicação Vertical foi planejado para o tráfego de mensagens do tipo SV, entre dispositivos de proteção e controle, no nível de Vão, e atuadores que estão no nível de Processo. O SUPERVISOR cria este *workspace*, faz o *attach* das entidades participantes e realiza o *analytics* de mensagens que trafegam nesse barramento lógico. A Figura 30 ilustra os tipos de IEDs e o SUPERVISOR, todos conectados *attached* ao *workspace*.

O diagrama de sequência típico do *Workspace* de Comunicação Vertical é apresentado na Figura 31.

As propriedades deste *workspace* são descritas a seguir:



Figura 30 – Workspace de comunicação vertical.

Figura 31 – Diagrama de sequência do *workspace* de comunicação vertical.

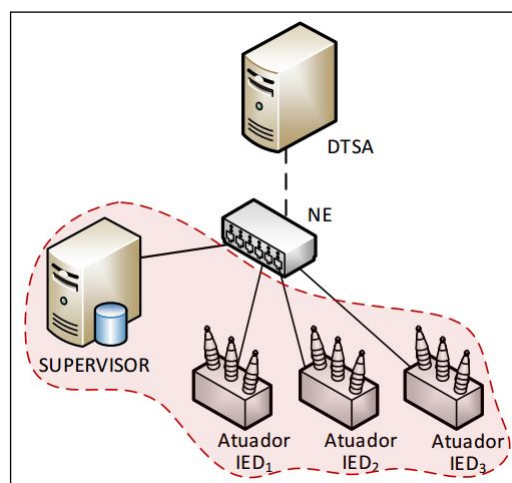
- **Título:** é definido como VERTICAL-COM-ID, onde ID é um identificador que diferencia cada *workspace* dentre diversas subestações. Títulos de entidades participantes deste *workspace* são os mesmos registrados no DTS e na base de dados do SUPERVISOR, por ocasião da ativação de IEDs. Além do SUPERVISOR, os Títulos correspondem a dispositivos de proteção e controle e atuadores.
- Entidades **Attached:** o SUPERVISOR é o responsável pela criação do *Workspace* de Comunicação Vertical e por realizar o *attach* de entidades IED ativas e escolhidos para fazer parte deste *workspace*.

- **Envio de mensagens:** mensagens do *Workspace* de Comunicação Vertical são do tipo SV. Sempre que um atuador precisa notificar um dispositivo de proteção e controle a partir de um evento, uma primitiva de serviço SV-INFORMATION.req é enviada através do *workspace*. Assim como acontece com mensagens GOOSE, não há mecanismos para confirmação de recebimento das mensagens SV enviadas para notificação.
- ***Analytics* de mensagens:** da mesma forma como é feito no *Workspace* de Comunicação Horizontal, o SUPERVISOR realiza o *analytics* de mensagens trafegadas neste *workspace* e trata estas informações de acordo com políticas definidas pela companhia de energia.

### 3.4 Workspace de Aferição de Dados

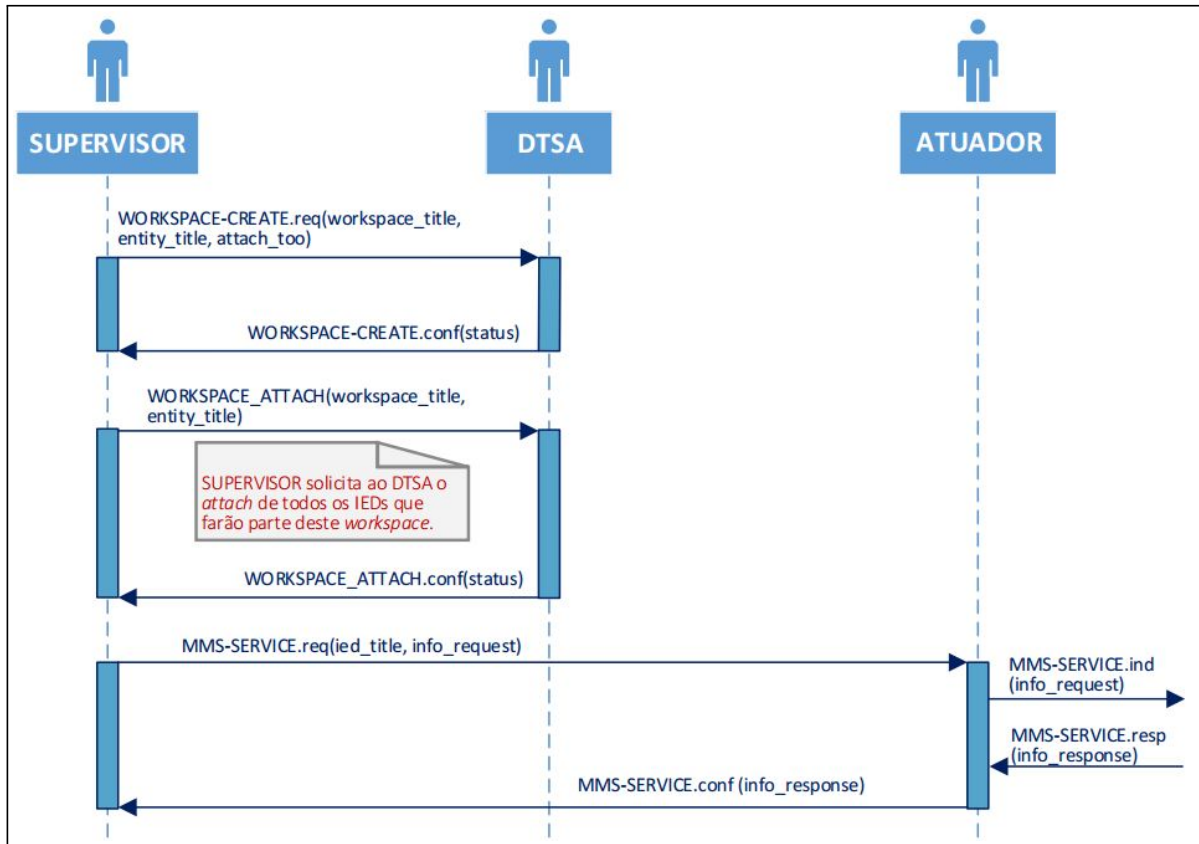
O *Workspace* de Aferição de Dados é usado para comunicação entre o sistema supervísório, localizado no nível de Estação, e atuadores do nível de Processo. O tipo de mensagem utilizado é o MMS, com solicitações de informações partindo sempre do SUPERVISOR, de forma eventual, sempre que há necessidade de aferir alguma grandeza medida a partir de ligações do atuador com outros elementos da rede elétrica. A Figura 32 mostra os componentes deste *workspace* que consiste, basicamente, no SUPERVISOR e atuadores.

Figura 32 – Workspace de aferição de dados.



O diagrama de sequência do *Workspace* de Aferição de Dados é mostrado na Figura 33.

As propriedades deste *workspace* são assim descritas:

Figura 33 – Diagrama de sequência do *workspace* de aferição de dados.

- **Título:** é definido por AFER-COM-ID, onde ID é um identificador que diferencia as instâncias de cada *workspace* dentre as diversas subestações. Títulos de entidades registradas no DTS e na base de dados do SUPERVISOR são usados para identificar os atuadores que, juntamente com o SUPERVISOR, farão parte deste *workspace*.
- **Entidades Attached:** o SUPERVISOR é responsável pela criação do *Workspace* de Aferição de Dados e também pelo *attach* de entidades do tipo Atuador ativas, que farão parte deste *workspace*.
- **Envio de mensagens:** mensagens do *Workspace* de Aferição de Dados são do tipo MMS, onde diferentes atributos podem ser definidos de acordo com as características dos dispositivos e os tipos de grandezas aferidas. O SUPERVISOR utiliza o serviço MMS-SERVICE.req para solicitar dados para o Atuador. Como o MMS é um serviço que exige confirmação de entrega, após processar a solicitação, o atuador responde usando a primitiva MMS-SERVICE.conf.

### 3.5 Workspace de Dados Fasoriais Espontâneos

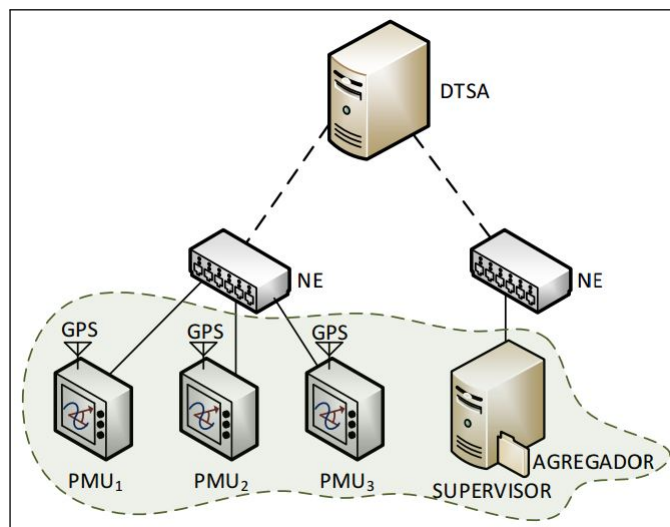
O *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos é usado exclusivamente para comunicação externa à subestação envolvendo entidades do tipo Sincrofasor (PMU). O SUPER-

VISOR coleta dados fornecidos por PMUs, os quais são transmitidos periodicamente em frequências que variam entre 30 a 120 mensagens por segundo, de acordo com o tipo de dispositivo utilizado e sua configuração. No nível de Aplicação, as mensagens podem ser do tipo SV (*stream* de dados informativos) ou GOOSE (indicação de evento ocorrido). Informações geradas por um conjunto de PMUs devem, primeiramente, ser ordenadas de acordo com seu *time stamp* antes de serem analisadas pelo SUPERVISOR. Para realizar a organização destes dados a figura do AGREGADOR é adicionada ao sistema, cujo papel pode ser desempenhado por um computador dedicado ou, da forma como foi implementado neste trabalho, pode ser uma função adicional do próprio SUPERVISOR (*Service Building Block*) .

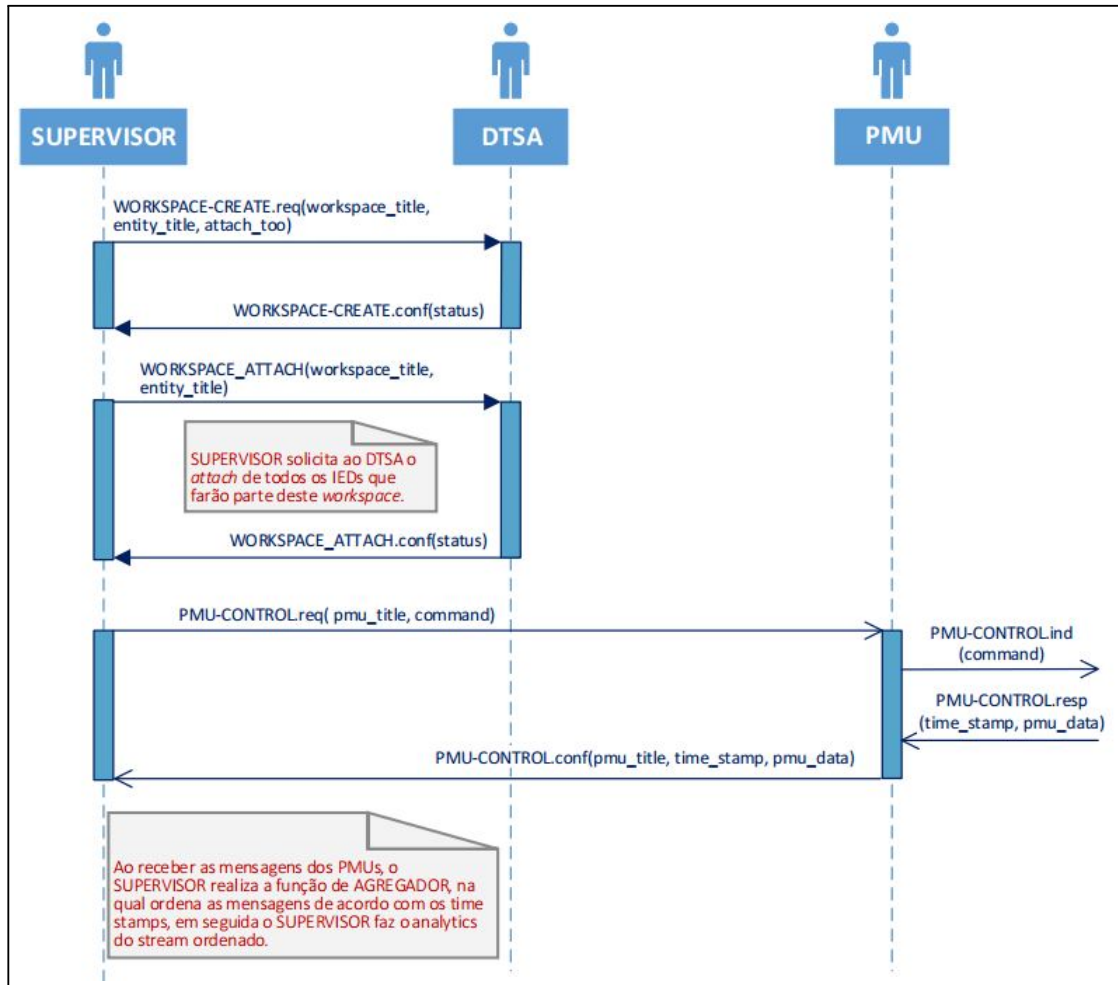
O início e o término de transmissões de dados espontâneos de PMUs são determinados pelo SUPERVISOR. Da forma como este tipo de comunicação é realizada atualmente, é usado o *IP-Multicast*, para o encaminhamento de pacotes de dados, e PDCs na função de agregadores. Neste caso, faz-se necessário o envio de uma mensagem MMS solicitando as configurações de operação de cada PMU antes que as transmissões se iniciem. Tal fato é decorrente da existência de diferentes PMUs, com diferentes taxas de geração de dados, que precisam estar em conformidade com as operações de cada PDC. Este trabalho propõe fazer um registro prévio das características de funcionamento de PMUs, independentemente do fabricante, localizados em várias subestações, de forma que haja um uso mais efetivo do *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos.

Não obstante o SUPERVISOR pode estar ligado a diferentes grupos de PMUs, supervisionando dados de mais de uma subestação, a Figura 34 representa apenas uma instância de *Workspaces* de Dados Fasoriais Espontâneos.

Figura 34 – Workspace de dados fasoriais espontâneos.



O diagrama de sequência do *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos é mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Diagrama de sequência do *workspace* de dados fasoriais espontâneos.

As propriedades do *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos são as seguintes:

- **Título:** é definido pela nomenclatura ESPONT-COM-ID, onde ID é um identificador que diferencia cada *workspace* em um agrupamento de subestações. Títulos de entidades ativas identificam os participantes deste *workspace*, que consiste de um conjunto de PMUs e do próprio SUPERVISOR. Mais de um *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos podem ser criados pelo SUPERVISOR, cada qual com seu próprio título.
- **Entidades Attached:** o SUPERVISOR é o responsável por criar o *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos e fazer o *attach* das entidades do tipo PMU participantes, neste caso correspondendo ao conjunto de PMUs pertencente ao domínio de uma ou mais subestações.
- **Envio de mensagens:** cada PMU é responsável por coletar dados de linhas de transmissão onde esteja conectado e enviar os valores coletados, periodicamente, para que o AGREGADOR monte os *streams* ordenados que serão utilizados pelo

SUPERVISOR. A solicitação para início de transmissão é dada pelo SUPERVISOR<sup>1</sup> usando a primitiva de serviço PMU-CONTROL.req, com o valor do parâmetro *command* indicando um *start*. Ao receber a solicitação, os PMUs iniciam a transmissão de dados na frequência que estão configurados. Para isso utilizam o serviço PMU-CONTROL.conf contendo os dados que serão ordenados pelo AGREGADOR. No final de um período de coleta de dados fasoriais espontâneos, o SUPERVISOR usa o serviço PMU-CONTROL.req, com o valor do parâmetro *command* indicando um *stop*, o que notifica os PMUs para interromperem a transmissão. O envio de dados dos fasores é um serviço não confirmado.

- **Agregação de dados:** a função de AGREGADOR, realizada pelo SUPERVISOR, é coletar dados enviados por PMUs e, de acordo com os *time stamps* do momento que os dados foram gerados, ordenar estes dados formando um *stream* ordenada pelo tempo, que será utilizado para que o SUPERVISOR realize o *analytics* e tome as ações devidas. O tamanho do *stream* pode ser configurado pela central de controle usando janelas temporais de coleta de dados.

