

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

FERNANDO TEIXEIRA SPIRONELLO  
HENRIQUE DA SILVA LOPES  
LARISSA ALVES BARBOSA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO  
BASEADOS NO PADRÃO IEC 61850**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA  
2015**

**FERNANDO TEIXEIRA SPIRONELLO  
HENRIQUE DA SILVA LOPES  
LARISSA ALVES BARBOSA**

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO  
BASEADOS NO PADRÃO IEC 61850**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do Curso Superior de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto

**CURITIBA  
2015**

# Análise de confiabilidade em sistemas de proteção baseados no padrão IEC 61850

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 10 de julho de 2015.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Industrial Elétrica ênfase Eletrotécnica do DAELT

## **ORIENTAÇÃO**

---

Ulisses Chemin Netto, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Álvaro Augusto W. de Almeida, Msc.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Paulo Cicero Fritzen, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Vilmair Ermenio Wirmond, Msc.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedicamos esse trabalho a todos em nossas  
vidas que tornaram nossos sonhos possíveis.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus por nos conservar perseverantes durante a nossa trajetória.

Agradecemos ao nosso orientador prof. Dr. Ulisses Chemin Netto pela paciência e apoio despendidos durante a realização deste trabalho, por toda sua dedicação em compartilhar seus conhecimentos.

Agradecemos aos nossos pais Rosemary e Carlos (Fernando), Sirlei e Izail (Henrique), Ana Lúcia e Miguel (Larissa) por nos ter dado todo o suporte, conselho e amor necessários para que pudéssemos atingir essa conquista.

Agradecemos aos nossos familiares, amigos e amores que também estiveram presentes durante esta jornada, apoiando-nos nos momentos de dificuldade.

Agradecemos aos professores participantes da banca examinadora por contribuir no aprimoramento do nosso trabalho.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

**Charles Chaplin**

## RESUMO

SPIRONELLO, Fernando Teixeira. DA SILVA, Henrique Lopes. BARBOSA, Larissa Alves. **ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO BASEADOS NO PADRÃO IEC 61850**. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Elétrica), Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2015.

Este trabalho apresenta as características e componentes de redes de comunicação para automação de subestações baseado no padrão IEC 61850. As topologias de rede em anel, estrela e estrela dupla foram analisadas para o estudo de confiabilidade e a respectiva viabilidade de utilização. Dentre os métodos utilizados para tal análise, além das próprias características construtivas e de funcionamento de cada topologia, o modelo de estado de Markov e árvore de falhas foram empregados. O estudo das respectivas análises de disponibilidade e confiabilidade representada pelo tempo médio de falha gerado por cada topologia foi evidenciado quantitativamente, concluindo que a duplicação da rede na topologia em estrela dupla para o estudo de caso proposto fornece uma maior confiabilidade e disponibilidade entre as três configurações abordadas.

**Palavras-chave:** IEC 61850, Automação de Subestação, Interoperabilidade, Confiabilidade, Redes de comunicação.

## ABSTRACT

Spironello, Fernando Teixeira. DA SILVA, Henrique Lopes. BARBOSA, Larissa Alves. **ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF PROTECTION SYSTEMS BASED ON THE STANDARD IEC 61850.** 67 f. Term paper (Degree in Electrical Engineering), Academic Department of Electrical, Federal Technological University of Paraná. Curitiba. 2015.

This paper introduces the features and components of communication networks for substation automation based on the standard IEC 61850. The ring, star and double star network topologies were analyzed for the study of reliability, availability and its feasibility of use. Among the methods used for analysis, besides the own construction and operation features of each topology, it was adopted the Markov state model and the tree failures. The respective availability and reliability studies represented by the Mean Time to Failure generated by each topology has been shown quantitatively, concluding that the duplication of the double star network topology for the proposed case study provides greater reliability and availability of the three addressed configurations.

**Keywords:** IEC 61850, Substation Automation, Interoperability, Reliability, Communication Networks.



## LISTA DE SIGLAS

ACSI - *Abstract Communication Service Interface*

CCN – *Controlador De Comunicações de Rede*

CID - *Configured IED Description*

CSMA/CD - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*

DAN - *Duplo Nó de Acesso*

GOOSE- *Generic Object Oriented System Events*

GSE - *Generic Substation Event*

HSR - *High-availability Seamless Redundancy*

ICD - *IED Capability Description*

IEC - *International Electrotechnical Commission*

IEDs - *Intelligent Electronic Devices*

IEEE - *Institute of Electric and Electronic Engineers*

IHM - *Interface Homem Máquina*

IP - *Internet Protocol*

ISO - *International Organization for Standardization*

LAN - *Local Area Network*

LN – *Logical Node*

LWT- *Listen While Talk*

MAC - *Media Access Control*

MMS - *Manufacturing Message Specification*

MTBF – *Mean Time Between Failures*

MTTF – *Mean Time to Failure*

MTTR- *Mean Time to Repair*

NC- *Network control*

NCC- *Network control center*

OSI- *Open Systems Interconnection*

PRP- *Parallel Redundant Protocol*

RSTP- *Rapid Spanning Tree Protocol*

SAS - *Sistema de Automação de Subestações*

SCD - *Substation Configuration Description*

SCL - *Substation Configuration Language*

SEs - *Subestações*

SSD - *System Specification Description*

SV- *Sampled Values*

TC – *Transformador de Corrente*

TCP - *Transmission Control Protocol*

TP – *Transformador de Potencial*

VLAN – *Virtual Local Area Network*

XLM – *Extensible Markup Language*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de um Dispositivo Eletrônico Inteligente.....	19
Figura 2 - Divisão de funções do sistema de comunicação.....	20
Figura 3 - Redes Ethernet. ....	22
Figura 4 - Função de hierarquia de IEC 61850.....	24
Figura 5 - Topologia em Anel.....	26
Figura 6 - Topologia em Estrela Simples.....	27
Figura 7 - Topologia em Estrela Dupla.....	28
Figura 8 - Exemplos de protocolos de comunicação. ....	31
Figura 9 - Arquitetura da Norma IEC 61850.....	32
Figura 10 - Representação da Pilha de Protocolos IEC 61850. ....	34
Figura 11 - Arquitetura de rede de comunicação. ....	35
Figura 12 - Exemplo de Repetição de Mensagens GOOSE. ....	36
Figura 13 - Modelo de estado Markov.....	42
Figura 14 - Exemplo de Árvore de falhas. ....	47
Figura 15 - Topologia Hipotética em Estrela. ....	49
Figura 16 – Árvore de falhas.....	51
Figura 17 – Topologia Hipotética em Anel.....	52
Figura 18 – Topologia Hipotética em Estrela Dupla.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista dos Grupos de Nós Lógicos.....	38
Tabela 2 - Disponibilidade e Confiabilidade das Topologias em Estrela, Anel e Estrela Dupla.....	60
Tabela 3 - Probabilidade de Segurança do Sistema de Switches das Topologias com Redundância.....	60
Tabela 4 – Comparativo entre as topologias.....	62

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>TEMA</b>	<b>14</b>
1.1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
<b>1.2</b>	<b>PROBLEMAS E PREMISSAS</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
1.3.1	OBJETIVO GERAL	16
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
<b>1.4</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>16</b>
<b>1.5</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>17</b>
<b>1.6</b>	<b>ESTRUTURA DO TRABALHO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS INTELIGENTES (IEDs)</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>REDES DE COMPUTADORES PARA AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>REDES <i>ETHERNET</i></b>	<b>21</b>
2.3.1	CARACTERÍSTICAS <i>ETHERNET</i> E COMPONENTES	22
<b>2.4</b>	<b>TOPOLOGIA DE REDE PARA SUBESTAÇÃO</b>	<b>23</b>
2.4.1	TOPOLOGIA EM ANEL	25
2.4.2	TOPOLOGIA EM ESTRELA SIMPLES	26
2.4.3	TOPOLOGIA EM ESTRELA DUPLA	27
<b>2.5</b>	<b>COMENTÁRIOS FINAIS</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>NORMA IEC 61850</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>PILHA DE PROTOCOLOS IEC 61850</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>NÓS LÓGICOS</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>LINGUAGEM DE CONFIGURAÇÃO DE SUBESTAÇÃO</b>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>VANTAGENS DO PADRÃO IEC 61850</b>	<b>39</b>
<b>3.5</b>	<b>COMENTÁRIOS FINAIS</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>MODELO DE ESTADO DE MARKOV</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>ANÁLISE DE CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E INDISPONIBILIDADE</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>ÁRVORE DE FALHAS</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>COMENTÁRIOS FINAIS</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>ANÁLISE DA TOPOLOGIA EM ESTRELA</b>	<b>49</b>
<b>5.2</b>	<b>ANÁLISE DA TOPOLOGIA EM ANEL</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>ANÁLISE DA TOPOLOGIA EM ESTRELA DUPLA</b>	<b>55</b>
<b>5.4</b>	<b>FATORES RELACIONADOS À CONFIABILIDADE E DESEMPENHO DA REDE</b>	<b>58</b>
5.4.1	EMPREGO DOS PROTOCOLOS HSR E PRP	58
5.4.2	LATÊNCIA DE COMUNICAÇÃO	58
5.4.3	FIBRA ÓPTICA	59
5.4.4	IEDS COM FUNÇÕES DE AUTO-SUPERVISÃO	59
<b>5.5</b>	<b>COMENTÁRIOS FINAIS</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>61</b>
<b>6.1</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 TEMA