### 3.6 Workspace de Dados Fasoriais Sob-demanda

O *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda representa um caso particular de comunicação usando Sincrofasores onde, de forma assíncrona, o SUPERVISOR solicita informações particulares de um dado PMU (ou de um grupo de PMUs) que pertence a um dos *workspaces* onde ele atua. As mensagens são fundamentalmente do tipo MMS e o tempo de resposta é menos rígido do que acontece no *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos. A Figura 36 mostra o SUPERVISOR com alcance em *workspaces* distintos para acesso às informações de qualquer PMU sob seu domínio.

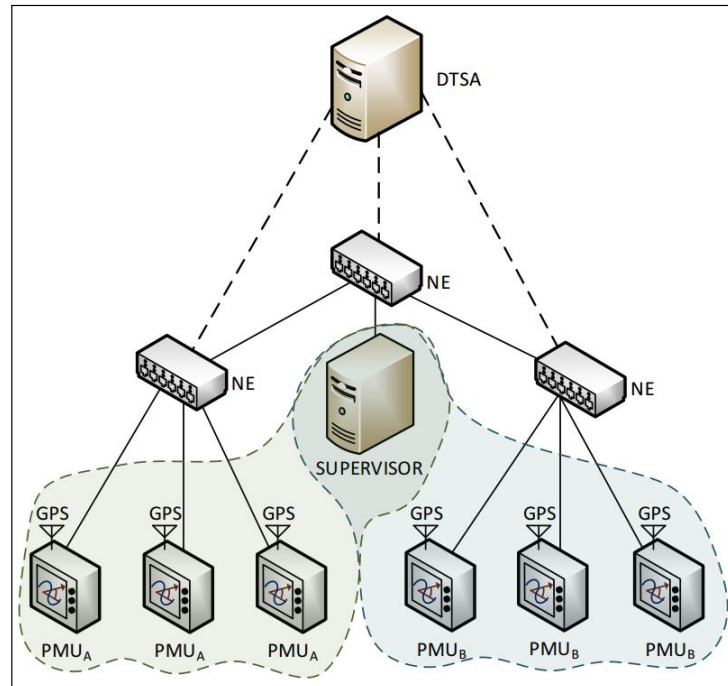
O diagrama de sequência do *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda é mostrado na Figura 37.

As propriedades do *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda são as seguintes:

- **Título:** definido pela nomenclatura DEMAND-COM-ID, onde ID é um identificador que diferencia cada *workspace* em um agrupamento de subestações. Entidades ativas do tipo Sincrofasor (PMU) podem fazer parte deste *workspace*. Mais de uma instância de *Workspaces* de Dados Fasoriais Sob-demanda podem existir.
- **Entidades Attached:** O SUPERVISOR faz o *attach* de todas as entidades deste *workspace* para que possa solicitar informações a qualquer um dos PMUs que estão sob a sua supervisão, sempre que se fizer necessário.

<sup>1</sup> Teoricamente, esta é uma tarefa do AGREGADOR, cuja função foi movida para o SUPERVISOR

Figura 36 – Workspace de dados fasoriais sob demanda.



- **Envio de mensagens:** usando mensagens MMS, o SUPERVISOR solicita dados do PMU, através do serviço PMU-SERVICE.req, usando o atributo *get\_info*. O PMU processa a solicitação e prepara uma mensagem de resposta primitiva de resposta PMU-SERVICE.conf. Além de solicitar informações a PMUs, o SUPERVISOR pode enviar mensagens de configuração, com objetivo de ajustar algum parâmetro de funcionamento do dispositivo, neste caso ele utiliza o serviço PMU-SERVICE.req com o atributo *set\_info*. Este é um serviço confirmado no qual o SUPERVISOR recebe os parâmetros solicitados ou o *status* que indica se a configuração foi realizada.

### 3.7 Entity Title Control Protocol

Os serviços do protocolo ETCP (SILVA, 2013), foram estendidos para atender aos requisitos funcionais dos *workspaces* propostos na ETArch-SG. A Tabela 4 relaciona as primitivas criadas para o ETArch-SG e suas funções relacionadas.



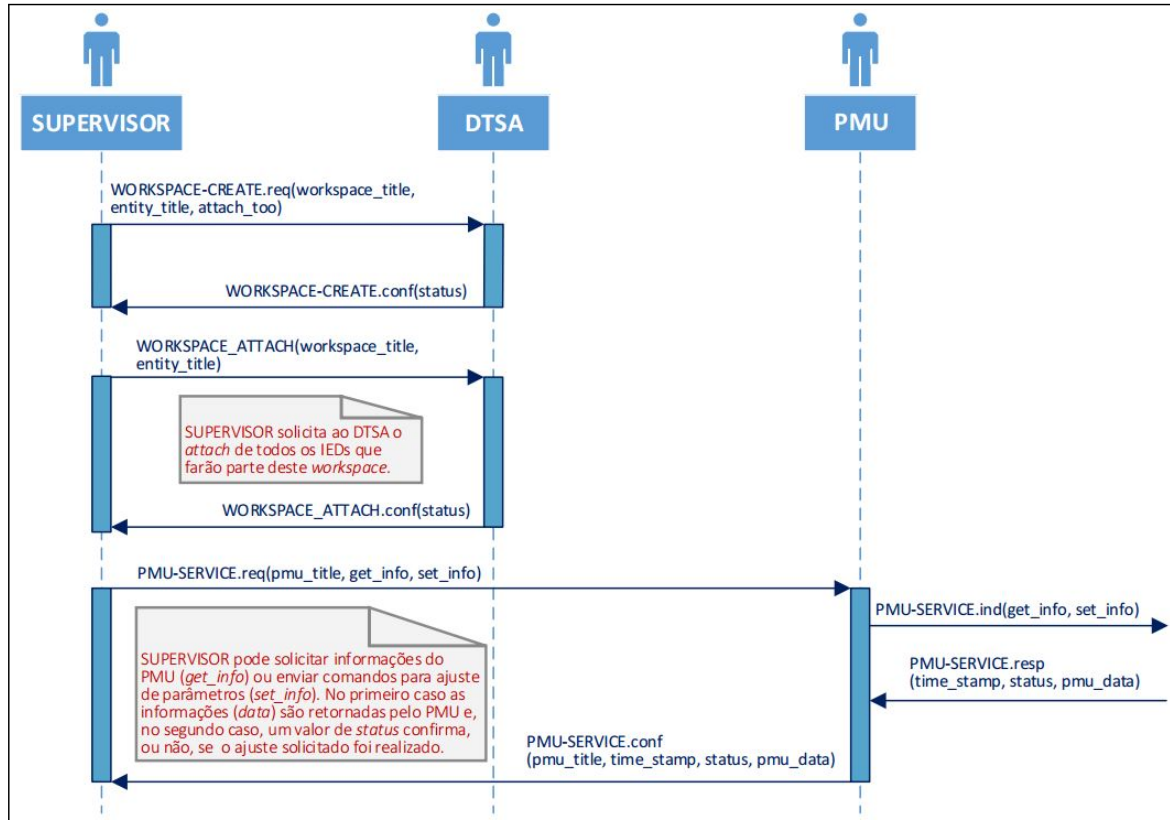
Figura 37 – Diagrama de sequência do *workspace* de dados fasoriais sob demanda.

Tabela 4 – Serviços estendidos do protocolo ETCP para a ETARCh-SG

Serviço	Funcionalidade
SG-REGISTER	Registra (autentica) a entidade IED no SUPERVISOR e envia o respectivo arquivo de configurações
GOOSE-INFORMATION	Envia mensagens tipo GOOSE
SV-INFORMATION	Envia mensagens do tipo SV
MMS-SERVICE	Envia mensagens do tipo MMS
PMU-CONTROL	Inicia/Para a transmissão de dados espontâneos gerados por Sincrofasores (PMU)
PMU-SERVICE	Solicita dados de Sincrofasores sob demanda do SUPERVISOR ou realizar a configuração de parâmetros de PMUs



## Experimentos e Análise de Resultados

Devido a limitações para testes envolvendo um ambiente real de *Smart Grid*, tais como: diversidade de equipamentos, dificuldade de acesso a locais de atuação de IEDs etc, os experimentos serão realizados em ambiente virtualizado, com emuladores para o tráfego de pacotes, emuladores de IEDs e virtualização da infraestrutura de comunicação usando MININET. A ETArch-SG parte de uma base de configurações já estabelecidas pela arquitetura ETArch, na qual novos componentes foram adicionados a esta arquitetura para atender a requisitos de comunicação relacionados ao sistema elétrico de potência. As considerações envolvendo os experimentos em diferentes cenários são apresentadas na seção 4.1. A seção 4.2 contém a análise dos resultados obtidos após a execução dos experimentos.

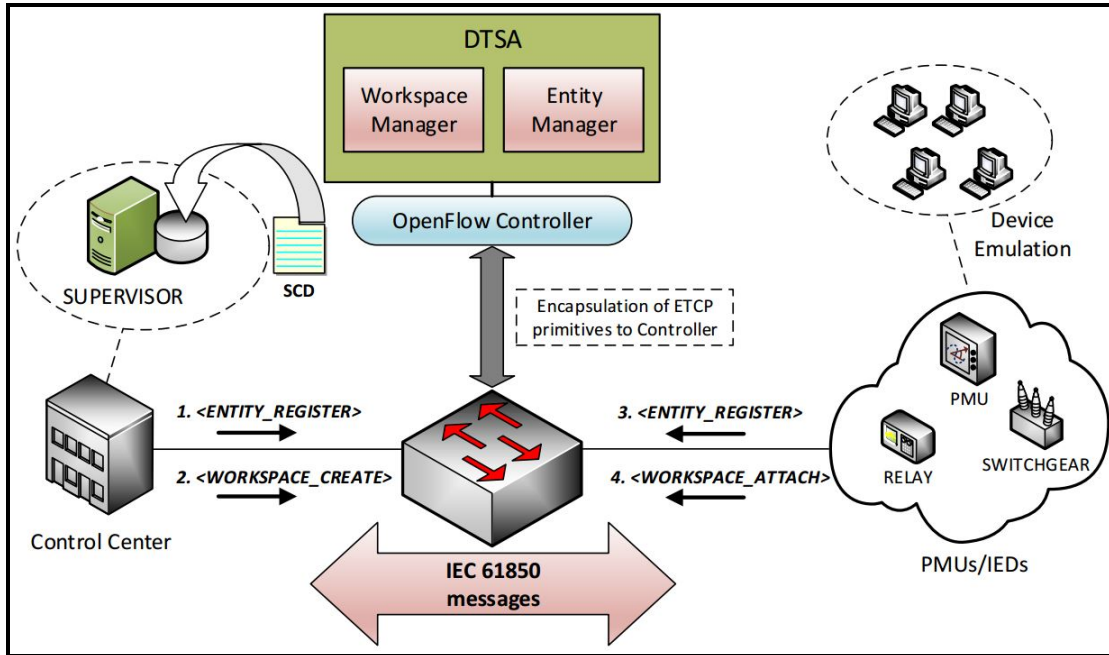
### 4.1 Planejamento dos Experimentos

De forma geral, o modelo que representa o funcionamento da arquitetura ETArch-SG, para a criação dos *workspaces* definidos no Capítulo 3 e para o gerenciamento do tráfego de dados baseados no padrão IEC 61850, é representado pela Figura 38.

A entidade SUPERVISOR requisita o serviço  $\langle ENTITY\_REGISTER \rangle$ , do protocolo ETCP, para requerer seu registro<sup>1</sup> ao DTSA, localizado na central de controle. A ETArch-SG requer que todos os tipos de dispositivos eletrônicos inteligentes da *grid* (PMUs e IEDs em geral) se registrem para que possam trocar informações. Após o registro e antes de iniciar a transmissão de informações, o SUPERVISOR deve criar o *workspace*, que será usado como um canal lógico para suas comunicações com as entidades conectadas. Para tanto, o SUPERVISOR deve requisitar o serviço  $\langle WORKSPACE\_CREATE \rangle$ .

Ao adotar um modelo de gerenciamento centralizado, e também por questões de segurança, todos *workspaces* definidos no Capítulo 3 são criados pelo SUPERVISOR, que

<sup>1</sup> Este serviço permite que Entidades sejam identificadas, autenticadas e registradas no contexto da *Smart Grid*

Figura 38 – ETArch-SG: Extensão da arquitetura ETArch para *Smart Grids*.

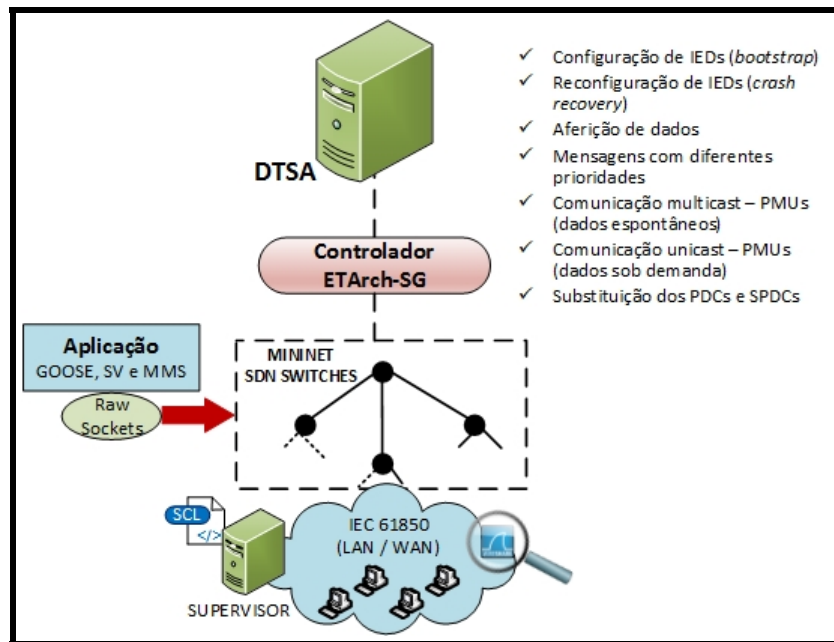
mantém o registro de configuração (SCL) de cada dispositivo inteligente da rede. Após os dispositivos inteligentes se registrarem no DTS (via `<ENTITY_REGISTER>`), eles também são registrados na base de dados do SUPERVISOR. Desta forma as entidades ficam disponíveis para que o SUPERVISOR gerencie quantas e quais delas farão parte de cada um dos futuros *workspaces*. Em termos de segurança, uma dada entidade somente poderá participar de um *workspace* se passar pela política de acesso operada pelo SUPERVISOR.

Exceto no *workspace* de energia e controle, para todos os demais, cabe ao SUPERVISOR conectar (*attach*) qualquer entidade ao *workspace* no qual elas estarão aptas para comunicação de dados, tomando sempre como base as mensagens do padrão IEC 61850. O *attach* ao *workspace* é requerido ao DTSA pela invocação do serviço `<WORKSPACE_ATTACH>`. No DTSA, os módulos Entity Manager e Workspace Manager têm a função de gerenciar, respectivamente, todas as entidades e *workspaces* existentes no sistema.

O ambiente dos experimentos é ilustrado na Figura 39. Num computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-362QM CPU @2.20GHZ, com 8GB de memória, foi configurada uma máquina virtual para abrigar o controlador DTSA, o qual foi instalado no sistema operacional Linux Fedora release 20. Um segundo computador, com processador Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q6600 @2.40GHz, com 8GB de memória, foi utilizado para configurar o emulador da rede MININET, o qual foi instalado sobre o sistema operacional Ubuntu 16.04 LTS.

Os *scripts* de configuração da rede e as configurações das entidades que se registram e criam *workspaces* foram todos escritos em linguagem Python. O DTSA utiliza um modelo de aplicações baseadas em eventos chamado JAIN SLEE e foi implementada através da versão aberta conhecida por Mobicents. O tráfego de mensagens IEC 61850 (GOOSE, SV e MMS), foi gerado usando Raw Sockets e enviado diretamente pelo meio físico. Os resultados foram obtidos pelo uso do Wireshark<sup>2</sup>. Os cenários de cada experimento serão apresentados à seguir.

Figura 39 – Ambiente para execução de experimentos do ETArch-SG em *Smart Grids*.