Levando-se em consideração a complexidade de operação e controle nas subestações, tornou-se fundamental a aplicação de um Sistema de Automação de Subestação (SAS) em função de demandas por qualidade de serviço, redução de custos e confiabilidade. Desse modo, o padrão IEC 61850 proporcionou melhorias no SAS, através do uso de tecnologias de comunicação em rede (KANEDA et al., 2008).

Um SAS pode ser composto por relés de proteção, controladores, redes de comunicação, *gateways* para facilitar a integração com o sistema de supervisão e aquisição de dados, registradores de perturbação, medidores, unidades de medição sincronizada de fasores, estações de engenharia local e remota e IHM (Interface Homem-Máquina) (KIMURA et al., 2008).

Dentre as tecnologias aplicadas às subestações, pode-se mencionar os IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) que correspondem a equipamentos microprocessados utilizados em sistemas elétricos de potência, como, por exemplo, relés de proteção, unidades de controle, etc., que sejam capazes de trocar informações e/ou ações de comando com outros dispositivos. O uso dos IEDs permite uma redução no custo de implantação, manutenção, no número de cabos e equipamentos necessários à sua utilização, possibilita a troca de informações entre dispositivos, simplificação do projeto do sistema de proteção, maior confiabilidade, além de permitir a sincronização temporal dos dispositivos (PEREIRA et al., 2007).

As subestações de energia elétrica projetadas para utilizar as funcionalidades do padrão IEC 61850 podem usufruir de mensagens padronizadas para o sistema supervisor, troca de dados em tempo real entre os IEDs e coleta das informações de monitoramento dos equipamentos, reduzindo significativamente o número de equipamentos usados para proteção, controle, medição e automação (KIMURA et al., 2008).

### 1.1.1 Delimitação do tema

O sistema de automação de subestações utiliza tecnologias de comunicação de dados para aprimorar funcionalidades de proteção, controle, medição, monitoramento e supervisão de uma subestação, aumentando desta forma a confiabilidade do sistema. O padrão IEC 61850 padroniza linguagens de comunicação, permitindo o uso e a troca irrestrita de dados a fim de que sejam realizadas as funcionalidades previstas de cada dispositivo. Tal padronização permite a interoperabilidade, ou seja, a comunicação entre dispositivos de fornecedores diferentes, flexibilizando e aprimorando a comunicação do sistema de forma rápida e segura. (KANEDA et al, 2008).

Em relação à confiabilidade do sistema de proteção em subestações, a capacidade de realizar e manter o contínuo funcionamento do sistema em circunstâncias tanto rotineiras quanto inesperadas é caracterizada pelo balanço entre o grau de certeza de que um sistema de relés ou relé não funcionará incorretamente, sendo esta, uma preocupação para faltas externas, normal (sem defeito), ou condições de operação forçada. E o grau de certeza de que um sistema de proteção irá funcionar corretamente quando necessário, e com o desempenho concebido, se trata de uma preocupação quando ocorre uma falha dentro da zona protegida (KANEDA et al, 2008).

Deste modo, para a utilização de esquemas de proteção dependentes de informações que trafegam em redes de comunicação é imprescindível que a arquitetura de comunicação utilizada na subestação, para a troca de informações entre os IEDs, seja analisada, levando em consideração a confiabilidade e disponibilidade da rede. Para tanto, nesta pesquisa serão analisadas as principais arquiteturas de rede *Ethernet*, como, por exemplo, Estrela Simples, Anel e Estrela Dupla.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Quando um SAS baseado no padrão IEC 61850 é aplicado a uma subestação, deve ser levado em consideração a indisponibilidade do sistema de comunicação, fato que impacta diretamente na confiabilidade. (KANEDA et al., 2008).

É importante ressaltar as diferentes arquiteturas de rede *Ethernet* para troca de informações entre os IEDs, a análise e comparação de confiabilidade destas arquiteturas são fundamentais na escolha da melhor topologia a ser adotada visando a manutenção do adequado funcionamento do sistema de proteção como um todo.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a confiabilidade em sistemas de proteção baseados no padrão IEC 61850 analisando as topologias de rede *Ethernet*: Estrela Simples, estrela Dupla e Anel.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar estudo bibliográfico sobre redes de comunicação para automação de subestações.
- Estudar os principais aspectos do padrão IEC 61850;
- Analisar a confiabilidade de algumas topologias de rede utilizadas em conjunto com o padrão IEC 61580;
- Analisar e discutir os resultados;
- Apresentar as principais conclusões sobre os resultados.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

A automação de subestações consiste em um dos fatores responsáveis pelo aumento na qualidade de fornecimento de energia elétrica. (ALMEIDA, 2011).

A escolha da configuração do sistema de comunicação aplicado ao SAS implica diretamente na arquitetura física do mesmo, bem como na sua disponibilidade. Assim sendo, a importância deste trabalho está na análise de confiabilidade da arquitetura do sistema de proteção estabelecido sob o padrão IEC 61850. De acordo com Almeida (2011), a norma IEC 61850 permite uma integração global entre os diversos equipamentos digitais, possibilitando o compartilhamento de informações e tornando mais simples a implantação de novas funções de automação e proteção.



Por meio desta pesquisa será possível observar a influência da arquitetura de rede e escolha dos dispositivos que a compõe sobre a confiabilidade do sistema de proteção.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A primeira etapa para elaboração da pesquisa consistirá no levantamento e realização do estudo bibliográfico sobre os conceitos de confiabilidade e a importância da aplicação dos seus fundamentos na melhoria da qualidade de um sistema automatizado.

Em seguida, será realizado um estudo sobre o padrão IEC 61850 a fim de que seja possível melhor compreender os seus parâmetros e iniciar a próxima etapa que consiste na verificação de cálculos para análise da confiabilidade.

Com isso, por meio de um estudo de caso, serão mostrados os resultados com base nas configurações propostas de cada topologia, visando diminuir os riscos de falhas de comunicação e aumentar a confiabilidade do sistema.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será dividido em quatro capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1 – Introdução: compreende a apresentação do contexto do trabalho como um todo, abordando as principais diretrizes, problemas e objetivos da proposta.
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica contendo características de rede de computadores para automação de subestações e topologias de rede de comunicação.
- Capítulo 3 – Norma IEC 61850 com suas características de pilhas de protocolos e vantagens de utilização.
- Capítulo 4 – Metodologia, explicando como será realizada a análise de confiabilidade de topologias de comunicação em subestações.
- Capítulo 5 – Resultados, onde serão explanadas as equações descritas na metodologia com a finalidade de analisar as topologias de rede.
- Capítulo 6 – Conclusão referente aos resultados de disponibilidade e confiabilidade obtidos por meio dos estudos realizados entre as topologias, destacando a importância da norma IEC 61850 na automação de subestações.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS INTELIGENTES (IEDs)

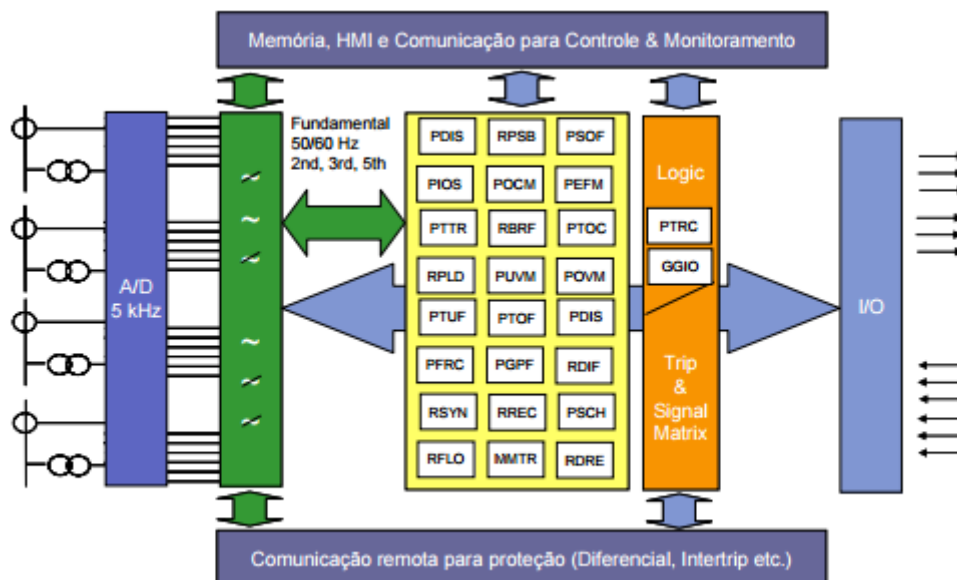
Os IEDs possuem grande importância para a realização da automação de subestações de forma distribuída. Advindos basicamente dos conhecidos relés de proteção, são unidades multifuncionais para a proteção, controle, medição e monitoramento de sistemas elétricos, permitindo ainda a concepção de lógicas de bloqueio e de intertravamentos, tanto de maneira integrada, ou seja, todas as funcionalidades em um único dispositivo físico, quanto distribuída, ou seja, diferentes funcionalidades realizadas em diferentes IEDs (SANTOS et al., 2007).

Ao serem processadas na forma digital, as informações podem ser trocadas entre diferentes tipos de dispositivos e a comunicação pode ser transmitida por meio de fibra ótica, reduzindo significativamente a quantidade de cabos no ambiente de subestações. Segundo Paulino (2007), o uso de uma rede local possibilita ganho em dois aspectos: funcionalidade da proteção e aperfeiçoamento do controle lógico sem que haja aumento de custo, uma vez que a fiação de comando de cobre rígida será substituída por uma instalação de comando digital.

Por meio da ampliação da capacidade de memória e da velocidade de processamento, os IEDs podem realizar funções mais complexas, aperfeiçoar a sua capacidade de identificação de problemas bem como desenvolver a sua função de processamento múltiplo, na qual um mesmo agrupamento de informações pode ser processado através de diferentes funções ao mesmo tempo, aumentando a segurança e disponibilidade do sistema.

Na Figura 1 é possível visualizar a representação do diagrama esquemático típico de um IED, composto por medição, controle, proteção, comando, memória, lógica e comunicação do dispositivo. Assim sendo, ao lado esquerdo da Figura 1, estão ilustrados os transformadores de tensão e corrente, em azul o leitor de sinal analógico, em verde o conversor de sinal analógico/digital. Ao centro, em amarelo, estão os nós lógicos e, ao lado, em laranja, está ilustrado onde a lógica é processada. No lado direito mostra as Entradas (*Inputs*) e saídas (*Outputs*) do IED, por elas são enviados os comandos processados através de cabos binários. Na parte superior temos o barramento de comunicação e controle para o monitoramento

ou envio de sinal a um sistema supervisor. Na parte inferior temos o barramento de proteção, para a comunicação com outros dispositivos.



**Figura 1 - Diagrama esquemático de um Dispositivo Eletrônico Inteligente.**  
**Fonte: Santos et al.(2007).**

Particularmente no caso da aplicação do padrão IEC 61850 a comunicação é apresentada através de portas de comunicação em TCP/IP, permitindo que os IEDs possam usufruir de todos os benefícios que esta tecnologia possui. Neste caso, cada IED, ou porta de comunicação deste IED, apresenta um endereçamento IP que possibilita que este equipamento possa trocar informações em um ambiente de rede *Ethernet*. Cabe ressaltar, neste momento, que a padrão IEC 61850 não especifica o tipo de interface física (*Link Layer*) que deve ser usado, mas sim do ambiente da aplicação (SANTOS et al., 2007).

## 2.2 REDES DE COMPUTADORES PARA AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES

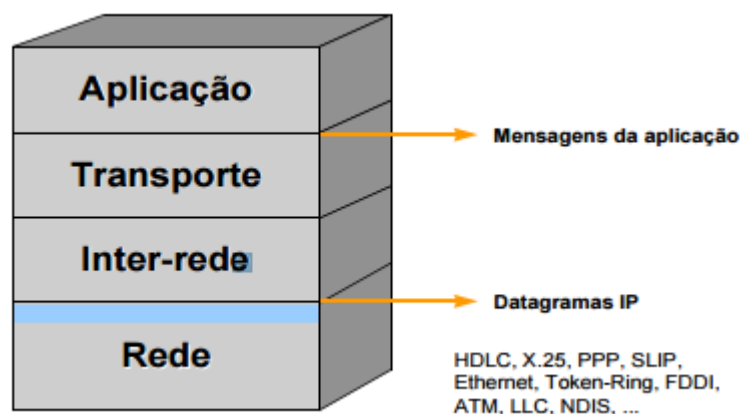
As redes de computadores estabelecem a forma de interligar computadores para o compartilhamento de recursos físicos ou lógicos. (MENDES, 2007).

No início da concepção das redes, cada fabricante possuía a sua forma de trabalho e sua própria linha de desenvolvimento de tecnologia, dificultando a interoperabilidade entre eles. A fim de resolver esta situação de incompatibilidade,

na década de 1970 a ISO (*International Organization for Standardization*) criou um padrão universal para troca de informações entre e dentro das redes. Esse padrão para arquitetura de redes era o Modelo de Referência OSI (*Open Systems Interconnection*), estabelecido em sete camadas, o qual incentivou a padronização de redes de comunicação e controle de processos distribuídos. (MENDES, 2007).

A partir deste padrão, surgiu o TCP/IP, que se refere a uma pilha de protocolos que tem como principais protocolos o TCP (*Transmission Control Protocol*) e o IP (*Internet Protocol*) (MENDES, 2007). Sua característica principal é o suporte direto a comunicação entre redes de diversos tipos. Neste caso, a arquitetura TCP/IP é independente da infra-estrutura de rede física ou lógica empregada, onde qualquer tecnologia de rede pode ser empregada como meio de transporte dos protocolos TCP/IP (PEREIRA, 2007).

A arquitetura TCP/IP, realiza a divisão de funções do sistema de comunicação em quatro estruturas de camadas. A figura 2 ilustra esta disposição estrutural:



**Figura 2 - Divisão de funções do sistema de comunicação.**  
**Fonte: PEREIRA (2007).**

**Aplicação:** A camada de aplicação reúne os protocolos que fornecem serviços de comunicação ao sistema ou ao usuário.

**Transporte:** Sua finalidade é permitir que as entidades pares (*peer entity*) dos *hosts* de origem e destino mantenham uma conversação. Ela reúne os protocolos que realizam as funções de transporte de dados fim-a-fim, ou seja, considerando apenas a origem e o destino da comunicação, sem se preocupar com os elementos intermediários.

Inter-redes: Esta camada realiza a comunicação entre máquinas vizinhas através do protocolo IP. Para identificar cada máquina e a própria rede onde esta está situada é definido um identificador, chamado endereço IP, que é independente de outras formas de endereçamento que possam existir nos níveis inferiores.

Redes: A camada de rede é responsável pelo envio de datagramas construídos pela camada Inter-Rede. Esta camada realiza também o mapeamento entre um endereço de identificação de nível Inter-Rede para um endereço físico ou lógico do nível de rede (PEREIRA, 2007).

### 2.3 REDES ETHERNET

As redes *Ethernet* utilizam o protocolo CSMA/CD para coordenar o acesso ao meio de transmissão. O endereçamento é feito com base numa sequência de 6 bytes (48 bits) habitualmente conhecida por endereço físico, endereço MAC ou endereço "ethernet" (MOREIRA, 2015).