#### 4.1.1 Cenários para realização de experimentos

Foram planejados seis cenários de experimentos, correspondendo a cada um dos *workspaces* descritos no Capítulo 3. Mensagens GOOSE, SV e MMS foram substituídas por conteúdos na forma textual, ao invés de se utilizar uma sequência binária correspondente às informações que tais mensagens carregam. Esta decisão facilita a visualização dos resultados sem interferir no contexto da comunicação.

Uma vez que não foram utilizados dados coletados a partir de IEDs reais, ligados à rede elétrica, os valores apresentados nos conteúdos das mensagens não são relevantes para o escopo deste trabalho e também fogem ao escopo as possíveis ações que caberiam ao SUPERVISOR realizar (*analytics*). As mensagens simplesmente representam uma possível medida aferida pelo dispositivo inteligente. O mesmo acontece com os arquivos de configuração dos IEDs que, por se tratarem de conteúdos para especificação de parâmetros do dispositivo, usando o formato XML, estes foram preenchidos com valores também

<sup>2</sup> <https://www.wireshark.org/>

irrelevantes ao contexto da comunicação, tendo em vista que as ações tomadas a partir do recebimento dos arquivos, mais uma vez, fogem ao escopo deste trabalho.

#### 4.1.1.1 Configuração do *Workspace* de Energia e Controle

A configuração de dispositivos (IEDs) da subestação é atualmente realizada de forma não automatizada, manualmente, o que gera uma total dependência do operador da rede. Este é um procedimento que deve ser feito toda vez que um novo dispositivo é adicionado a rede, bem como em casos onde há necessidade de reconfiguração, quer seja por falha do IED, interrupções não programadas ou por ajustes definidos pela equipe de operações e planejamento do COS. Por sua vez, o SUPERVISOR mantém uma base de dados com os arquivos de configuração de cada IED da rede. Estes arquivos são fornecidos por fabricantes de equipamentos e ajustados pela equipe de engenharia. Eles devem ser carregados nos IEDs, no momento da inicialização dos dispositivos, e sempre que, por algum motivo, eles precisarem ser religados.

Para os testes deste cenário, foi criada uma rede no MININET contendo um switch OpenFlow e onze hosts, sendo que um deles foi escolhido para realizar as funções do SUPERVISOR e os demais desempenharam o papel de IEDs idênticos inseridos na rede.

Inicialmente, o SUPERVISOR se registra no DTSA, em seguida, cria o *Workspace* de Energia e Controle, no qual aguarda o *attach* dos IEDs. Cada IED, antes de se *'atachar'* ao *workspace*, solicita seu registro no DTSA. Imediatamente após realizar o *attach*, o IED envia seu título no *Workspace* de Energia e Controle solicitando o arquivo de configurações localizado na base de dados do SUPERVISOR. Ao receber a solicitação, o SUPERVISOR envia pelo referido *workspace* o conteúdo do arquivo de configurações em formato XML, inserindo no cabeçalho do *frame* o Título da entidade (IED) requisitante. Ao receber os dados, o IED salva o conteúdo em um arquivo local estando apto a processar sua configuração.

Foram coletados os tempos de atraso desde a solicitação do arquivo de configurações pelo IED, até seu recebimento. Num ambiente real, este procedimento de configurações pode ser feito individualmente, com o auxílio de um *laptop*, ou através da rede local, utilizando mensagens MMS num modelo de aplicação cliente/servidor. Para efeitos de comparação, foi criado um cenário semelhante usando uma rede TCP/IP. Os resultados obtidos são apresentados usando uma distribuição normal com intervalo de confiança de 95%. A Figura 40 mostra os dados que trafegaram pela arquitetura ETArch-SG, enquanto a Figura 41 mostra os dados na rede TCP/IP.

Por serem redes com paradigmas distintos, a intenção é mostrar a vantagem da arquitetura ETArch-SG em relação à tecnologia corrente, neste caso, é possível identificar um ganho significativo em termos do tempo gasto no processo com o uso do ETArch-SG comparado com os valores obtidos no modelo da comunicação atual baseada em TCP/IP.

Figura 40 – Pacotes transmitidos no *workspace* de energia e controle.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
7212	295.2182436...	44:54:53:00:00:00		0x0880		22 Sent by us
7213	*REF*	00:00:00_00:00:02		0x0880		20 Multicast
7216	0.000144671	b3:5f:05:ed:32:2e		0x0880		20 Sent by us
7218	0.000395318	00:00:00_00:00:01		0x0880		83 Multicast
7224	0.000746270	b3:5f:05:ed:32:2e		0x0880		83 Sent by us
Frame 7224: 83 bytes on wire (664 bits), 83 bytes captured (664 bits) on interface 0						
Linux cooked capture						
Data (67 bytes)						
0000	00 04 00 01 00 06 b3 5f 05 ed 32 2e 00 00 08 80	..... ..2....				
0010	3c 52 65 6c 61 79 3e 3c 6f 70 65 72 61 74 69 6f	<Relay>< operatio				
0020	6e 3e 73 65 74 43 6f 6e 66 69 67 20 52 65 6c 61	n>setCon fig Rela				
0030	79 31 5f 70 61 72 61 6d 65 74 65 72 73 20 3c 2f	y1_param eters </				
0040	6f 70 65 72 61 74 69 6f 6e 3e 3c 2f 52 65 6c 61	operatio n></Rela				
0050	79 3e 0a	y>.				

Figura 41 – Pacotes transmitidos na rede TCP/IP.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
46	*REF*	200.19.151.159	200.19.151.85	TCP	76	34879 → complex-main(5000) [SYN] Seq=6
47	0.000040531	200.19.151.85	200.19.151.159	TCP	76	complex-main(5000) → 34879 [SYN, ACK]
48	0.001242435	200.19.151.159	200.19.151.85	TCP	68	34879 → complex-main(5000) [ACK] Seq=1
52	0.002421569	200.19.151.159	200.19.151.85	IPA	73	unknown 0x64
53	0.002451802	200.19.151.85	200.19.151.159	TCP	68	complex-main(5000) → 34879 [ACK] Seq=1
55	0.002534372	200.19.151.85	200.19.151.159	IPA	135	unknown 0x65
Frame 55: 135 bytes on wire (1080 bits), 135 bytes captured (1080 bits) on interface 0						
Linux cooked capture						
Internet Protocol Version 4, Src: 200.19.151.85 (200.19.151.85), Dst: 200.19.151.159 (200.19.151.159)						
Transmission Control Protocol, Src Port: complex-main (5000), Dst Port: 34879 (34879), Seq: 1, Ack: 6, Len: 67						
IPA protocol ip.access, type: unknown 0x65						
0000	00 04 00 01 00 06 00 22 15 f0 ef 4c 00 00 08 00	....." ...L....				
0010	45 00 00 77 51 41 40 00 40 06 2a 24 c8 13 97 55	E..wQA@. @.*\$.U				
0020	c8 13 97 9f 13 88 88 3f ea ba 4c 87 4f 14 be 46	.....? ...L.O..F				
0030	80 18 00 39 bf 85 00 00 01 01 08 0a 36 60 8a 71	...9.... ...6`.q				
0040	00 03 04 d7 3c 52 65 6c 61 79 3e 3c 6f 70 65 72	....<Rel ay><oper				
0050	61 74 69 6f 6e 3e 73 65 74 43 6f 6e 66 69 67 20	ation>se tConfig				
0060	52 65 6c 61 79 31 5f 70 61 72 61 6d 65 74 65 72	Relay1_p arameter				
0070	73 20 3c 2f 6f 70 65 72 61 74 69 6f 6e 3e 3c 2f	s </oper ation></				
0080	52 65 6c 61 79 3e 0a	Relay>.				

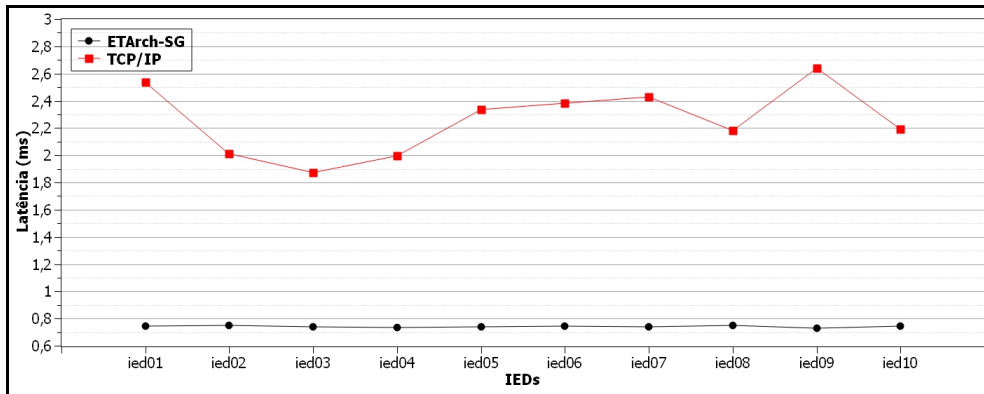
A Figura 42 mostra os valores de tempo para os dez IEDs<sup>3</sup>, onde o atraso médio no processo de requisição, acesso ao arquivo na base de dados e envio do arquivo correspondente pelo *workspace*, ficou em torno de  $0,7411 \pm 0,0036\text{ms}$ , ao passo que, para realizar o mesmo procedimento numa rede TCP/IP o atraso médio foi de  $2,2569 \pm 0,1471\text{ms}$ . Uma vez que todas as configurações são realizadas individualmente, para estes testes não foram consideradas requisições simultâneas de arquivos por parte dos IEDs.

Enquanto o ETArch-SG tem um comportamento uniforme com relação à latência na configuração dos IEDs, provando a eficiência de seu mecanismo de *Multicast*, com o TCP/IP, o comportamento é imprevisível em virtude de possíveis retransmissões em caso de pacotes não confirmados, além da necessidade de se executar o *handshake* em cada conexão.

Também foram simuladas situações onde um IED, repentinamente, era desligado. Ao ser religado, por já estar registrado no DTS, o IED apenas se *'re-attacha'* ao *Workspace* de Energia e Controle e solicita seu arquivo de configurações. Como cada IED faz uma única consulta ao SUPERVISOR, o acréscimo ou retirada de IEDs, ainda que ocorra de

<sup>3</sup> Medidos com o Wireshark

Figura 42 – Comparação de latência na configuração de IEDs usando ETArch e TCP/IP.



forma simultânea, não compromete o processo de configuração destes dispositivos. A automatização do processo, por si só, já é um ganho quando comparado a forma manual na qual esta tarefa é realizada atualmente.

Levando em consideração que os IEDs não executam outra atividade dentro deste *workspace*, uma outra alternativa seria fazer o *detach* da entidade logo após o IED ser configurado, com isso haveria menos participantes "ouvindo" o conteúdo *broadcast* do *workspace*.

#### 4.1.1.2 Configuração do *Workspace* de Comunicação Horizontal

A comunicação horizontal, interna à subestação, acontece no nível de Vão. As mensagens são trocadas entre os dispositivos de proteção e controle (P&C IEDs) e, quando comparadas aos demais tipos de mensagens da rede, estas são as que possuem restrições temporais mais rígidas. Uma mensagem de *trip*, por exemplo, deve chegar ao destino num intervalo não superior a 3ms (IEC, 2016b). Neste cenário, os P&C IEDs se conectam ao *workspace* para troca de mensagens GOOSE. Estas mensagens podem ser destinadas a um ou mais dispositivos conectados ao *Workspace* de Comunicação Horizontal, dependendo da quantidade de conjuntos de manobra que serão acionados e da quantidade de Vãos da subestação.

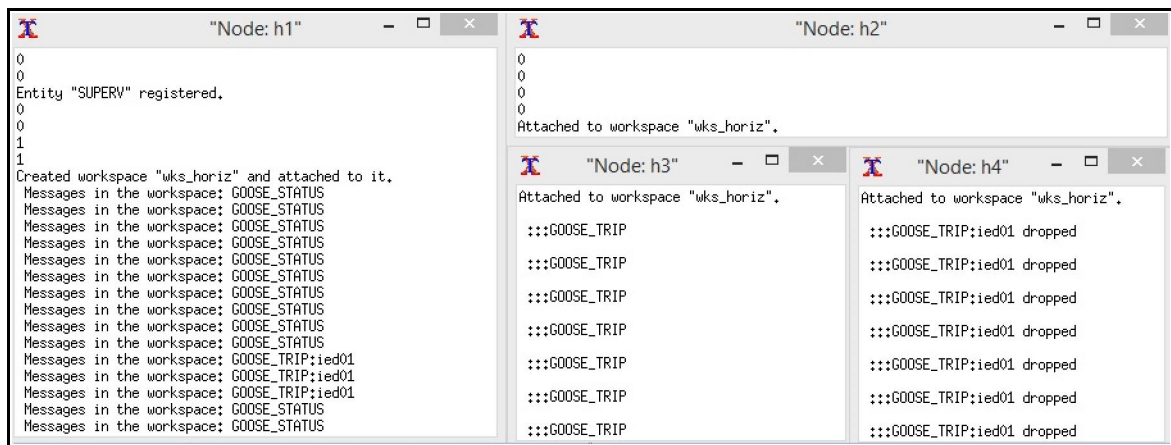
Para representar a utilidade de comunicação *Multicast* para mensagens GOOSE, foi planejado um experimento contendo os seguintes elementos (*hosts*) configurados no MINI-NET: um SUPERVISOR, um IED emissor e dois IEDs receptores. O operador do sistema supervisão, representado pelo SUPERVISOR, não tem uma atuação direta neste cenário, ele apenas acompanha os eventos que são encaminhados pelo *Workspace* de Comunicação Horizontal, realizando o *analytics*, de forma a poder tomar alguma decisão baseada nos valores observados. Para o experimento, estas mensagens foram armazenadas na base de dados do SUPERVISOR ao mesmo tempo em que foram impressas na sua tela, simulando uma possível visualização de informações através do quadro sinóptico.

Em condições de normalidade, o IED emissor envia mensagens de *status* periodicamente até que um evento, por exemplo, uma sobrecarga na rede, ocorra e uma mensagem de *trip* seja disparada. A partir de então, todos os dispositivos conectados a este *workspace*, que foram configurados para reagir a este tipo de notificação, percebem a mensagem no barramento lógico e fazem o acionamento do conjunto de manobra correspondente.

No experimento realizado, apenas um dos dois IEDs receptores foi acionado, através do título inserido no cabeçalho das mensagens de *trip*, enquanto o outro descartou todas as mensagens recebidas. Como este tipo de mensagem não conta com um serviço de confirmação por parte do destinatário, o IED emissor faz sucessivos envios de mensagens *trip*, em intervalos que aumentam gradativamente, até o *status* de normalidade ser atingido novamente. Para o experimento, os eventos *trip* foram inseridos de forma aleatória.

A Figura 43 mostra um *print* das telas de cada dispositivo na rede simulada usando o MININET, onde o *Node h1* é o SUPERVISOR, o *Node h2* é o IED emissor, o *Node h3* é o IED receptor das mensagens *trip* e o *Node h4* é o IED receptor que não figura como destinatário de nenhuma mensagem.

Figura 43 – Mensagens GOOSE entre IEDs no *Workspace* de Comunicação Horizontal.



Os textos escolhidos para representar as mensagens de *status* e *trip* servem apenas para ilustrar e identificar os conteúdos das mensagens GOOSE. Na prática, os formatos das mensagens são sequências binárias, cujos valores possuem algum significado informativo, e que ocupam os campos da mensagem GOOSE mostrada na Figura 15. De qualquer forma, estas mensagens estão inseridas no *payload* do *frame* do enlace e poderiam ter sido substituídas por quaisquer sequências binárias padronizadas pelo IEC 61850, ainda assim não haveria alteração dos resultados pois aqui não há interesse no conteúdo das mensagens e sim no processo de comunicação entre os IEDs.