As iniciais CD significam "*Collision Detection*", quando surge uma colisão na emissão de pacotes de dados, o meio de transmissão fica indisponível durante toda a transmissão dos mesmos.

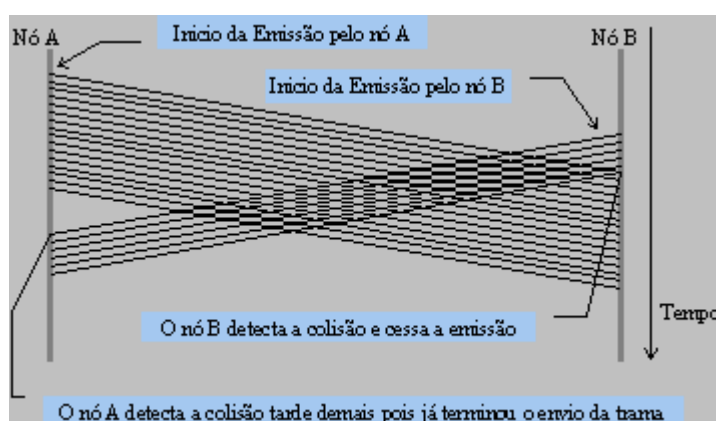
Tipicamente a técnica CSMA/CD utiliza um algoritmo 1-persistente que é o mais eficiente sob o ponto de vista da utilização do meio de transmissão, em lugar de minimizar o número de colisões, tenta-se reduzir as suas consequências (MOREIRA, 2015).

O mecanismo CD obriga a que os nós escutem a rede enquanto emitem dados, razão pela qual o CSMA/CD é também conhecido por "*Listen While Talk*" (LWT) (MOREIRA, 2015).

Como o nó emissor também escuta a rede, ele pode detectar a colisão, nesse caso cessa imediatamente a emissão do pacote e emite um sinal ("*jam*") de 48 bits que notifica todas as estações de que ocorreu uma colisão. Depois da colisão o nó espera um período de tempo aleatório e volta a tentar. Para evitar colisões sucessivas utiliza-se uma técnica conhecida por "*binary exponential backoff*" em que os tempos aleatórios de espera são sempre duplicados por cada colisão que ocorre (MOREIRA, 2015).

Existe um aspecto importante a considerar para que as colisões sejam detectadas com sucesso, o tamanho mínimo dos pacotes deve ser tal que o seu tempo de transmissão seja superior ao dobro do atraso de propagação. Se isto não acontecer uma estação pode completar a emissão do pacote sem que o sinal produzido pela colisão chegue a tempo. Por outras palavras o atraso de propagação normalizado deve ser inferior a 0,5 ( $a < 0,5$ ) (MOREIRA, 2015).

Por exemplo, no caso das redes *Ethernet* (IEEE 802.3) o tamanho mínimo dos pacotes é de 64 *bytes*. A figura 3 ilustra a situação descrita:



**Figura 3 - Redes Ethernet.**  
**Fonte: Moreira (2015).**

### 2.3.1 Características *Ethernet* e Componentes

Para o correto dimensionamento da rede, deve-se entender e especificar todos os componentes *Ethernet* e interconexões para analisar a confiabilidade do sistema e para projetar, adquirir, instalar e manter a rede (SCHEER, 2000).

Os componentes *Ethernet* são basicamente compostos por *Switches*, roteadores e interfaces de IED (SCHEER, 2000).

O *Switch Ethernet* é um dispositivo de multiplexação inteligente que monitora os dados recebidos em uma porta para determinar a sua disposição. Um *Switch* opera na camada de enlace de dados do modelo de rede OSI. Se um pacote de dados está incompleto ou indecifrável, o *switch* ignora e não o retransmite. Se um pacote de dados está intacto, o *switch* retransmite-o para outra porta, com base nos dados de endereçamento incluídos no pacote e os endereços associados com cada porta do *switch* (SCHEER, 2000).

Um roteador é um dispositivo de multiplexação inteligente utilizado para conectar duas redes. Ele é programado para ignorar o tráfego intra-segmento e também rotear o tráfego para o segmento de destino apropriado (SCHEER, 2000).

Uma interface *Ethernet* de IED conecta um IED a uma rede *Ethernet*. Cada dispositivo conectado à *Ethernet* deve ter uma interface *Ethernet* que inclui tecnologia de transmissão para coincidir velocidade da rede e meio. Cada dispositivo ou interface também deve usar tempo de processamento significativo para se comunicar usando as pilhas de interface. Muitos IEDs contêm processadores com capacidade de computação devidamente apropriada para equiparar a sua principal finalidade. Para atender o desempenho necessário para as conexões *Ethernet* de alta velocidade, a interface geralmente tem capacidade de processamento significativa (SCHEER, 2000).

## 2.4 TOPOLOGIA DE REDE PARA SUBESTAÇÃO

O padrão de *layout* proposto para uma subestação consiste em interconexões entre vários dispositivos e nós, construídos dentro de sua topologia de rede e implantação de acordo com as diferentes aplicações (KANABAR, 2009).

As topologias de comunicação baseados no padrão IEC 61850 possuem três níveis de hierarquia de funções conforme ilustra a figura 4:

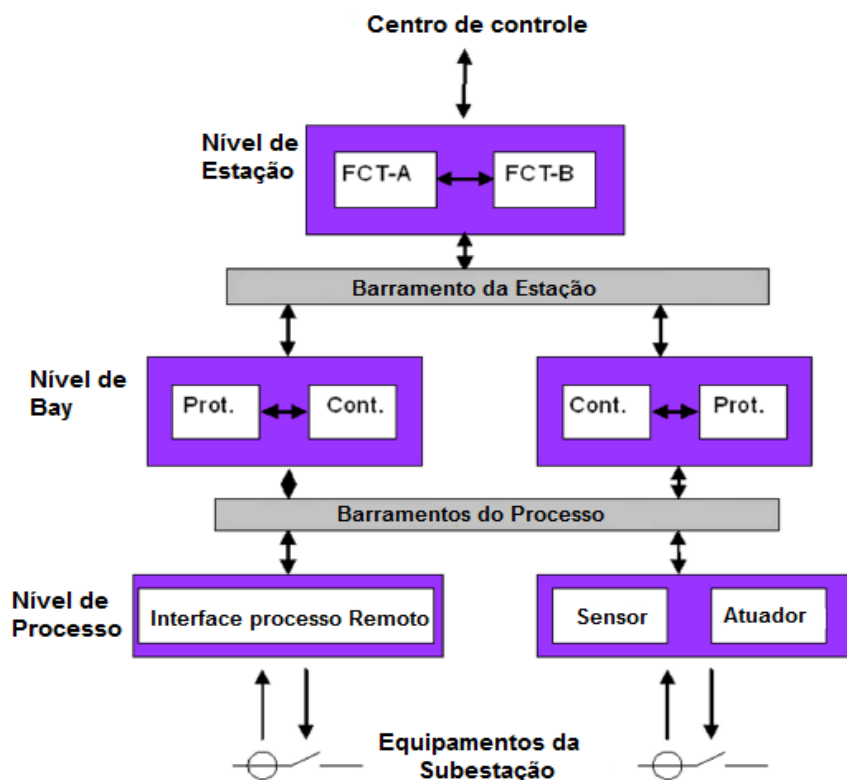


Figura 4 - Função de hierarquia de IEC 61850.  
Fonte: (KANABAR, 2009).

- **Nível de processo:** Neste nível estão as conexões com equipamentos primários da subestação, tais como Transformadores de Corrente (TCs), Transformadores de Potencial (TPs), disjuntores, chaves seccionadoras, I/O remotos, atuadores, etc. (PECENIN, 2011). Este nível está conectado ao barramento de processo que facilita a comunicação entre os IEDs de proteção e controle com o processo (KANABAR, 2009).
- **Nível de Bay:** Neste nível estão os equipamentos de proteção e controle, conectando os barramentos de processo e estação (PECENIN, 2011).
- **Nível de estação:** Sua principal finalidade é o controle e supervisão, sendo conectado pelo barramento de estação que facilita a comunicação entre o nível de estação e nível de Bay. Ele também permite a comunicação entre os diferentes Bays. As funções que requerem dados de mais de um Bay são implementadas neste nível (KANABAR, 2009).



As arquiteturas de rede *Ethernet* básicas incluem a estrela simples, duplo estrela e anel. As arquiteturas de práticas para a SEs podem ser híbridas dessas três combinações básicas (KANABAR, 2009)

#### 2.4.1 Topologia Em Anel

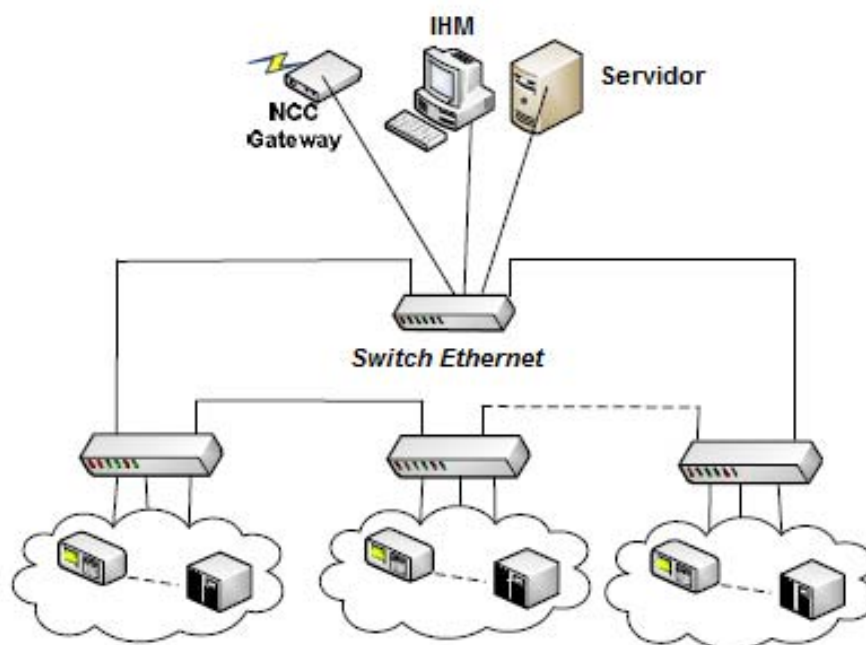
A topologia em anel, ilustrada na figura 5, utiliza conexões de comunicação ponto a ponto. Todos os *Switches Ethernet* são conectados em um *loop* e outros dispositivos são conectados com um *Switch*. As informações são transmitidas entre transmissor e destinatário através de nós em uma ou duas direções no anel. Todo nó pode simultaneamente enviar mensagem para seu vizinho (HIRSCHMANN, 2015).

A rota de comunicação na arquitetura anel tem o fluxo em um único sentido enquanto o anel estiver íntegro, caso ocorra uma falha que interrompa o anel, o *Switch Ethernet* abre duas rotas em sentidos opostos (KANEDA, 2008).

A Topologia em anel é normalmente utilizada para grandes redes, nestes casos, a latência é maior e pode ser melhorada com a tecnologia HSR. Esta tecnologia se comporta de tal maneira que, se há uma única falha no anel, a comunicação do transmissor para o receptor ainda ocorre ao longo do segundo caminho da rede. Para prevenir a recepção de duplo *frame*, se a rede está em operação normal de funcionamento, cada dispositivo HSR programa um mecanismo de detecção de duplicação que filtra duplicações ou *frames* de *looping*, de modo que a comunicação através de uma rede HSR ainda continue sem interrupção quando há uma falha (HIRSCHMANN, 2015).

Os *Switches Ethernet* não suportam loops, portanto, é necessário empregar *Switches* com o protocolo RSTP. Por meio deste, caminhos de comunicação são logicamente formados em uma configuração em estrela. Ele controla caminhos de transmissão de modo a prevenir um loop de dados de transmissão com multi-endereços. Para um evento de falha em um caminho de transmissão, o protocolo também providencia uma função que reconfigura o caminho em alta velocidade (HIRSCHMANN, 2015), permitindo a detecção de *loops* e internamente mensagens de bloqueio, possibilitando a reconfiguração da rede durante falhas de comunicação (KANABAR, 2009).

A arquitetura em anel tem potencial para oferecer alta confiabilidade, pois facilita n-1 redundâncias, ou seja, IEDs ainda podem se comunicar, mesmo que qualquer uma das conexões em anel falhar (KANABAR, 2009).

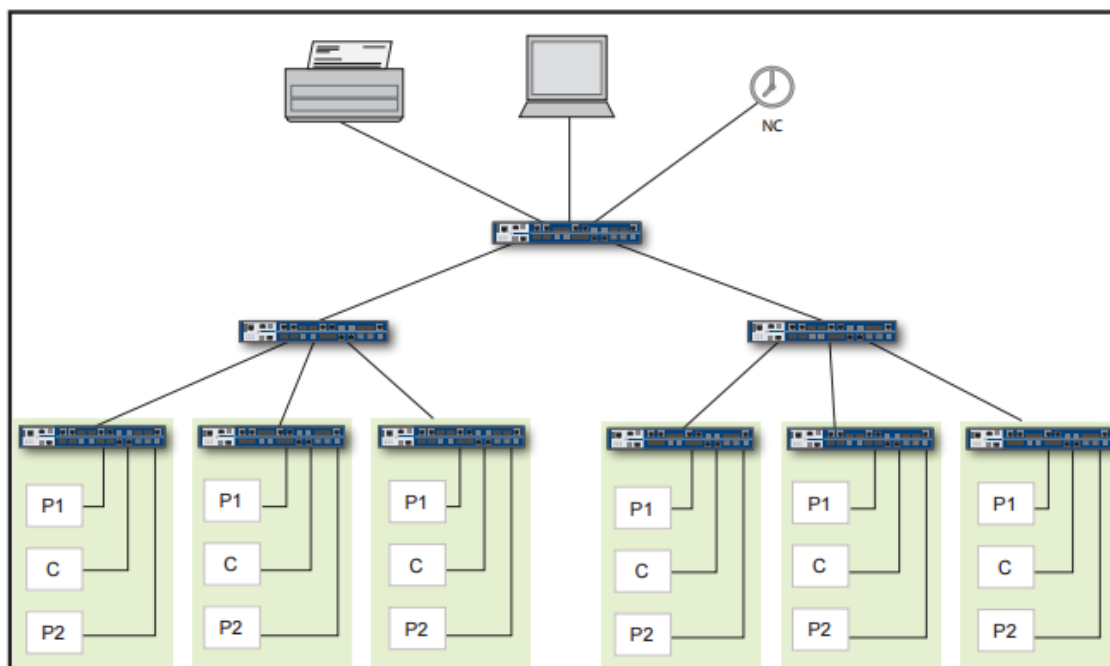


**Figura 5 - Topologia em Anel.**  
Fonte: (KANABAR, 2009).

#### 2.4.2 Topologia Em Estrela Simples

Na topologia em estrela simples, conforme a Figura 6, composta por IEDs de proteção (P1 e P2) e controle (C), e por um controle de rede (NC-*Network control*) cada estação (*peer*) é conectada diretamente a um nó central comum ou *switch*, fazendo com que uma falha de um nó, não sendo o nó central, não afete os outros nós. A topologia permite uma fácil conexão para pequenas redes e a transmissão ocorre por meio de *switches* entre os componentes. É a única topologia que pode operar com um *switch* sem RSTP (KANABAR, 2009).

No entanto este tipo de topologia é o que possui menor nível de confiabilidade, devido ao fato de todos os IEDs serem conectados a um único Switch Ethernet central, ou seja, uma falha em um *switch* pode paralisar o funcionamento da rede.