Com relação ao tempo gasto para que uma mensagem GOOSE esteja disponível no *workspace* e seja recebida pelos IEDs na rede, este é um valor difícil de precisar num ambiente experimental, tendo em vista que depende de vários fatores, como: tipo de

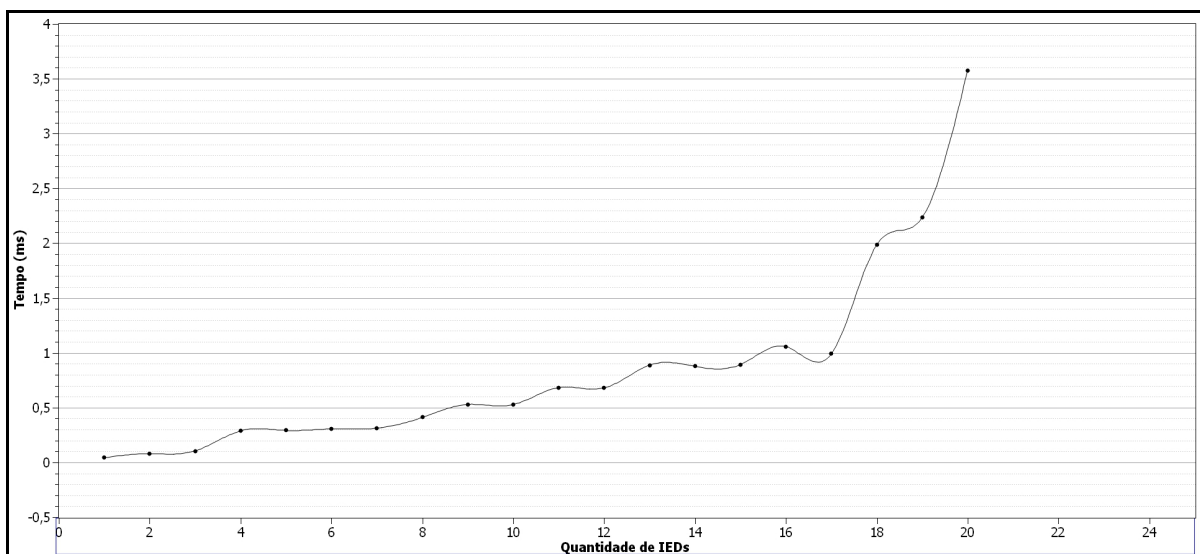


meio físico usado, frequência, taxas de amostragem e quantidade de IEDs comunicantes. Todavia, foi realizado um teste para verificação da curva de latência em função do número de IEDs considerando que, apesar da quantidade de dispositivos do sistema de proteção da subestação não ser relativamente grande, é interessante avaliar o comportamento da latência no ETArch-SG, diante do aumento gradual na quantidade de IEDs dentro de um *workspace*.

Para este novo teste, foi configurada uma rede no MININET contendo trinta hosts, sendo um para o SUPERVISOR e o restante (29 hosts) representando IEDs idênticos. O tipo de mensagem utilizado permaneceu o mesmo do teste anterior (GOOSE), com tamanho fixo do *frame* de 152 bits e usando a taxa de amostragem de 4800 mensagens/seg, estes valores foram extraídos de uma recomendação da UCA - *International User Group* para testes que envolvem a geração de mensagens GOOSE (UCA, 2004).

Após o registro dos 29 IEDs no DTSA, de forma não simultânea, cada IED iniciou o processo de envio intermitente de mensagens GOOSE. Para cada IED ‘atachado’ ao *workspace* foi registrado o intervalo de tempo em que este obteve acesso ao meio para o envio das mensagens. O tempo de transmissão da mensagem dentro do *workspace* não varia para cada IED que inicia uma transmissão. Este valor, na ordem de  $1,2 \mu s$  (medido a partir do Wireshark), não foi considerado no experimento. A Figura 44 mostra o gráfico relacionado a este tempo de espera em função da quantidade de IEDs no *workspace*, em primeira análise foram mostrados apenas os primeiros vinte IEDs do *workspace*. O principal objetivo foi obter uma melhor visualização da curva até o ponto onde o valor de 3ms, um marco para o tempo mais rigoroso (*trip*), foi ultrapassado.

Figura 44 – Tempo de espera pelo acesso ao *workspace* considerando o aumento gradativo de IEDs.



Para geração do gráfico da Figura 44, foram considerados os valores médios dos

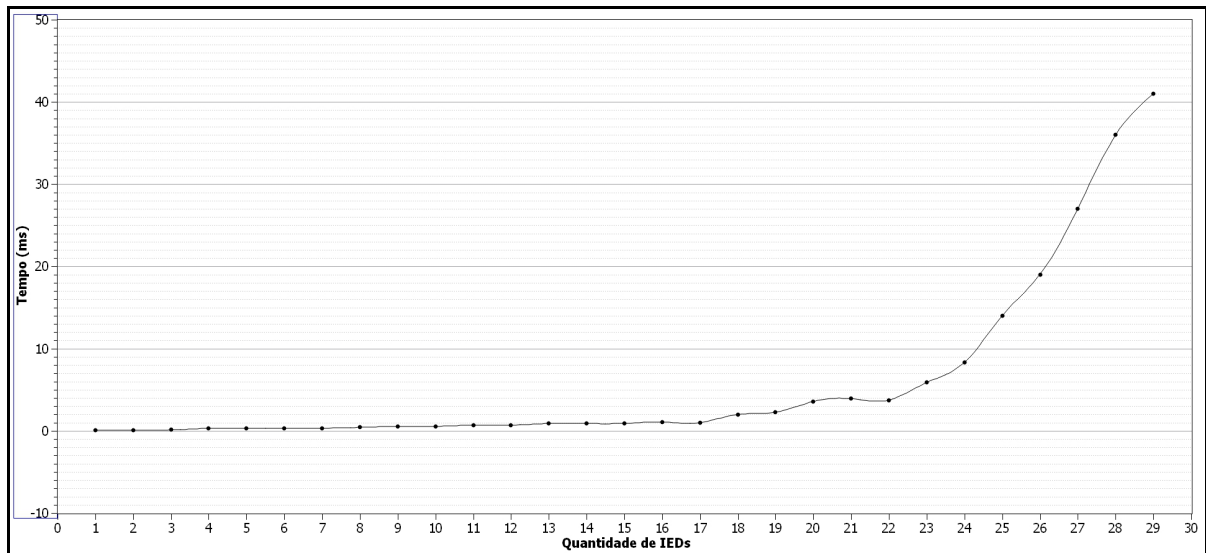


tempos medidos a partir do Wireshark. Observa-se que, somente após o vigésimo IED ser atachado, o tempo médio de espera para acesso ao *workspace* excedeu o valor restritivo de 3ms. É importante ressaltar que mensagens *trip* não são enviadas o tempo todo, apenas em condições de anormalidade da rede.

Embora seja indesejável ultrapassar este limite de tempo, para certas mensagens GO-OSE, também vale ressaltar que, mesmo para subestações de grande porte são utilizados, geralmente, quatro Vãos com um dispositivo de proteção para cada linha de entrada e outro para cada linha de saída, ou seja, a comunicação horizontal ocorre entre quatro IEDs. Em alguns casos específicos, a quantidade de Vãos é duplicada, para redundância, ou seja, são usados oito Vãos com um dispositivo de proteção para cada linha. Neste cenário seria possível pensar em uma instância do *Workspace* de Comunicação Horizontal para cada conjunto de IEDs intercomunicantes, o que atenderia, com folga, os limites de atraso máximo recomendados pelo IEC 61850.

Em complemento ao teste realizado, a Figura 45 mostra o resultado do tempo de espera pelo acesso ao meio considerando a totalidade de IEDs (29), em plena atividade de transmissão intermitente de mensagens, mantendo a taxa de 4800 mens/seg. Com esta quantidade de IEDs, o tempo de espera para obtenção de acesso ao meio de transmissão ficou na média de  $41,2907 \pm 0,2011$  ms.

Figura 45 – Tempo de espera pelo acesso ao *workspace* considerando 29 IEDs.



Em suma, este é o cenário onde as restrições temporais são mais rígidas e onde ocorre o maior volume de informações. Para o experimento descrito, foi utilizada uma condição de estresse do sistema para analisar o seu comportamento. Em condições reais, por exemplo, usando o *Workspace* de Energia e Controle, onde cada IED faz uma única requisição para obter o arquivo de configurações, a taxa de ocupação do meio é muito menor e as restrições temporais também não são severas, neste caso a quantidade de IEDs

no *workspace* pode ser bem maior.

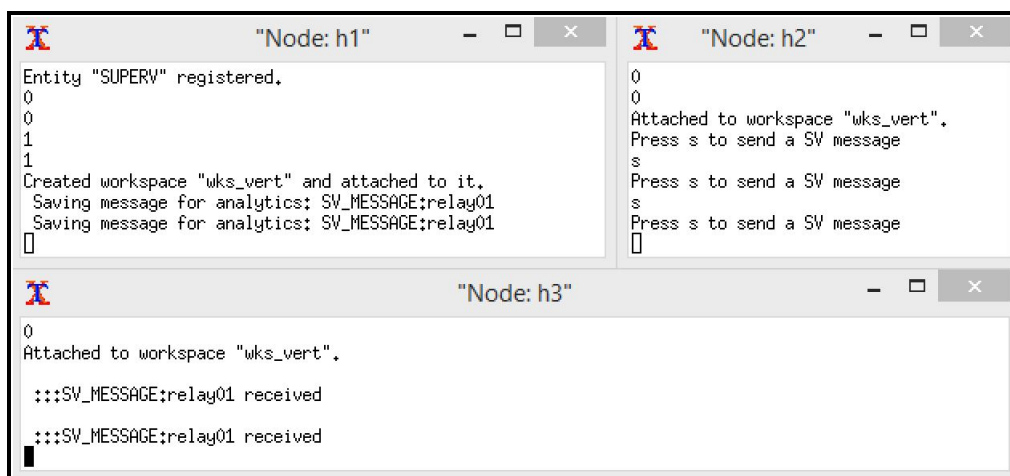
#### 4.1.1.3 Configuração do *Workspace* de Comunicação Vertical

As mensagens trocadas entre o nível de Vão e o nível de Processos (comunicação vertical), envolvem IEDs dos tipos P&C e Atuadores. São utilizadas mensagens do protocolo SV que serve, por exemplo, para que uma *Merging Unit* envie mensagens digitais para um IED P&C, para análise e possível acionamento, caso seja necessário. Neste caso, mensagens do protocolo SV são não confirmadas.

Para o experimento, foram configurados no MININET três *hosts* e um *switch*, sendo um *host* para o SUPERVISOR, outro *host* para o Atuador (emissor de mensagens SV) e o último *host* para o IED P&C (receptor de mensagens SV). Mensagens SV têm natureza semelhante a mensagens GOOSE, com apenas uma modificação no primeiro octeto do APPID. Para simular um evento esporádico de mensagens SV, foi utilizado um controle manual para disparar e interromper o envio das mensagens.

Assim como ocorre na comunicação horizontal, o SUPERVISOR atua de forma indireta fazendo o registro e o *analytics* de mensagens que circulam pelo *workspace*. A Figura 46 mostra um *print* das telas de cada dispositivo na rede simulada usando o MININET, onde o *Node h1* representa o SUPERVISOR, o *Node h2* desempenha o papel do Atuador e o *Node h3* age como o IED P&C receptor de mensagens SV. Aqui também foram usadas mensagens de texto para representar o conteúdo SV que, na realidade, também são sequências binárias definidas no padrão IEC 61850 e que são inseridas no *payload* do *frame* de enlace.

Figura 46 – Mensagens SV entre atuadores e P&C IEDs no *Workspace* de Comunicação Vertical.



O endereçamento do IED receptor das mensagens SV é feito com base no Título inserido no *payload* da mensagem. Assim como no caso do *Workspace* de Comunicação

Horizontal, aqui a quantidade de IEDs também é bastante restrita. Geralmente são dois Atuadores para cada nível de Vão da subestação.

#### 4.1.1.4 Configuração do *Workspace* de Aferição de Dados

O operador do sistema supervisorio, neste cenário o SUPERVISOR, utiliza mensagens MMS para solicitar informações de medições aferidas por IEDs Atuadores. Tais informações fazem parte de um conjunto de dados que podem ser coletados sob demanda do operador, tais como: tensão, corrente, variações de frequência, temperatura do óleo do transformador etc.

No modo de comunicação atual, este tipo de mensagem é enviado usando um paradigma cliente/servidor, baseado em TCP/IP. Aqui, o ETArch-SG utiliza o barramento lógico disponibilizado pelo *Workspace* de Aferição de Dados para realizar esta tarefa. Cabe ressaltar que, diferentemente do que acontece com mensagens GOOSE, as restrições temporais já não são tão rígidas. Uma mensagem deste tipo aceita atrasos da ordem de até 1000ms (ver Tabela 3).

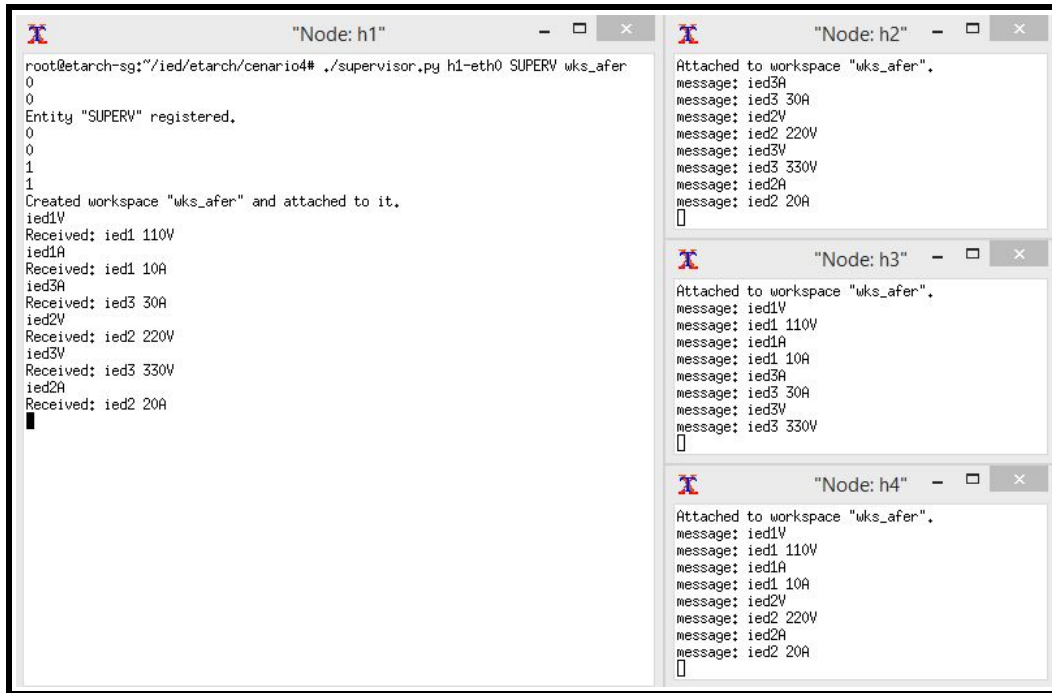
Para o experimento, foram utilizados quatro *hosts* no simulador MININET, um para o papel de SUPERVISOR e os demais para representar diferentes Atuadores para consulta de valores de tensão e corrente previamente aferidos. O SUPERVISOR informa o título do IED a ser aferido e a grandeza de interesse, sendo "V" para consulta do valor de tensão e "A" para consulta do valor da corrente elétrica. A Figura 47 mostra o *print* das telas destes dispositivos, onde *Node h1* é o SUPERVISOR e os demais *hosts* representam os três Atuadores da rede informando valores de tensão e corrente que poderiam ser obtidos a partir de linhas de transmissão.

Para mostrar que um IED só responde a solicitações que lhe são encaminhadas pela identificação do Título, cada IED foi configurado para exibir na tela apenas as solicitações que NÃO lhe são endereçadas, enquanto suas informações pertinentes são enviadas diretamente para o SUPERVISOR.

Embora este *workspace* tenha sido criado para atender a necessidades de subestações para comunicações entre o SUPERVISOR e Atuadores, qualquer dispositivo inteligente da rede, com capacidade para informar dados de medição, poderia fazer parte deste *workspace* para fornecer medidas aferidas de acordo com demandas de operadores de supervisão do sistema.

#### 4.1.1.5 Configuração do *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos

Em função da distribuição geográfica de Sistemas Elétricos de Potência, alguns dispositivos inteligentes, como PMUs, geram informações que devem ser encaminhadas para além dos limites de subestações. O COS recebe informações de PMUs dispostos nas pro-

Figura 47 – Mensagens MMS no *Workspace* de Comunicação Vertical.

ximidades de subestações e linhas de transmissão onde estão instalados. Nos dias atuais, são necessários dispositivos PDCs e SPDCs para realizar a agregação de informações geradas por PMUs, numa sequência de *streamings* que são geradas de acordo com *time stamps* de cada PMU. Além disso, a seleção dos PMUs, que serão usados para composição de uma única mensagem, tem de lançar mão de diferentes tecnologias, como *IP-Multicast*, para que a comunicação seja possível.