**Figura 6 - Topologia em Estrela Simples.**  
**Fonte: (HIRSCHMANN, 2015).**

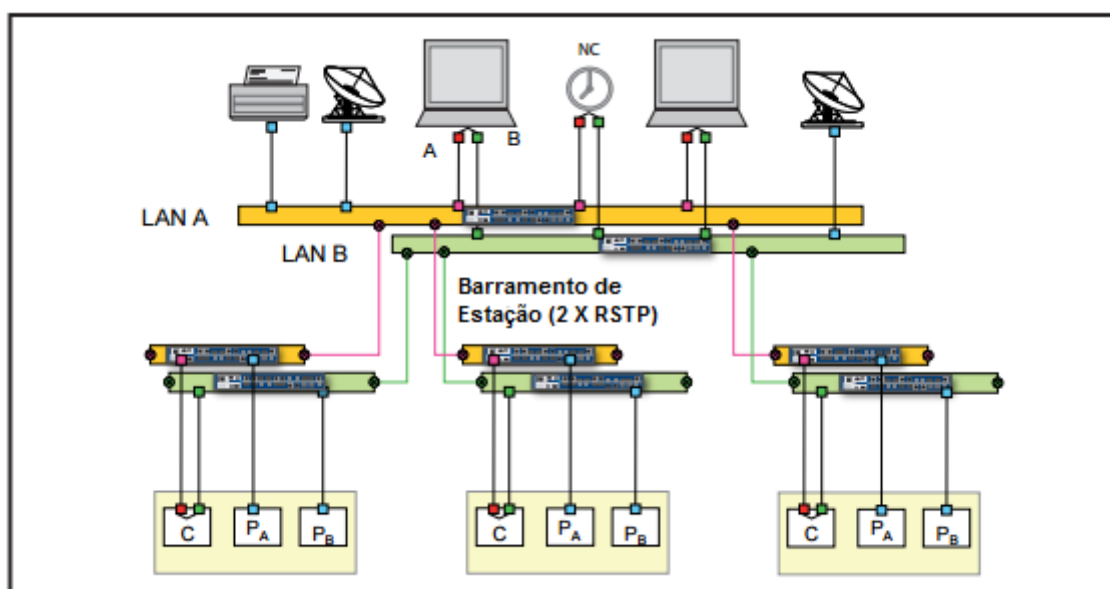
### 2.4.3 Topologia Em Estrela Dupla

A fim de aprimorar a confiabilidade da subestação e disponibilidade da rede, a topologia em estrela dupla ou estrela redundante é frequentemente utilizada. (KANABAR, 2009). Ela dispõe de duas rotas independentes para comunicação entre os IEDs. A comunicação é estabelecida através de uma porta primária, deixando a segunda porta em espera. Nesta arquitetura o sistema é capaz de suportar a N-2 falhas (FRANCO et al., 2008).

Para a topologia em estrela dupla, cada dispositivo crítico deve ter uma interface de acesso duplo (DAN, Duplo Nó de Acesso) e estar conectado a duas redes locais independentes. Para tal topologia, utiliza-se o protocolo PRP, no qual todos os dispositivos que precisam de uma rede redundante devem estar conectados com uma dupla rede de ligação. Ambas as redes são usadas simultaneamente e carregam os mesmos dados que são enviados redundantemente pelo Duplo Nó de Acesso. Cada DAN duplica a rede com um todo, permitindo o tráfego de informações ao longo de ambas as LANs (HIRSCHMANN, 2015). O protocolo RSTP também é utilizado para esta topologia (KANABAR, 2009).

O princípio utilizado pelo PRP é baseado na redundância de monitoramento que se certifica de que o receptor usa apenas o primeiro pacote de dados e descarta o segundo. Se apenas um pacote é recebido, o receptor sabe que a falha ocorreu no outro caminho. O PRP usa duas redes independentes com qualquer topologia. As duas redes paralelas independentes podem ser redes de RSTP e até mesmo redes sem qualquer redundância como um todo (HIRSCHMANN, 2015).

A Figura 7 mostra uma topologia em estrela dupla com duas RSTPs em um barramento de estação, mostrando os IEDs de proteção (PA-PB) e controle(C) interligados aos *switches* (KANABAR, 2009).



**Figura 7 - Topologia em Estrela Dupla.**  
**Fonte: (HIRSCHMANN, 2015).**

## 2.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Os IEDs possibilitam que as informações possam ser trocadas entre diferentes tipos de dispositivos via fibra ótica, fornecendo maiores vantagens e aplicações na automação de subestações. Tais unidades multifuncionais com processamento digital, com o advento do protocolo TCP/IP e dos conceitos de rede *ethernet* para transmissão de dados, proporcionam diretrizes de comunicação que são aprimoradas com a utilização de protocolos vinculados aos *switches* do sistema, tecnologias as quais garantem a confiabilidade na comunicação dentro da topologia

a ser utilizada, ou seja, evitando colisões, duplo *frames*, *loop* de dados de transmissão com multi-endereços e falhas na recepção e interpretação de dados.

### 3 NORMA IEC 61850

Para que seja possível que dois sistemas se comuniquem de modo eficaz, normalmente é usado um grupo de regras que determina qual o tipo e a ordem das mensagens que serão trocadas. A este grupo de regra é dado o nome de protocolo (GURJÃO et al., 2006).

O objetivo principal de um protocolo (ou uma pilha de protocolos) é fazer com que sistemas (ou equipamentos) mesmo que tenham arquiteturas internas distintas falem a mesma “língua” e assim consigam trocar informações. Porém, se não houver um consenso que defina regras básicas que os protocolos de uma determinada aplicação devam seguir (modelo de referência), é possível que soluções proprietárias sejam propostas, ou seja, cada fabricante pode definir um protocolo específico para os seus produtos e isso pode impedir a comunicação com equipamentos de outros fabricantes (GURJÃO et al., 2006).

Um dos principais objetivos do padrão internacional IEC 61850 é o de garantir a interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes, permitindo o uso e a troca irrestrita de dados a fim de que sejam realizadas suas funcionalidades dedicadas individuais, como proteção, controle, medição, monitoramento e supervisão. Assim, por interoperabilidade entende-se a habilidade de dois ou mais IEDs de um mesmo fabricante, ou de fabricantes diferentes, de trocar informações e usar estas informações para uma correta cooperação (SANTOS et al., 2007).

O benefício da interoperabilidade está no âmbito de integrar informações durante as distintas fases de implementação na automação das subestações, sobretudo, nos frequentes casos em que aparelhos de fornecedores distintos precisam estabelecer comunicação entre si (SANTOS et al., 2007).

Segundo Almeida (2011), o padrão IEC 61850 é uma nova proposta tecnológica que revolucionou os SAS. Através do uso de redes LAN *Ethernet*, velozes e confiáveis, a norma permite uma integração global entre os diversos equipamentos digitais, possibilitando, nessa nova condição, o compartilhamento de informações e tornando mais simples a implantação de novas funções de automação. Os IEDs podem agora se comunicarem entre si e compartilhar informações de monitoramento. Não há necessidade mais de conversores para a

comunicação entre IEDs de diferentes fabricantes, pois o protocolo de comunicação é o padrão IEC 61850.

A figura 8 ilustra como os protocolos eram usados antes do padrão IEC 61850. É possível constatar que havia a necessidade de conversores e a utilização de uma estação *Gateway* a fim de tornar compatíveis os diferentes protocolos usados.

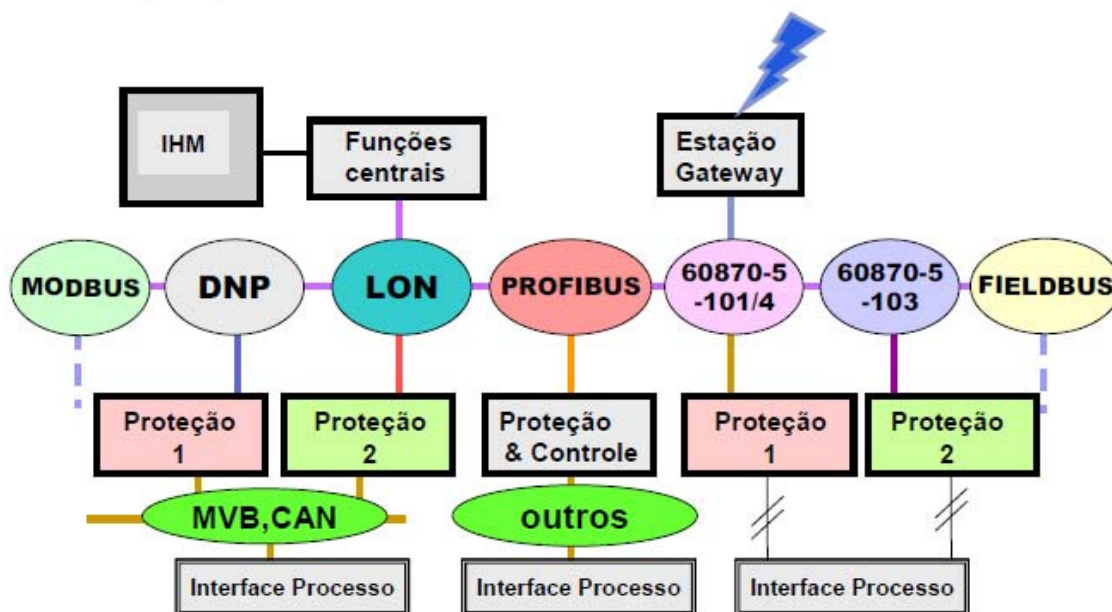


Figura 8 - Exemplos de protocolos de comunicação.  
Fonte: Santos et al.(2007).

A figura 9 mostra que o padrão IEC 61850 é dividido em 10 partes sendo que cada uma aborda um tema específico, deste modo são definidos os aspectos de comunicação, modelo e engenharia.

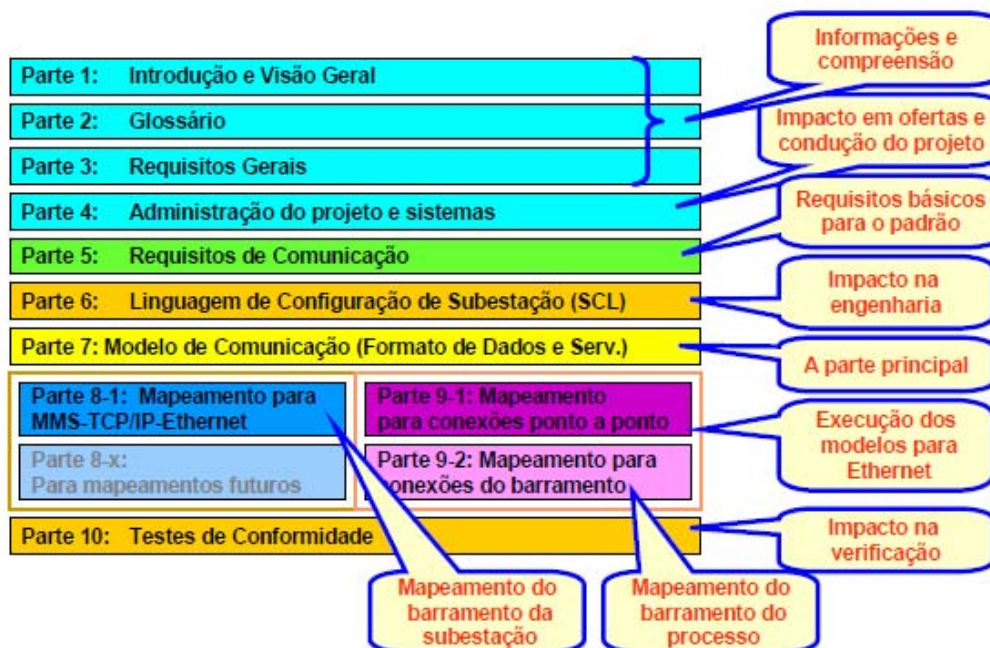


Figura 9 - Arquitetura da Norma IEC 61850.

Fonte: Santos et al.(2007).

No que diz respeito ao aspecto de modelo, o conceito abordado fala sobre a garantia da livre alocação de funções, isto é, estabelece que a norma IEC 61850 deve apoiar filosofias distintas e possibilitar a identificação das exigências de comunicação e da modelagem de dados. Para conseguir tal efeito, as funções na subestação foram divididas em nós lógicos capazes de se comunicarem entre si e comportar todas as informações a serem conduzidas (SANTOS et al., 2007).

Na abordagem do aspecto de engenharia, é estabelecida a linguagem de configuração da subestação, ou SCL do inglês *Substation Configuration Language*. Esta linguagem define o modelo de dados com todas as suas opções, designa os nós lógicos a partir dos diversos dispositivos e aloca as funções dos equipamentos de manobras (SANTOS et al., 2007).

A importância da abordagem de engenharia consiste na garantia da troca de dados entre as ferramentas de configuração de sistemas de diferentes fabricantes durante o processo. Tal fato garante a Interoperabilidade entre os IEDs de um ou diversos fabricantes em trocar informações e utilizar as informações para suas próprias funções (SANTOS et al., 2007).



No entanto, é necessário ter conhecimento das informações técnicas do sistema de automação de uma subestação afim de que seja possível assegurar a compatibilidade de uma alteração futura. Dentre essas informações é válido apontar o índice de confiabilidade da Rede LAN, a lista de funcionalidades usadas, o grau de proteção desejado para o sistema e o reconhecimento preciso dos equipamentos primários do sistema (ALMEIDA, 2011).

Por mais que todas essas informações sejam obtidas, ainda há a possibilidade de os IEDs não serem capazes de interoperar em alguns casos, principalmente, nos primeiros anos de operação. Por isso, a realização de testes é de suma importância para garantir a confiabilidade de operação do sistema (ALMEIDA, 2011).

Em função do aumento da complexidade dos equipamentos de um SAS, os testes tiveram um aumento proporcional de considerações e levantamentos a serem feitos em IEDs e no sistema. O desenvolvimento e a implantação dos dispositivos baseados no padrão IEC 61850 dependem do desenvolvimento de testes e métodos capazes de ensaiarem devidamente as funcionalidades dos diferentes componentes do sistema (ALMEIDA, 2011).

### 3.1 PILHA DE PROTOCOLOS IEC 61850

A pilha de protocolos do padrão IEC 61850 representada na Figura 10 é composta de um serviço que gera mensagens e das camadas de transporte, rede e enlace, onde somente a camada de enlace é comum a todas as mensagens e utiliza o protocolo *Ethernet* com prioridade. As mensagens que não tem restrição de tempo (cliente-servidor) utilizam toda a pilha de protocolos, enquanto as demais, que precisam ter restrições quanto a atrasos, são mapeadas diretamente na camada de enlace. (GURJÃO et al., 2006).

As mensagens são classificadas nas seguintes classes desempenho:

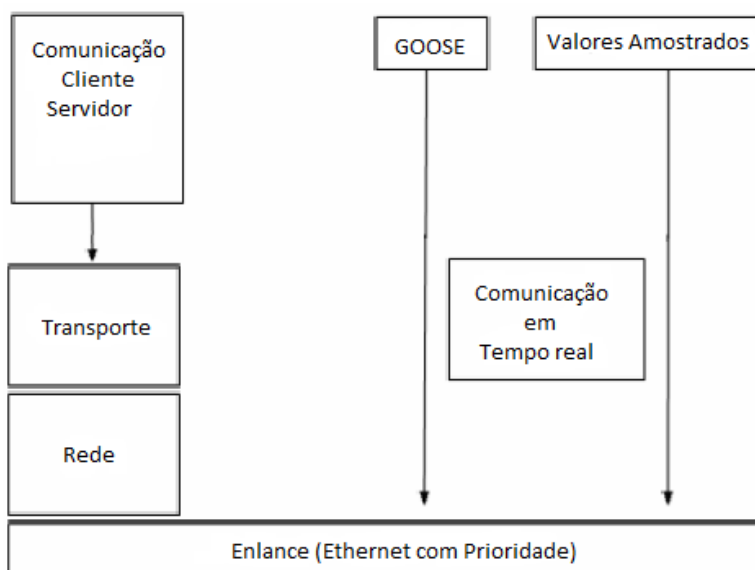
- Mensagens Rápidas;
- *Trip*;
- Velocidade Média;
- Baixa Velocidade;
- *Raw Data*;
- Transferência de Arquivos;

- Sincronização de Tempo.

As Mensagens cliente-servidor utilizam o serviço de comunicação MMS (*Manufacturing Message Specification*), fornecendo um conjunto de serviços para leitura, escrita, definição e criação de objetos de dados, sincronização e transferência de arquivos (DUARTE, 2012).