Para experimentação deste cenário foi criada uma instância do *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos, para envio de informações oriundas de PMUs, pertencentes a uma mesma região ou sob controle da mesma subestação, para um Agregador com a função de ordenar as mensagens de acordo com os *timesteps* e, em seguida, encaminhar o *stream* de informações ordenadas para o SUPERVISOR.

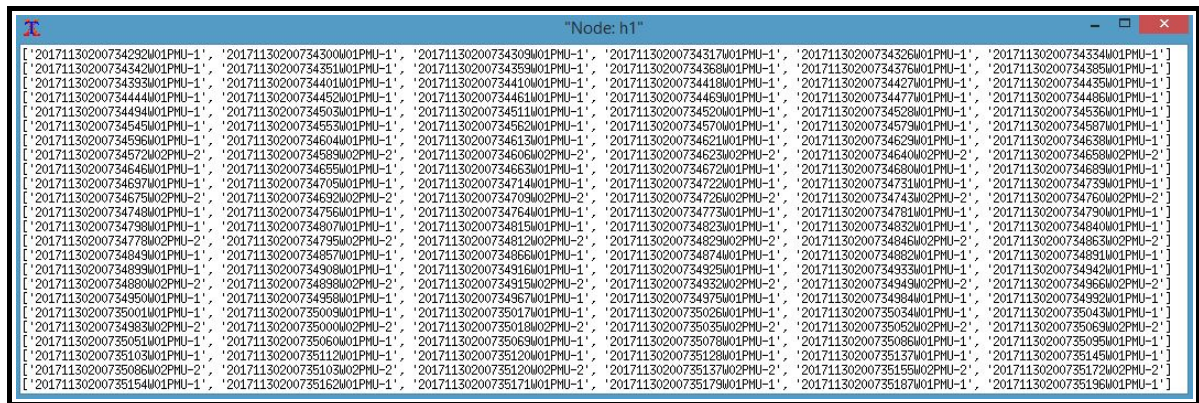
A função de agregação foi configurada no próprio SUPERVISOR, eliminando a necessidade de se usar um equipamento adicional como o PDC. No MININET foram configurados um *switch* e três *hosts*, um para o SUPERVISOR e os outros dois representando os PMUs 'atachados' ao *workspace*. Para simular a diferença na frequência com que as mensagens podem ser geradas em cada PMU, no primeiro deles as mensagens GOOSE foram geradas na taxa de 120 mens/s, enquanto no segundo a geração seguiu a taxa de 60 mens/s. Estes são valores típicos para a nova geração de PMUs.

A ordenação considerou os *timesteps* de geração das mensagens onde, a cada seis mensagens recebidas pelo agregador, uma lista ordenada resultante era encaminhada para armazenamento pelo SUPERVISOR - esta quantidade foi escolhida apenas para melhor

visualização da saída impressa na tela do SUPERVISOR, na prática os concentradores (PDC) abrem uma janela de tempo, com intervalo pré-configurado, na qual os dados são transmitidos.

A Figura 48 apresenta uma amostra das informações recebidas pelo SUPERVISOR e por ele armazenadas. Cada linha contém um agrupamento (*stream*) de seis mensagens ordenadas, sendo que os primeiros valores numéricos referem-se ao momento (data e tempo) em que cada mensagem foi gerada e em seguida são informados o Título do *workspace* e o dispositivo (PMU) de onde partiu a mensagem.

Figura 48 – Mensagens GOOSE no *workspace* de dados fasoriais espontâneos.



A Figura 49 mostra a captura dos pacotes transmitidos no *Workspace* de Dados Fasoriais Espontâneos. O endereço MAC 00:00:00:00:00:02 refere-se ao PMU-1, enquanto o endereço MAC 00:00:00:00:00:03 refere-se ao PMU-2, ambos fazendo parte do mesmo *workspace*. O endereço MAC 52:01:f4:b5:c1:98 que aparece entre as mensagens de cada PMU é correspondente ao controlador da arquitetura ETArch-SG.

Figura 49 – Pacotes transmitidos no *workspace* de dados fasoriais espontâneos.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
883	*REF*	00:00:00_00:00:02		0x0880	41	Unicast to another host
884	0.000004582	52:01:f4:b5:c1:98		0x0880	41	Sent by us
885	0.003698501	00:00:00_00:00:03		0x0880	41	Multicast
886	0.003702652	e7:12:3c:6a:61:f9		0x0880	41	Sent by us
887	0.008431419	00:00:00_00:00:02		0x0880	41	Unicast to another host
888	0.008435990	52:01:f4:b5:c1:98		0x0880	41	Sent by us
889	0.016862365	00:00:00_00:00:02		0x0880	41	Unicast to another host
890	0.016866366	52:01:f4:b5:c1:98		0x0880	41	Sent by us
891	0.020829152	00:00:00_00:00:03		0x0880	41	Multicast
892	0.020833326	e7:12:3c:6a:61:f9		0x0880	41	Sent by us
893	0.025285778	00:00:00_00:00:02		0x0880	41	Unicast to another host
894	0.025289963	52:01:f4:b5:c1:98		0x0880	41	Sent by us
895	*REF*	00:00:00_00:00:02		0x0880	41	Unicast to another host
896	0.000003843	52:01:f4:b5:c1:98		0x0880	41	Sent by us
▶ Frame 883: 41 bytes on wire (328 bits), 41 bytes captured (328 bits) on interface 0						
▶ Linux cooked capture						
▶ Data (25 bytes)						
0000	00 03 00 01 00 06 00 00	00 00 00 02 00 00 08 80				.....
0010	32 30 31 37 31 32 30 31	31 38 30 35 35 30 34 30				20171201 18055040
0020	39 57 30 31 50 4d 55 2d	31				9W01PMU- 1



A solução atual para o envio de mensagens GOOSE, geradas espontaneamente por um conjunto de diferentes PMUs, utiliza o conceito de IP *Multicast*. Para fins de comparação com os resultados obtidos pelo uso do ETArch-SG, foi configurada uma rede com um servidor usando uma classe de IP *Multicast* e clientes utilizando o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP) para conexão.

A Figura 50 mostra a captura dos pacotes no cenário IP *Multicast* onde o IP 225.0.0.1 foi escolhido para o servidor e os endereços 200.19.151.159 e 200.19.151.85 correspondem aos PMUs que geram as mensagens GOOSE. Aqui também foram utilizadas seis mensagens enviadas antes de cada ordenação e posterior geração do *stream* de dados para o servidor. O algoritmo de ordenação e o conteúdo das mensagens é fiel ao que foi utilizado no experimento anterior com o ETArch-SG.

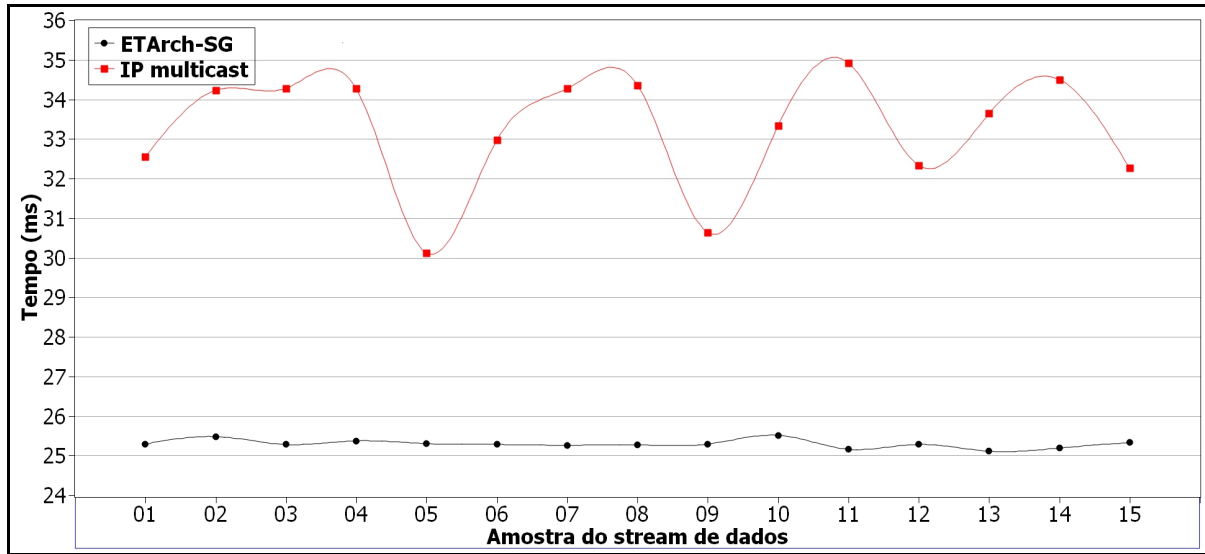
Figura 50 – Pacotes transmitidos via IP *multicast*.

318	*REF*	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 55805 → sugg(1905)	Len=25
319	0.007547320	200.19.151.85	225.0.0.1	UDP	69 38396 → sugg(1905)	Len=25
320	0.010122336	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 56394 → sugg(1905)	Len=25
321	0.024746841	200.19.151.85	225.0.0.1	UDP	69 55544 → sugg(1905)	Len=25
322	0.026233297	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 40187 → sugg(1905)	Len=25
323	0.034226300	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 52358 → sugg(1905)	Len=25
324	*REF*	200.19.151.85	225.0.0.1	UDP	69 35564 → sugg(1905)	Len=25
325	0.003004914	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 34996 → sugg(1905)	Len=25
326	0.013738429	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 60221 → sugg(1905)	Len=25
327	0.017229993	200.19.151.85	225.0.0.1	UDP	69 38843 → sugg(1905)	Len=25
328	0.023629285	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 46896 → sugg(1905)	Len=25
329	0.034283119	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 46092 → sugg(1905)	Len=25
330	*REF*	200.19.151.85	225.0.0.1	UDP	69 39486 → sugg(1905)	Len=25
331	0.010675002	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 53591 → sugg(1905)	Len=25
332	0.017156922	200.19.151.85	225.0.0.1	UDP	69 45503 → sugg(1905)	Len=25
333	0.020456330	200.19.151.159	225.0.0.1	UDP	69 42994 → sugg(1905)	Len=25
▶ Frame 384: 69 bytes on wire (552 bits), 69 bytes captured (552 bits) on interface 0						
▶ Linux cooked capture						
▶ Internet Protocol Version 4, Src: 200.19.151.159 (200.19.151.159), Dst: 225.0.0.1 (225.0.0.1)						
▶ User Datagram Protocol, Src Port: crestron-cip (41794), Dst Port: sugg (1905)						
▶ Data (25 bytes)						
0000	00 02 00 01 00 06 08 00	27 b2 28 1b 00 00 08 00	.....'.(....			
0010	45 00 00 35 79 d1 40 00	01 11 bf 32 c8 13 97 9f	E..5y.@. ...2....			
0020	e1 00 00 01 a3 42 07 71	00 21 4c 96 32 30 31 37	....B.q. !L.2017			
0030	31 32 30 34 31 37 35 36	31 36 30 39 34 57 30 31	12041756 16094W01			
0040	50 4d 55 2d 31		PMU-1			

Foram coletados os intervalos de tempos em que cada grupo de seis mensagens é gerado e ordenado para ser encaminhado ao SUPERVISOR (no caso do ETArch-SG) ou ao servidor (no caso do IP *Multicast*). Os *streams* resultantes foram selecionados aleatoriamente e numerados de 1 a 15. Em seguida, este conjunto de amostras foi utilizado para geração do gráfico mostrado na Figura 51 e para obtenção de um valor temporal médio de cada experimento realizado. Novamente usando uma distribuição normal com intervalo de confiança de 95%, enquanto o ETArch-SG precisou, em média, de  $25,2933 \pm 0,0512\text{ms}$  para a transmissão de cada *stream* de seis mensagens, na abordagem IP *Multicast* foram necessários  $33,2433 \pm 0,7032\text{ms}$ , em média.

Ainda é possível observar no gráfico que o comportamento da curva da solução IP *Multicast* apresenta uma variação muito mais acentuada, entre os valores de tempo mínimo e máximo, do que a solução utilizando ETArch-SG. Isso acontece devido às verificações dos

Figura 51 – Tempos de resposta do ETArch-SG e IP *Multicast* para envio de *stream* de dados.



pacotes transmitidos e possíveis retransmissões que fazem parte da arquitetura Internet. É preciso destacar ainda que, no caso da solução com IP *Multicast*, seria necessário acrescentar a figura do concentrador (PDC) a fim de se aproximar ainda mais da estratégia de comunicação utilizada atualmente. Este é um elemento que atribui uma complexidade adicional à solução IP *Multicast* e que se torna desnecessário na proposta do ETArch-SG.

#### 4.1.1.6 Configuração do *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda

Além da geração espontânea de mensagens que reportam o comportamento de linhas de transmissão, o SUPERVISOR pode, eventualmente, estar interessado em consultas de valores ou medições específicas de um dado PMU. Para este tipo de consulta foi criado o *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda.

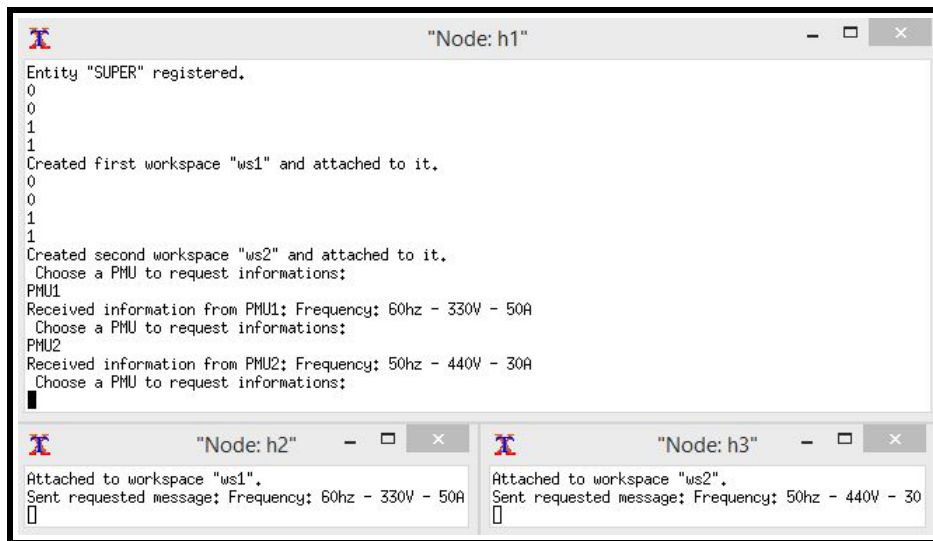
Usando a nomenclatura padronizada pelo IEC 61850, é possível identificar os nós lógicos e todas as grandezas medidas por PMUs. Tais informações são coletadas de acordo com o interesse do SUPERVISOR. Para consultas deste tipo são usadas mensagens MMS enviadas usando uma comunicação *unicast* para acesso individual a cada dispositivo.

Para os testes experimentais deste *workspace*, foram utilizados três *hosts* e um *switch*, virtualizados com o uso do MININET, dos quais um deles foi preparado para executar as funções do SUPERVISOR e os outros dois executaram os *scripts* dos PMUs. Uma vez que o SUPERVISOR tem acesso aos PMUs localizados em diferentes regiões de abrangência, cada qual com um PDC para organização e ordenação dos dados transmitidos, no caso do ETArch-SG estas regiões foram separadas e são consideradas como diferentes instâncias do mesmo *workspace*. Desta forma, para este experimento, enquanto cada PMU foi ‘atachado’ a uma instância do *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda, o SUPERVISOR

permaneceu ‘atachado’ às duas instâncias do *workspace*.

A Figura 52 mostra as mensagens impressas pelos SUPERVISOR e PMUs. Para simular a consulta de um conjunto de grandezas medidas, o SUPERVISOR informa o Título do PMU de interesse, a mensagem de resposta é retornada pelo correspondente PMU e é inserida diretamente no respectivo *workspace*.

Figura 52 – Mensagens no *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda.



A Figura 53 mostra a captura das transmissões nas duas instâncias do *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda, capturados com auxílio do Wireshark. É possível observar, pelos valores mostrados na figura, que o atraso de tempo entre uma requisição de informação pelo SUPERVISOR e a resposta do PMU sendo inserida no *workspace*, está em torno de 0,44ms.

Figura 53 – Pacotes transmitidos no *Workspace* de Dados Fasoriais Sob-demanda.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1098	*REF*	00:00:00_00:00:01		0x0880	20	Unicast to another host
1101	0.000230780	bc:93:7a:d7:fd:7c		0x0880	20	Sent by us
1103	0.000386716	00:00:00_00:00:02		0x0880	44	Unicast to another host
1104	0.000459216	bc:93:7a:d7:fd:7c		0x0880	44	Sent by us
1244	*REF*	00:00:00_00:00:01		0x0880	20	Multicast
1248	0.000139616	bb:ad:d7:ee:3e:0d		0x0880	20	Sent by us
1249	0.000294825	00:00:00_00:00:03		0x0880	44	Multicast
1250	0.000429236	bb:ad:d7:ee:3e:0d		0x0880	44	Sent by us
Frame 1250: 44 bytes on wire (352 bits), 44 bytes captured (352 bits) on interface 0 Linux cooked capture Data (28 bytes)						
0000	00 04 00 01 00 06 bb ad d7 ee 3e 0d 7c bc 08 80	.....> ...				
0010	46 72 65 71 75 65 6e 63 79 3a 20 35 30 68 7a 20	Frequenc y: 50hz				
0020	2d 20 34 34 30 56 20 2d 20 33 30 41	- 440V - 30A				



## 4.2 Avaliação dos Resultados

Durante estes quatro anos de pesquisa nas áreas de *Smart Grids* e Internet do Futuro, tornou-se cada vez mais evidente que, entre necessidades iminentes e requisitos funcionais de um e de outro, haveria ali uma oportunidade para desenvolvimento de um trabalho de cunho científico, sem dúvida, mas com um viés voltado para a implementação de soluções que pudessem ser utilizadas pelas diversas partes do sistema elétrico de potência.

Fundamentalmente, a ETArch-SG é uma arquitetura que teve como base as especificações da ETArch descritas em (SILVA, 2013), com a inclusão de serviços criados especificamente para atender os sistemas de comunicação de *Smart Grids*. Em virtude da complexidade destes sistemas de comunicação, principalmente pela grande abrangência de atuação do SEP e a quantidade de elementos comunicantes, o escopo deste trabalho foi definido nas comunicações internas a uma subestação e nas comunicações envolvendo PMUs e o COS, localizados fora da rede local de subestações.

A utilização do padrão IEC 61850 está alinhada a diretrizes que acompanham a evolução de *Smart Grids*, em cenários com requisitos semelhantes ao que sugere o 5GPPP no documento visionário sobre o setor vertical de energia (5GPPP, 2015). Uma vez que a nomenclatura de elementos que compõem o *grid* e todas as funções passíveis de medição no SEP vêm sendo definidas pelo IEC 61850, esta mesma nomenclatura pode ser adotada como Título de Entidades comunicantes nos *workspaces* propostos para arquitetura ETArch-SG.

Em conformidade com os *workspaces* descritos no Capítulo 3 e para comprovar a hipótese apresentada na seção 1.2, foram criados seis cenários de comunicação em *Smart Grids* onde foram realizados testes.

No primeiro cenário, o *Workspace* de Energia e Controle é utilizado no processo que antecede qualquer tipo de comunicação pela rede, ou seja, a configuração de dispositivos. Uma vez projetados todos os aspectos funcionais de uma subestação e também das comunicações externas a ela, faz-se necessária a configuração individual de todos dispositivos inteligentes. Tal procedimento é feito atualmente mediante o carregamento de um arquivo, fornecido pelo fabricante e ajustado pela equipe técnica do SEP, diretamente na memória do IED. A transferência deste arquivo pode ser feita por uma conexão direta entre o IED e um computador portátil, ou mais comumente, através de mensagens MMS partindo do sistema supervisor. Este é um procedimento de via única, não automatizado, que onera o trabalho da equipe técnica e que precisa ser refeito caso o IED perca sua configuração por um desligamento abrupto, ou por qualquer outro motivo.

A utilização da ETArch-SG neste processo de configuração de dispositivos, é feita de forma automática no momento em que o IED solicita seu arquivo de configurações logo após se conectar ao *Workspace* de Energia e Controle. Este *workspace* serve também para

que o SUPERVISOR tenha conhecimento sobre todas as entidades disponíveis, desta forma, como descrito nas especificações da arquitetura, ele tem condições de fazer o arranjo dos demais *workspaces* da maneira mais conveniente de acordo com as políticas da companhia de energia.

Além da automatização do processo de configuração de IEDs, o mecanismo proposto é bem mais rápido do que as estratégias de configuração atualmente em uso. Tanto no caso da primeira configuração usando MMS, quanto em situações que exijam a reconfiguração, a ETArch-SG mostrou melhor desempenho. A configuração manual depende da percepção do SUPERVISOR sobre a necessidade de reconfiguração de um dispositivo e, mesmo na primeira configuração, o uso do MMS sobre uma rede TCP/IP torna o processo bem mais lento quando comparado com a rapidez em que isto é feito através do *workspace*. A Figura 42 mostrou o comportamento da curva de latência nos dois casos, ETArch-SG e TCP/IP, onde o *workspace* foi, em média, três vezes mais rápido no processo de entrega do arquivo de configurações de um IED do que através da rede TCP/IP.

O segundo cenário contemplou o tipo de comunicação onde restrições temporais são mais severas. No nível de Proteção de subestações, também conhecido por nível de Vão, dados provenientes da coleta intermitente de informações feita pelos atuadores, alimentam as entradas dos dispositivos de proteção que, ao detectarem alguma anormalidade de parâmetros pré-configurados, disparam acionamentos para isolamento de falhas e interrupção setorial do fluxo de energia.

De acordo com o padrão IEC 61850 existem oito tipos de mensagens (ver Tabela 3), com diferentes requisitos temporais, que atualmente disputam o mesmo enlace de rede Ethernet. Apesar de usar VLANs para isolamento dos tráfegos de mensagens GOOSE e SV, apenas dois níveis de prioridade são criados, os demais continuam utilizando a disputa pelo acesso ao meio da forma convencional definida pelo *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA)/(CD) (*Colision Detection*).

Na comunicação horizontal, o tráfego tem uma característica naturalmente *Multi-cast*, dependendo do alerta recebido e da quantidade de acionamentos que precisam ser disparados. Usando o enlace Ethernet, é necessária uma cópia da mensagem para cada destinatário do enlace. Isso não acontece no *Workspace* de Comunicação Horizontal do ETArch-SG, onde uma única mensagem é enviada e alcança todos as entidades cujos Títulos tenham sido endereçados como destinatários.

---

## Conclusão

Este trabalho apresenta uma análise de necessidades de comunicação de sistemas de energia face a requisitos de novas demandas e mostra as afinidades entre o cenário de operação de *Smart Grids* e as arquiteturas de Internet do Futuro, especialmente a ETArch. É provável que a infraestrutura de comunicação ganhe cada vez mais espaço em redes de energia, para que seja possível acompanhar as futuras demandas deste setor. Todavia, essa é uma realidade ainda distante em países subdesenvolvidos, e até mesmo em alguns desenvolvidos, o que leva a uma expectativa de que a evolução de *Smart Grids* aconteça de forma lenta e gradual. O funcionamento de um sistema elétrico de potência (SEP) possui aspectos muito complexos, que fazem com que a presença humana - representada resumidamente no texto pela figura do operador de sistema - seja obrigatória em todos os setores e, mesmo nas redes mais automatizadas, a interação humana é imprescindível. Tal fato faz da comunicação na rede de energia um sistema repleto de informações que não podem ser gerenciadas de forma trivial.

Ao longo dos anos foram criados vários protocolos e padrões que oferecem suporte aos sistemas de comunicação em redes de energia. A introdução do padrão IEC 61850 é uma tentativa de unificar o acesso a informações que circulam pela rede, independentemente de fabricantes de dispositivos inteligentes e sistemas supervisórios utilizados. O arcabouço de conhecimentos necessários a respeito do funcionamento de sistemas de comunicação do SEP, fez com que uma enorme barreira tivesse de ser superada antes de colocar em prática as propostas que foram apresentadas neste trabalho envolvendo a inserção da arquitetura ETArch-SG neste contexto.

Após o entendimento das necessidades do setor elétrico de potência, o trabalho foi direcionado na busca de soluções para os problemas existente. Para tal, são apontadas algumas possibilidades para que uma arquitetura baseada em SDN, a ETArch-SG, seja capaz de suportar os desafios dos sistemas de comunicação de *Smart Grids*, tanto para mensagens que circulam dentro de subestações, quanto para informações trocadas entre as centrais de controle e dispositivos de monitoramento acessados via WAN.

Estendendo o plano de controle da arquitetura ETArch, a ETArch-SG apresenta uma série de funcionalidades para o plano de dados, onde foram criados serviços para suportar os diferentes tipos de mensagens e requisitos de comunicação pertinentes a diversas áreas em que há transporte de dados pelo *grid*. Também foi adicionada a figura do SUPERVISOR, um tipo de entidade central da arquitetura ETArch-SG, capaz de gerenciar a comunicação em todos os *workspaces* especificados e supervisionar todas as mensagens que circulam na rede, quer seja realizando o *analytics* das informações, quer seja atuando na comunicação direta com os IEDs.

Após a criação dos *workspaces* de controle, a primeira funcionalidade do SUPERVISOR, a configuração dos dispositivos da subestação, apresenta uma importante contribuição e um avanço na automatização de processos da *Smart Grid*. Da forma como foi proposta, esta funcionalidade beneficia o operador da rede tornando o trabalho de configuração e reconfiguração de IEDs mais eficiente e seguro.

Em termos de segurança, o *workspace* fornece uma conexão lógica onde todas as entidades conectadas a ele são registradas (autenticadas) pelo SUPERVISOR. Embora este registro de entidades faça parte de um processo de requisição que, na arquitetura ETArch, ainda é realizado pela própria entidade, foram preparados ambientes que simulam a proposta de centralizar a criação de *workspaces* e o *attach* de entidades como tarefa exclusiva do SUPERVISOR.

A coleta de informações e ajustes de configuração dos IEDs foram otimizados pela ETArch-SG, à medida que a solução apresentada permite uma atuação imediata, com rearranjos "*on the fly*", e com melhor resposta do que as soluções baseadas na comunicação TCP/IP. Mesmo em condições de restrições temporais severas, como o caso da mensagem *trip* do protocolo GOOSE, que ocorre no nível de Vão da subestação, a ETArch-SG se mostrou capaz de atender aos requisitos impostos pelo padrão IEC 61850, fazendo melhor uso da natureza *multicast* inerente ao *workspace*.

Saindo dos domínios da comunicação interna a subestação, a ETArch-SG se mostrou capaz de substituir, com mais eficácia, a comunicação IP *multicast* para o tráfego de dados entre o COS e os PMUs que coletam dados imprescindíveis para o sistema de supervisão. Em complemento, a proposta da arquitetura ETArch-SG elimina a necessidade de dispositivos físicos, hoje obrigatórios, para a concentração de dados enviados por sincrofasores. Todas as tarefas realizadas por estes dispositivos (PDCs e SPDCs) foram projetadas para serem realizadas pelo AGREGADOR, um elemento funcional dentro da arquitetura ETArch-SG.

É importante ressaltar que o IP *multicast* impõe que o transporte seja feito pelo protocolo UDP. Deste modo, as informações são enviadas por uma pilha de protocolos (UDP->IP->Ethernet) não confiáveis, para os quais é possível haver perda de informação, a informação pode chegar distorcida, pode chegar replicada ou desordenada. Este é o

cenário de comunicação atual, o que faz com que a presença do operador humano seja obrigatória.

Os resultados obtidos a partir dos experimentos valida a hipótese deste trabalho, isto é, a arquitetura ETArch-SG apresenta notórios benefícios nas comunicações de *Smart Grids*. Todavia, este foi apenas o primeiro passo para que outras propostas possam conduzir o processo de continuidade desta pesquisa, conforme será destacado na seção seguinte.

Finalmente, um grupo de pesquisa em Sistemas Elétricos de Potência, *Smart Grids* e Internet do Futuro está sendo criado para o desenvolvimento de pesquisas aplicadas à área de energia.

## 5.1 Trabalhos Futuros

A ETArch-SG foi proposta para suportar os sistemas de comunicação em *Smart Grids* dentro de um escopo limitado, comunicação interna a subestações e comunicação externa envolvendo Sincrofasores. Os resultados obtidos poderão ser aplicados para alavancar novas propostas em áreas ainda não exploradas, como por exemplo: suporte a comunicação DER, suporte a comunicação na última milha (usuários de energia) e mobilidade de consumo (veículos elétricos). Na realidade esta lista não foi exaustiva.

Principalmente em termos de segurança, a ETArch-SG oferece um meio privativo de comunicação que está diretamente associado aos requisitos necessários para que uma entidade faça parte do *workspace*. Esta é uma característica da arquitetura que precisa ser melhor explorada.

Já em andamento, está sendo definido um esquema para priorização do tráfego de mensagens, com diferentes requisitos temporais, na comunicação interna a subestação. Embora tenham sido criados seis *workspaces* para atender diferentes tipos de mensagens, a infraestrutura de comunicação deve ser capaz de encaminhar mensagens destes *workspaces* considerando diferentes níveis de prioridade.

As configurações iniciais de dispositivos devem fazer parte do *bootstrap* da rede. Esta funcionalidade faz parte do trabalho de outros pesquisadores dentro do grupo MEHAR, a arquitetura ETArch-SG pode ser usada como caso de uso dentro dos experimentos que vêm sendo realizados.

Um próximo passo importante é implementar as funcionalidades para que o SUPERVISOR, de fato, coordene as ações para o *attach* de entidades. O *analytics* dos dados recebidos pelo SUPERVISOR também pode ser um aspecto explorado em trabalhos futuros envolvendo aprendizado de máquina e aprendizado profundo.

## 5.2 Contribuições em Produção Bibliográfica

✓ Artigo enviado ao Journal of Network and Computer Applications (2017)- *Applying Future Internet Architectures to Leverage Smart Grid Communications* (DIAS et al., 2017).

✓ Artigo apresentado no IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) 2018) - *ETArch-SG - a SDN-based architecture to support the communication requirements of future smart grids* (DIAS et al., 2018).

---

## Referências

- 5GPPP. *5G and Energy Whitepaper*. [S.l.], 2015. Disponível em: <[https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White\\_Paper-on-Energy-Vertical-Sector.pdf](https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White_Paper-on-Energy-Vertical-Sector.pdf)>.
- BAKER, F.; MEYER, D. **RFC 6272: Internet Protocols for the Smart Grid - IETF**. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6272.txt>>.
- BRAND, K. P.; OSTERTAG, M.; WIMMER, W. Safety related, distributed functions in substations and the standard iec 61850. In: **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**,. [s.n.], 2003. v. 2, p. 5 pp. Vol.2-. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304319>>.
- BRYSON, J.; GALLAGHER, P. Nist framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 2.0. **National Institute of Standards and Technology (NIST), Tech. Rep. NIST Special Publication 1108R2**, NIST - National Institute of Standards and Technology, p. 2-0, 2012.
- BUSH, S. F. **Smart Grid: Communication-Enabled Intelligence for the Electric Power Grid**. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2014. ISBN 978-1-119-97580-9.
- CAHN, A. et al. Software-defined energy communication networks: From substation automation to future smart grids. In: **Smart Grid Communications (Smart-GridComm), 2013 IEEE International Conference on**. [s.n.], 2013. p. 558-563. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2013.6688017>>.
- CLEVELAND, F. Iec tc57 wg15: Iec 62351 security standards for the power system information infrastructure. **White Paper**, 2012.
- CLEVELAND, F. M. Iec 61850-7-420 communications standard for distributed energy resources (der). In: **2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. [s.n.], 2008. p. 1-4. ISSN 1932-5517. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596553>>.
- DEVICE Language Message Specification (DLMS): the basis for interoperability. [S.l.], 2016. Disponível em: <[http://dlms.com/downloads/161109\\_dlms\\_folder\\_web\\_singlepage.pdf](http://dlms.com/downloads/161109_dlms_folder_web_singlepage.pdf)>.
- DIAS, A. et al. ETArch-SG - a SDN-based architecture to support the communication requirements of future smart grids. In: **2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) (ISCC 2018)**. Natal, Brazil: [s.n.], 2018.

\_\_\_\_\_. Applying future internet architectures to leverage smart grid communications. **Journal of Network and Computer Applications**, 2017. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.05.006>>.

DIERKS, T. **The Transport Layer Security (TLS) Protocol - Version 1.2**. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://trac.tools.ietf.org/html/rfc5246>>.

DONG, X. et al. Software-defined networking for smart grid resilience: Opportunities and challenges. In: **Proceedings of the 1st ACM Workshop on Cyber-Physical System Security**. New York, NY, USA: ACM, 2015. (CPSS '15), p. 61–68. ISBN 978-1-4503-3448-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2732198.2732203>>.

DORSCH, N. et al. Software-defined networking for smart grid communications: Applications, challenges and advantages. In: **2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)**. [s.n.], 2014. p. 422–427. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2014.7007683>>.

FALK, H.; BURNS, M. **MMS and ASN.1 Encodings: Simple Examples and Explanations on How to Crack an MMS PDU**. [S.l.], 1997.

FANG, X. et al. Smart grid — the new and improved power grid: A survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 14, n. 4, p. 944–980, Fourth 2012. ISSN 1553-877X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087>>.

FCCC. **United Nations: Framework Convention on Climate Change**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://unfccc.int/2860.php>>.

FRAMEWORK, N. Roadmap for smart grid interoperability standards, release 2.0 (2012). **NIST Special Publication**, v. 1108, 2012.

GALLAGHER, P. D. Nist framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 1.0. **National Institute of Standards and Technology (NIST), Tech. Rep. NIST Special Publication 1108**, NIST - National Institute of Standards and Technology, 2010.

GALLI, S.; SCAGLIONE, A.; WANG, Z. Power line communications and the smart grid. In: **2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications**. [s.n.], 2010. p. 303–308. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622060>>.

GELLINGS, C. W. **Enhancing the Ability to Meet Customer Needs**. [S.l.], 2007. Disponível em: <<https://www.nema.org/Products/Documents/EPRIMay2007.pdf>>.

GHOSH, U. et al. A simulation study on smart grid resilience under software-defined networking controller failures. In: **Proceedings of the 2Nd ACM International Workshop on Cyber-Physical System Security**. New York, NY, USA: ACM, 2016. (CPSS '16), p. 52–58. ISBN 978-1-4503-4288-9. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2899015.2899020>>.

GONÇALVES, M. A. et al. Multicast traffic aggregation through entity title model. Citeseer.



GOODNEY, A. et al. Efficient pmu networking with software defined networks. In: **2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)**. [s.n.], 2013. p. 378–383. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2013.6687987>>.

GUIMARÃES, C. et al. Ieee 802.21-enabled entity title architecture for handover optimization. In: IEEE. **2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. [S.l.], 2014. p. 2671–2676.

GUO, C. et al. An open architecture for information communication systems for multilevel electric power control centers. **Kybernetes**, v. 39, n. 8, p. 1270–1281, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/03684921011063556>>.

IEC. **IEC 60870 International Standard: Telecontrol Equipment and Systems**. [S.l.], 1989. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-5 International Standard: Communication Requirements for Functions and Devices Models**. [S.l.], 2003. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-7-2 International Standard: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment - Abstract Communication Service Interface (ACSI)**. [S.l.], 2003. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-6 International Standard: Configuration description language for communication in electrical substation related to IEDs**. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-8-1 International Standard: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3**. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-9-2 International Standard: Specific Communication Service Mapping (SCSM - Sampled Values over ISO/IEC 8802-3)**. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-90-1 Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-1: Use of IEC 61850 for the communication between substations**. [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-90-5 Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-5: Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118**. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61970-301 International Standard: Energy management system application program interface (EMS-API) - Part 301: Common information model (CIM) base**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-90-2 Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-2: Using IEC 61850 for the communication between substations and control centres.** [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-7-4 Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-4: Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes.** [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y9fp8afp>>.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850 Standards and Specifications.** [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>>.

\_\_\_\_\_. **About the IEC - vision & mission.** [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.iec.ch/about/>>.

IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications. **IEEE Std 1901-2010**, p. 1–1586, Dec 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5678772>>.

IEEE Standard for Electric Power Systems Communications – Distributed Network Protocol (DNP3). **IEEE Std 1815-2010**, p. 1–775, July 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5518537>>.

ISBN. **ISBN: 978-92-807-3465-2 Job Number: DEW/1917/NA United Nations Environment Programme.** [S.l.], 2015.

ISO. **ISOIEC 9506-1 Industrial Automation Systems - Manufacturing Message Specification - Part 1: Service Definition.** [S.l.], 2003. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/>>.

\_\_\_\_\_. **ISOIEC 9506-1 Industrial Automation Systems - Manufacturing Message Specification - Part 2: Protocol Specification.** [S.l.], 2003. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/>>.

ITU-R. **Smart grid utility management systems: report ITU-R SM.2351-1.** [S.l.], 2016. Disponível em: <[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2351-1-2016-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2351-1-2016-PDF-E.pdf)>.

ITU-T. **ITU-T Smart Grid Focus Group Activity.** [S.l.], 2011. Disponível em: <[https://docbox.etsi.org/workshop/2011/201104\\_smartgrids/02\\_STANDARDS/ITUTSGFocusGroup\\_Martigne.pdf](https://docbox.etsi.org/workshop/2011/201104_smartgrids/02_STANDARDS/ITUTSGFocusGroup_Martigne.pdf)>.

JARARWEH, Y. et al. Software defined based smart grid architecture. In: **2015 IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA).** [s.n.], 2015. p. 1–7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/AICCSA.2015.7507269>>.

JIANG, Z. et al. A sinet-based communication architecture for smart grid. In: **Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), 2015 International.** [s.n.], 2015. p. 298–301. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ATNAC.2015.7366829>>.

- KURODA, K. et al. Key ict solutions for realizing smart grid. In: **Smart Grid Engineering (SGE), 2012 IEEE International Conference on**. [s.n.], 2012. p. 1–8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SGE.2012.6463953>>.
- LEMA, J. C. Evolving future internet clean-slate entity title architecture with quality-oriented control-plane extensions. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- LOPES, Y. **SMARTFlow: SisteMa Autoconfigurável para Redes de Telecomunicações IEC 61850 com arcabouço OpenFlow**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense - UFF, 2013. Disponível em: <https://goo.gl/kKxGVp>.
- LOPES, Y.; FERNANDES, N. C.; MALCHER, C. A. Smartflow: Uma proposta para a autoconfiguração de redes de subestação iec 61850 baseada em openflow. **Anais do XIX Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços - WGRS 2014**, 2014.
- MACKIEWICZ, R. E. Overview of iec 61850 and benefits. In: **2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition**. [s.n.], 2006. p. 623–630. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296392>>.
- MELO, P. H. A. D. de. **Mecanismos de autenticação e controle de acesso para uma arquitetura de Internet do Futuro**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2017. Disponível em: <https://goo.gl/YMdXJA>.
- MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3. [S.l.], 2012. Disponível em: <[http://www.modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b3.pdf](http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf)>.
- NETO, A. et al. Session-oriented communication system for truly reliable and robust smart grid. In: **2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)**. [s.n.], 2011. p. 1094–1099. ISSN 2166-0077. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162347>>.
- NGUYEN, K. K.; CHERIET, M. Enabling infrastructure as a service (iaas) on ip networks: from distributed to virtualized control plane. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 1, p. 136–144, January 2013. ISSN 0163-6804. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6400450>>.
- PANAJOTOVIC, B.; JANKOVIC, M.; ODADZIC, B. Ict and smart grid. In: **Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), 2011 10th International Conference on**. [s.n.], 2011. v. 1, p. 118–121. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TELSKS.2011.6112018>>.
- PEREIRA, J. H. de S. et al. The future internet: Future internet assembly 2011: Achievements and technological promises. In: \_\_\_\_\_. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. cap. Title Model Ontology for Future Internet Networks, p. 103–114. ISBN 978-3-642-20898-0. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20898-0\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20898-0_8)>.
- PONT, A.; PUJOLLE, G.; RAGHAVAN, S. **Communications: Wireless in Developing Countries and Networks of the Future: 3rd IFIP TC 6 International Conference, WCITD 2010 and IFIP TC 6 International**

**Conference, NF 2010, Held as Part of WCC 2010, Brisbane, Australia, September 20-23, 2010, Proceedings.** Springer Berlin Heidelberg, 2010. (IFIP Advances in Information and Communication Technology). ISBN 9783642154768. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=2dOpCAAAQBAJ>>.

QURESHI, M. et al. A survey of communication network paradigms for substation automation. In: **Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on.** [s.n.], 2008. p. 310–315. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ISPLC.2008.4510445>>.

RANA, A. S. et al. Exploring iee standard for synchrophasor c37.118 with practical implementation. In: **2015 Annual IEEE India Conference (INDICON).** [s.n.], 2015. p. 1–6. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443664>>.

SABBAH, A. I.; EL-MOUGY, A.; IBNKAHLA, M. A survey of networking challenges and routing protocols in smart grids. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 1, p. 210–221, Feb 2014. ISSN 1551-3203. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TII.2013.2258930>>.

SAPUTRO, N.; AKKAYA, K.; ULUDAG, S. A survey of routing protocols for smart grid communications. **Computer Networks**, Elsevier, v. 56, n. 11, p. 2742–2771, 2012.

SCHOSSIG, T. Iec 61850 testing in edition 2 - a systematisation. In: **11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012).** [s.n.], 2012. p. 1–4. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/cp.2012.0012>>.

SCHWARZ, K. **Manufacturing Message Specification ISO 9506 (MMS).** [S.l.], 2008.

SILVA, F. de O. **Endereçamento por título: uma forma de encaminhamento multicast para a próxima geração de redes de computadores.** Tese (Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-22092014-111409/>.

SILVA, F. de O. et al. On the analysis of multicast traffic over the entity title architecture. In: **2012 18th IEEE International Conference on Networks (ICON).** [s.n.], 2012. p. 30–35. ISSN 1531-2216. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICON.2012.6506529>>.

\_\_\_\_\_. Enabling Future Internet Architecture Research and Experimentation by Using Software Defined Networking. In: **Software Defined Networking (EWSN), 2012 European Workshop on.** [S.l.: s.n.], 2012. p. 73–78.

SNYDER, A.; STUBER, M. G. The ansi c12 protocol suite-updated and now with network capabilities. In: **IEEE. Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2007. PSC 2007.** [S.l.], 2007. p. 117–122.

SORENSEN, J. T.; JAATUN, M. G. **A Description of the Manufacturing Message Specification (MMS).** [S.l.], 2007.

THOMPSON, P. Smart networks for smart grids and smart cities. **2nd International Workshop on Smart Grid Technology and Data Processing**, 2016.

UCA. **Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850-9-2**. [S.l.], 2004. Disponível em: <[http://iec61850.ucaiug.org/Implementation%20Guidelines/DigIF\\_spec\\_9-2LE\\_R2-1\\_040707-CB.pdf](http://iec61850.ucaiug.org/Implementation%20Guidelines/DigIF_spec_9-2LE_R2-1_040707-CB.pdf)>.

UFU. **Arquitetura Adaptável para Redes Convergentes**. [S.l.]. Disponível em: <<http://mehar.facom.ufu.br/projects/a2rcon>>.

VEJLGAARD, B. et al. Coverage and capacity analysis of sigfox, lora, gprs, and nb-iot. In: **2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**. [s.n.], 2017. p. 1–5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108666>>.

YAN, Y. et al. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 15, n. 1, p. 5–20, First 2013. ISSN 1553-877X.

YAQOOB, I. et al. Internet of things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges. **IEEE Wireless Communications**, v. 24, n. 3, p. 10–16, 2017. ISSN 1536-1284. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600421>>.

YOUNG, R. et al. **The 2014 International Energy Efficiency Scorecard: Report Number E1402**. Washington, DC, 2014. Disponível em: <<http://aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/e1402.pdf>>.



## Apêndices





---

## Projeto A2RCON

### A.1 A2RCON

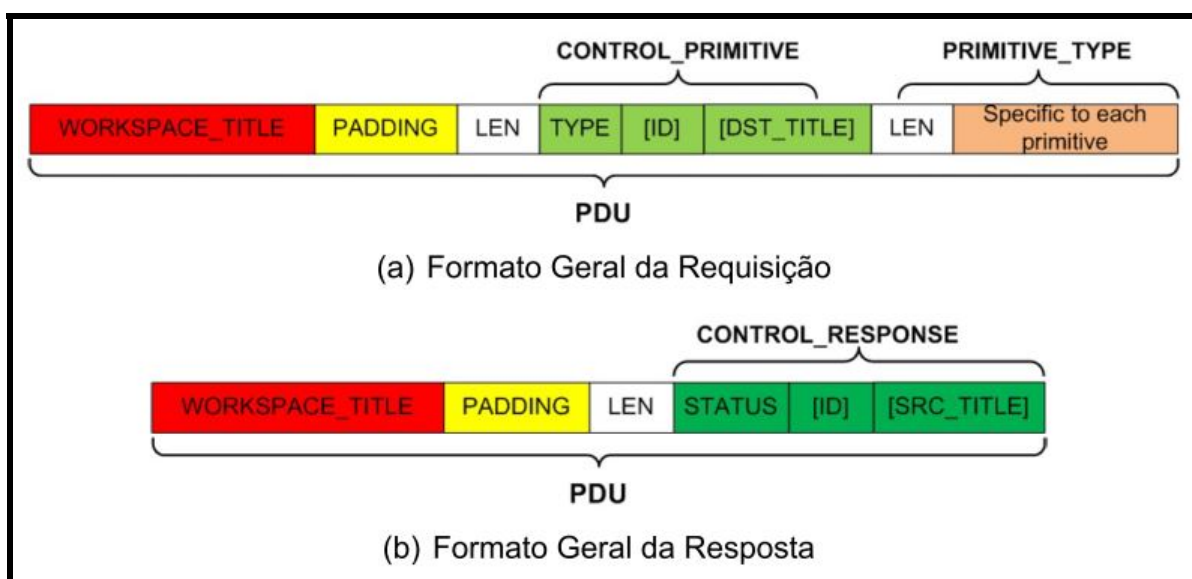
O A2RCON é um projeto que foi aprovado em 2014 dentro do Programa Ciência sem Fronteiras, com financiamento de recursos dado pelo CNPQ. O objetivo do projeto é desenvolver uma arquitetura de rede reconfigurável, pensada para atender os requisitos das NGN (*Next Generation Network*) e com vistas aos avanços da tecnologia 5G, utilizando mecanismos de SDN com foco inicial de suporte ao tráfego de vídeo. O projeto contempla um plano de missões que envolve uma parceria com o Instituto Tecnológico de Aveiro - Portugal, consolidada através de pesquisas em conjunto com a Universidade Federal de Uberlândia, e a troca de experiências lideradas pelo Prof. Dr. Rui Aguiar, representando a comunidade internacional e, no Brasil, através da coordenação do projeto A2RCON realizada pelos professores Dr. Flávio de Oliveira Silva e Dr. Pedro Frosi Rosa, ambos pertencentes à FACOM. Dada a dimensão da proposta aqui apresentada e considerando a dependência da colaboração em diferentes áreas, a evolução deste doutorado está diretamente relacionada ao trabalho do grupo A2RCON, uma parte da pesquisa consistiu na criação de um *slice* para testes que serão utilizados dentro do projeto deste grupo. Os experimentos que foram realizados neste trabalho estão prontos para serem testados no A2RCON. Ainda, conforme previsto no projeto do A2RCON, durante o ano de 2016 e início de 2017, uma parte do trabalho apresentado neste documento foi realizado no Instituto Tecnológico de Aveiro, em esquema de doutorado sanduíche.



## Primitivas de Serviço

Este apêndice detalha as primitivas utilizadas pela arquitetura Etarch-SG. As Figuras 54 (a) e (b) mostram, respectivamente, os formatos das primitivas de requisição e resposta. O título do *workspace*, um campo de preenchimento e o comprimento da primitiva são campos presentes nos dois formatos de primitiva do PDU. Nas primitivas de controle existem cinco campos: (1) TYPE - que identifica o tipo da primitiva; (2) ID - é o identificador da requisição, presente nos dois formatos; (3) DST\_TITLE - título da entidade de destino; (4) STATUS - status de uma requisição; (5) SRC\_TITLE - título da entidade de origem. A PRIMITIVE\_TYPE representa um dos diversos tipos que uma primitiva pode assumir.

Figura 54 – Formato geral das primitivas da Etarch-SG.



Fonte: (SILVA, 2013).

## B.1 SG-REGISTER

Para que seja possível realizar qualquer tipo de comunicação no plano de dados é preciso que todas as entidades envolvidas estejam registradas no DTS. No *workspace* de energia e controle, o SUPERVISOR é o responsável pela configuração de todos os dispositivos da rede. A configuração inicial é feita através do serviço SG-REGISTER e suas primitivas. Excluindo-se o SUPERVISOR, que se atacha, todas as demais entidades identificam algum tipo de IED, o qual encaminha uma solicitação ao SUPERVISOR para que este faça o seu registro e retorne o arquivo de configuração solicitado.

As primitivas que são usadas por este serviço são descritas a seguir:

### B.1.1 SG-REGISTER.req

Todos os dispositivos inteligentes da rede precisam ser configurados de forma a atender os requisitos de funcionamento da subestação e às políticas definidas pela concessionária de energia. A configuração dos IEDs é feita através do carregamento do arquivo de configurações, o qual é usado para atualizar diversos parâmetros de acordo com o tipo de dispositivo. A primitiva SG-REGISTER.req é usada para requisitar o registro da entidade na base de dados do SUPERVISOR e, em seguida, obter o arquivo de configurações correspondente ao tipo de IED requisitante. A Tabela 5 mostra as primitivas de controle do SG-REGISTER.req e suas descrições.

Tabela 5 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.req

Primitiva de controle	Descrição
ied_title	Título da entidade a ser registrada. A nomenclatura segue à padronização do IEC 61850
type	Identifica o tipo de entidade da <i>Smart Grid</i> que pode ser qualquer um dos IEDs (P&C, Atuador ou PMU).
requirements.	Define os requisitos de comunicação associados a entidade

### B.1.2 SG-REGISTER.ind

A primitiva SG-REGISTER.ind atua na interface do SUPERVISOR para verificar se o título do IED já se encontra na base de dados ou se deve ser feito o registro. Nas duas situações o SUPERVISOR monta uma mensagem de retorno contendo o arquivo de configurações do IED. A Tabela 6 mostra as primitivas de controle do SG-REGISTER.ind e suas descrições.

Tabela 6 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.ind

Primitiva de controle	Descrição
ied_title	Título da entidade que será registrada na base de dados do SUPERVISOR e que está associado ao arquivo de configurações do IED
type	Identifica o tipo de IED que está sendo registrado
requirements.	Mantém todos os requisitos de comunicação da entidade associados à entidade cujo título está sendo registrado

### B.1.3 SG-REGISTER.resp

A primitiva SG-REGISTER.resp retorna as informações de controle sobre a requisição de registro da entidade, a qual pode ter sido realizada com sucesso, pode ter sido sobrescrita, caso a entidade já tenha sido registrada anteriormente, ou ainda, pode não ter sido possível efetuar o registro por algum motivo como, por exemplo, falta de memória ou uso de um nome incompatível para o título do IED. A Tabela 7 mostra as primitivas de controle do SG-REGISTER.resp e suas descrições.

Tabela 7 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.resp

Primitiva de controle	Descrição
ied_title	Título da entidade que pode ou não ter sido registrada na base de dados do SUPERVISOR
status	Apresenta o valor "0"(registro efetuado com sucesso) ou "1"(falha no registro)
ied_file	Relaciona o arquivo .xml com as configurações do IED correspondente, caso o registro tenha sido efetivado, caso contrário não retorna nenhum valor

### B.1.4 SG-REGISTER.conf

A primitiva SG-REGISTER.conf carrega o arquivo de configurações do IED solicitado através do pedido de registro no SUPERVISOR. A Tabela 8 mostra as primitivas de controle do SG-REGISTER.conf e suas descrições.

Tabela 8 – Atributos da primitiva SG-REGISTER.conf

Primitiva de controle	Descrição
status	Apresenta o valor "0"(registro efetuado com sucesso) ou "1"(falha no registro)
ied_file	Contém o arquivo de configurações do IED, caso o registro tenha sido efetuado com sucesso, ou apresenta um campo vazio, caso o título do IED não tenha sido registrado

## B.2 GOOSE-INFORMATION

A primitiva de serviço GOOSE-INFORMATION atua no *workspace* de comunicação horizontal, onde mensagens do tipo GOOSE são trocadas entre os dispositivos de proteção e controle. Por se tratar de um serviço sem confirmação de entrega das mensagens, no diagrama de sequência mostrado na Figura 29 a primitiva GOOSE-INFORMATION.req aparece utilizando uma comunicação *multicast* para levar as informações coletadas da rede até os dispositivos que têm interesse nestes dados, incluindo o SUPERVISOR, que realiza apenas o *analytics* das mensagens dentro deste *workspace*.

As primitivas que são usadas por este serviço são descritas a seguir:

### B.2.1 GOOSE-INFORMATION.req

A primitiva GOOSE-INFORMATION.req leva as sucessivas informações dos parâmetros medidos a partir do *grid* até o conjunto de dispositivos de proteção e controle para os quais estas mensagens são relevantes. A Tabela 9 mostra as primitivas de controle do GOOSE-INFORMATION.req e suas descrições.

Tabela 9 – Atributos da primitiva GOOSE-INFORMATION.req

Primitiva de controle	Descrição
ied_title_origem	Título da entidade que está enviando as mensagens GOOSE
ied_title_dest	Contém os títulos das entidades para os quais as mensagens GOOSE são destinadas, incluindo o SUPERVISOR
data	Informações de dados da rede no formato GOOSE

### B.2.2 GOOSE-INFORMATION.ind

A primitiva GOOSE-INFORMATION.ind entrega as mensagens GOOSE com as informações coletadas da rede para que o IED acompanhe o *status* do sistema ao qual está ligado e execute alguma ação em caso de anomalia detectada (p.ex. sobrecorrente). O SUPERVISOR, por sua vez, realiza o *analytics* destes dados. A Tabela 10 mostra as primitivas de controle do GOOSE-INFORMATION.ind e suas descrições.

Tabela 10 – Atributos da primitiva GOOSE-INFORMATION.ind

Primitiva de controle	Descrição
ied_title_origem	Título da entidade que gerou a mensagem GOOSE
data	Mensagem no formato GOOSE que será analisada pelo IED receptor e pelo SUPERVISOR

## B.3 SV-INFORMATION

A primitiva de serviço SV-INFORMATION atua no *workspace* de comunicação vertical, onde mensagens do tipo SV são enviadas a partir dos atuadores, ao nível de processo, até os dispositivos de proteção e controle, ao nível de vão. Este é um serviço sem confirmação de entrega das mensagens, onde utiliza-se um formato *multicast* para levar as informações coletadas pelos atuadores até o sistema de proteção. Neste caso, o SUPERVISOR também recebe as mensagens SV para realizar o *analytics*.

As primitivas que são usadas por este serviço são descritas a seguir:

### B.3.1 SV-INFORMATION.req

A primitiva SV-INFORMATION.req leva as informações dos parâmetros medidos pelos atuadores até o conjunto de dispositivos de proteção e controle em que estão ligados e também para o SUPERVISOR. A Tabela 11 mostra as primitivas de controle do SV-INFORMATION.req e suas descrições.

Tabela 11 – Atributos da primitiva SV-INFORMATION.req

Primitiva de controle	Descrição
ied_title_origem	Título da entidade que está enviando as mensagens SV
ied_title_dest	Contém os títulos das entidades para os quais as mensagens SV são destinadas, incluindo o SUPERVISOR
data	Informações de dados, no formato SV, coletados pelos atuadores

### B.3.2 SV-INFORMATION.ind

A primitiva SV-INFORMATION.ind entrega as mensagens SV contendo informações coletadas dos atuadores ao nível de processo, que serão analisadas pelos dispositivos de proteção e controle ao nível de vão. Como já mencionado anteriormente, o SUPERVISOR realiza apenas o *analytics* destes dados. A Tabela 12 mostra as primitivas de controle do SV-INFORMATION.ind e suas descrições.

Tabela 12 – Atributos da primitiva SV-INFORMATION.ind

Primitiva de controle	Descrição
ied_title_origem	Título da entidade que gerou a mensagem SV
data	Mensagem no formato SV que será analisada pelo dispositivo de proteção e controle e pelo SUPERVISOR

## B.4 MMS-SERVICE

A primitiva de serviço MMS-SERVICE atua no *workspace* de aferição de dados, no qual o SUPERVISOR, esporadicamente, utiliza mensagens MMS para coletar informações dos atuadores ao nível de processo. Trata-se de um serviço onde há confirmação das mensagens entregues e o formato utilizado é sempre *unicast*.

As primitivas que são usadas por este serviço são descritas a seguir:

### B.4.1 MMS-SERVICE.req

A primitiva MMS-SERVICE.req é usada para que o SUPERVISOR consulte um determinado atuador sobre um ou mais parâmetros por ele aferidos. A Tabela 13 mostra as primitivas de controle do MMS-SERVICE.req e suas descrições.

Tabela 13 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.req

Primitiva de controle	Descrição
ied_title	Título da entidade que será consultada para enviar as informações do nível de processo
info_request	Informações solicitadas pelo SUPERVISOR a um atuador, usando mensagens MMS

### B.4.2 MMS-SERVICE.ind

A primitiva MMS-SERVICE.ind é usada pelo atuador para verificar os valores aferidos em conformidade com os parâmetros requisitados pelo SUPERVISOR. A Tabela 14 mostra a primitiva de controle do MMS-SERVICE.ind e sua descrição.

Tabela 14 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.ind

Primitiva de controle	Descrição
info_request	Parâmetros informados pelo SUPERVISOR para consulta dos valores aferidos pelo atuador

### B.4.3 MMS-SERVICE.resp

A primitiva MMS-SERVICE.resp contém as medidas aferidas pelo atuador que serão encaminhados para o SUPERVISOR usando uma mensagem no formato MMS. A Tabela 15 mostra a primitiva de controle do MMS-SERVICE.resp e sua descrição.



Tabela 15 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.resp

Primitiva de controle	Descrição
info_response	Conjunto de parâmetros de interesse do SUPERVISOR, que estão relacionados às medidas aferidas pelo atuador

#### B.4.4 MMS-SERVICE.conf

A primitiva MMS-SERVICE.conf contém o conjunto de medidas aferidas pelo atuador no formato solicitado pelo SUPERVISOR. A Tabela 16 mostra a primitiva de controle do MMS-SERVICE.conf e sua descrição.

Tabela 16 – Atributos da primitiva MMS-SERVICE.conf

Primitiva de controle	Descrição
info_response	Informações solicitadas pelo SUPERVISOR ao atuador, no formato MMS

## B.5 PMU-CONTROL

A primitiva de serviço PMU-CONTROL atua no *workspace* de dados fasoriais espontâneos, no qual o SUPERVISOR, controla o acionamento das mensagens que são geradas e enviadas pelos PMUs de fora da subestação. Usando uma janela temporal, o SUPERVISOR coleta as mensagens, que podem ser no formato GOOSE ou SV, transmitidas por um conjunto de PMUs, usando uma comunicação *multicast*. As mensagens enviadas durante este intervalo são ordenadas pela função de AGREGADOR do SUPERVISOR e, do *stream* resultante é realizado o *analytics*.

As primitivas que são usadas por este serviço são descritas a seguir:

### B.5.1 PMU-CONTROL.req

A primitiva PMU-CONTROL.req é usada para que o SUPERVISOR acione (ou interrompa) a janela de transmissão das informações provenientes de um conjunto de PMUs. A Tabela 17 mostra as primitivas de controle do PMU-CONTROL.req e suas descrições.

Tabela 17 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.req

Primitiva de controle	Descrição
pmu_title	Relação de títulos dos PMUs que compõem uma instância do <i>workspace</i> de dados fasoriais espontâneos
command	Parâmetro usado para iniciar ou interromper a transmissão de mensagens dos PMUs

### B.5.2 PMU-CONTROL.ind

A primitiva PMU-CONTROL.ind é usada pelo PMU como sinal para iniciar ou interromper uma transmissão de dados espontâneos. A Tabela 18 mostra a primitiva de controle do PMU-CONTROL.ind e sua descrição.

Tabela 18 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.ind

Primitiva de controle	Descrição
command	Valor usado pelo PMU para iniciar ("0") ou parar ("1") a transmissão de mensagens espontâneas.

### B.5.3 PMU-CONTROL.resp

A primitiva PMU-CONTROL.resp contém o *time stamp* do instante em que os dados foram coletados das linhas de transmissão e as informações desta coleta. A Tabela 19 mostra as primitivas de controle do PMU-CONTROL.resp e sua descrição.

Tabela 19 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.resp

Primitiva de controle	Descrição
time_stamp	Informação sobre horário em que a aferição de dados foi realizada
pmu_data	Conjunto de dados coletados pelo PMU

### B.5.4 PMU-CONTROL.conf

A primitiva PMU-CONTROL.conf carrega os dados coletados por um determinado PMU e a informação do momento em que essa coleta foi realizada. A Tabela 20 mostra as primitivas de controle do PMU-CONTROL.conf e sua descrição.

Tabela 20 – Atributos da primitiva PMU-CONTROL.conf

Primitiva de controle	Descrição
pmu_title	Título que identifica o PMU dentre um grupo de dispositivos similares no mesmo <i>workspace</i>
time_stamp	Valor que indica o momento em que os dados foram coletados pelo PMU
pmu_data	Mensagem, no formato GOOSE ou SV, contendo os dados coletados pelos PMUs sobre aferições nas linhas de transmissão

## B.6 PMU-SERVICE

A primitiva de serviço PMU-SERVICE atua no *workspace* de dados fasoriais sob demanda, no qual o SUPERVISOR, esporadicamente, interaja com um PMU tanto para

coletar valores de aferição específicos, quanto para alterar configurações do dispositivo *on the fly*.

As primitivas que são usadas por este serviço são descritas a seguir:

### B.6.1 PMU-SERVICE.req

A primitiva PMU-SERVICE.req é usada para que o SUPERVISOR acione um determinado PMU para coleta de dados ou para atualizar suas configurações. A Tabela 21 mostra as primitivas de controle do PMU-SERVICE.req e suas descrições.

Tabela 21 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.req

Primitiva de controle	Descrição
pmu_title	Conjunto de títulos de PMUs (um ou mais) que serão acionados para troca de informações
get_info	Contém os atributos cujas informações estão sendo consultadas pelo SUPERVISOR
set_info	Contém os atributos cujas informações estão sendo usadas para atualização das configurações do PMU

### B.6.2 PMU-SERVICE.ind

A primitiva PMU-SERVICE.ind é usada pelo PMU para consultar os valores aferidos dos parâmetros indicados, ou para atualizar parâmetros no PMU. A Tabela 22 mostra as primitivas de controle do PMU-SERVICE.ind e sua descrição.

Tabela 22 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.ind

Primitiva de controle	Descrição
get_info	Parâmetros cujas aferições estão sendo solicitadas. Se estiver em branco, nenhuma consulta é feita
set_info	Parâmetros valores estão sendo atualizados ou configurados. Se estiver em branco, nenhuma atualização é feita

### B.6.3 PMU-SERVICE.resp

A primitiva PMU-SERVICE.resp contém o *time stamp* do instante em que o PMU realizou uma aferição de dados ou do instante que ele está recebendo uma atualização do SUPERVISOR. A Tabela 23 mostra as primitivas de controle do PMU-SERVICE.resp e sua descrição.

Tabela 23 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.resp

Primitiva de controle	Descrição
time_stamp	Informação sobre horário em que a aferição de dados foi realizada ou o instante em que o PMU foi atualizado
status	Valor que indica se a tarefa de consulta ou atualização de configurações foi realizada com sucesso ("0") ou não ("1")
pmu_data	Conjunto de dados coletados pelo PMU. Esta primitiva é vazia não houver consulta dos valores aferidos

#### B.6.4 PMU-SERVICE.conf

A primitiva PMU-SERVICE.conf carrega os dados coletados de um PMU acionado por demanda, ou retorna o *status* de uma atualização de configuração realizada. A Tabela 24 mostra as primitivas de controle do PMU-CONTROL.conf e sua descrição.

Tabela 24 – Atributos da primitiva PMU-SERVICE.conf

Primitiva de controle	Descrição
pmu_title	Título que identifica o PMU aferido ou atualizado
time_stamp	Valor que indica o momento em que os dados foram coletados pelo PMU ou o instante em que o PMU foi atualizado
status	Valor que indica se houve sucesso ("0") na obtenção dos valores aferidos ou na atualização das configurações, ou se esta requisição não pode ser realizada ("1")
pmu_data	Mensagem, no formato GOOSE ou SV, contendo os dados solicitados pelo SUPERVISOR. Caso o serviço seja de atualização de dados, esta primitiva de controle é vazia