Por utilizarem todas as pilhas do protocolo, as mensagens cliente-servidor têm um atraso inserido pelo processamento em cada camada, (GURJÃO et al., 2006) e são utilizadas para a comunicação com o sistema supervisor, o qual normalmente está localizado na sala de controle e disponibiliza recursos de interface com o usuário. Esta comunicação é orientada a conexão e não apresenta restrições temporárias críticas, utilizando como meio físico a rede do barramento de estação (PECENIN, 2011).

As Mensagens Cliente-Servidor são definidas em três tipos: Sincronização de tempo; Serviços ACSI, dos quais tratam de mensagens que provêm de uma interface abstrata de comunicação entre um cliente e um servidor remoto e para distribuição de eventos entre uma aplicação em um equipamento e aplicações remotas em outros equipamentos (Velocidade Média, Baixa Velocidade e Transferência de Arquivos); E eventos genéricos do status da subestação - GSE (Mensagens Rápidas e de *Trip*) (GURJÃO et al., 2006).



**Figura 10 - Representação da Pilha de Protocolos IEC 61850.**  
 Fonte: GURJÃO et al. (2006).

As mensagens com restrições críticas a atraso, como bloqueios, são denominadas de transferência de objetos genéricos de eventos do sistema (GOOSE - Mensagens Rápidas e de *Trip*). (GURJÃO et al., 2006). Elas utilizam um mecanismo de comunicação conhecido por “*Publisher-subscriber*”, onde o IED emissor (editor) insere (publica) mensagens na rede (em “*multicast*”) e os IEDs receptores (assinantes ou subscritores) recebem apenas aquelas mensagens de seus interesses, este esquema de interação elimina o tráfego de informação de “*setup*” ou negociação, acelerando o processo de comunicação. Segundo Duarte (2012) o desacoplamento entre editores e assinantes proporciona um sistema mais expansível, assim como maior dinamicidade de topologia de rede.

Na rede IEC 61850 as mensagens GOOSE (comunicação horizontal) entre os diferentes IED podem ser originadas de diferentes fabricantes. Nesta mesma rede, podem trafegar as mensagens verticais, ou seja, as mensagens que partem dos IEDs e seguem em direção à estação de controle. Neste caso, a principal finalidade é a supervisão e controle da subestação através do IHM disponibilizado ao operador utilizando serviço de comunicação MMS (DUARTE, 2012). Esta arquitetura de comunicação pode ser verificada na Figura 11.

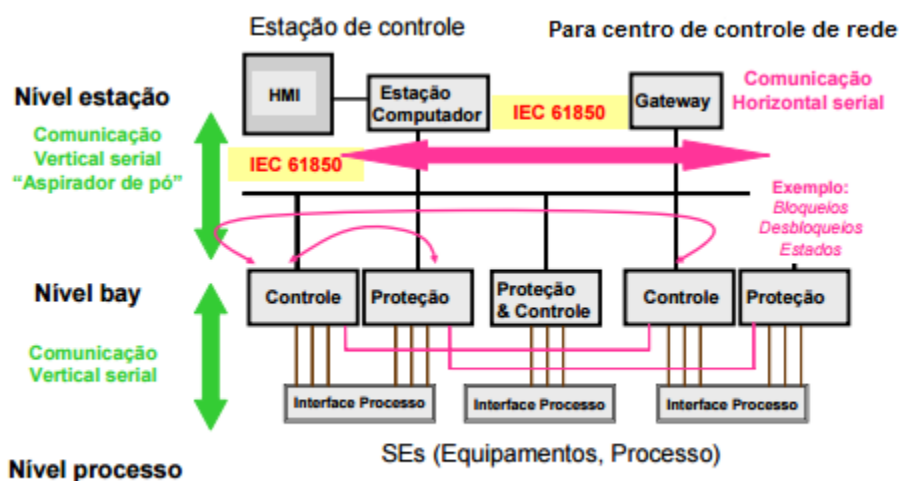


Figura 11 - Arquitetura de rede de comunicação.  
Fonte: SANTOS et al.(2007).

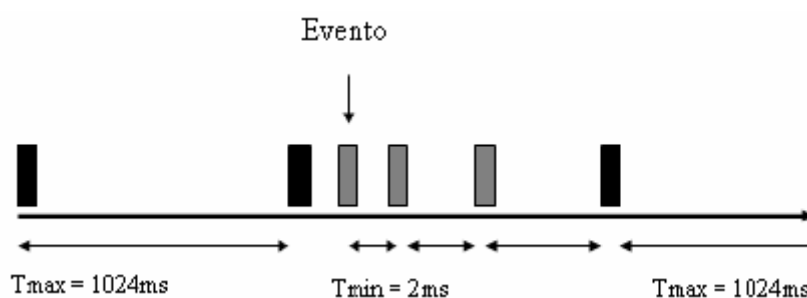
As mensagens de transferência de valores amostrados – SV (*sampled values*) (*Raw Data*) por não utilizar todas as camadas da pilha de protocolos, têm maior

prioridade (GURJÃO et al., 2006). Elas originam-se em TPs ou TCs eletrônicos ou em *Merging Units (relaciona entradas de tensão e corrente)*, desta forma o sinal é enviado à rede *Ethernet* e distribuído aos IEDs existentes na SE. Nas mensagens SV, diferentemente das mensagens GOOSE, não existe repetição de envio (DUARTE, 2012).

As mensagens GOOSE e valores amostrados pertencem à classe de mensagens GSE, sendo que as primeiras transportam informações de *status*. As mensagens GOOSE contêm informações que permitem ao receptor conhecer que um *status* foi modificado e o instante em que ele foi modificado. Os valores amostrados, como corrente e tensão do transformador, são enviados nas mensagens SV que requerem atenção a restrições de tempo, pois o conjunto de valores amostrados é usado no receptor para “reconstruir” o valor original da grandeza medida (GURJÃO et al., 2006).

Segundo Gurjão (2006), mapear as mensagens com restrições críticas de tempo diretamente na camada de enlace resolve o problema do atraso inserido pelas demais camadas no envio das mensagens, porém retira a confiabilidade que seria garantida por meios de estabelecimento de seções e confirmações de recepção pelas camadas que não foram utilizadas.

Como exemplo, segundo Gurjão (2006), ao analisar uma mesma mensagem GOOSE enviada continuamente a cada  $T_{max} = 1024ms$ , quando um evento ocorre uma nova mensagem é gerada e o período de envio diminui para  $T_{min} = 2ms$ , em seguida esse período é incrementado até que o  $T_{max}$  seja atingido ou que outro evento ocorra, gerando uma nova mensagem, conforme está ilustrado na Figura 12. Caso não ocorram novos eventos uma mensagem é repetida em períodos de tamanho  $T_{max}$ .



**Figura 12 - Exemplo de Repetição de Mensagens GOOSE.**  
**Fonte: GURJÃO et al. (2006).**

Segundo Gurjão (2006), todos os serviços de envio de dados são feitos de forma espontânea, ou seja, sem a necessidade de serem solicitados por outro equipamento. Para definir o que deve ser transmitido, um conjunto de dados relacionados a todas as mensagens (cliente-servidor, *GOOSE* ou *SV*) e um evento que define o início da transmissão é definido em bloco de controle.

No caso das mensagens por valores amostrados considera-se que a perda de algumas delas possa ser recuperada pelos algoritmos executados nas funções de recepção. Portanto, não há mecanismos de reconhecimento ou envio contínuo para esse tipo de mensagem (GURJÃO et al., 2006).

### 3.2 NÓS LÓGICOS

No padrão IEC 61850 as funções de controle, supervisão e proteção não estão centralizadas em Unidades de Controle ou relés de proteção, que para executarem uma lógica, necessitavam auxílio de relés auxiliares ou fiação, mas separadas em subfunções. Elas são descritas com um grupo de dados e serviços associados em classes, formando um Nó Lógico (LN) (DUARTE, 2012).

Segundo Duarte (2012), nós lógicos comunicam entre si, através de conexões lógicas, e possuem todas as informações a serem transmitidas as quais podem estar alocadas em múltiplos dispositivos e níveis de controle, permitindo por parte do usuário a utilização de qualquer filosofia de sistema.

Segundo a Tabela 1, o LN é identificado conforme ao grupo que pertence. O padrão IEC 61850 define um total de 92 Nós Lógicos (DUARTE, 2012).

Tabela 1 - Lista dos Grupos de Nós Lógicos.

Tipos de Grupo	Descrição do Grupo
A	Funções de Controle Automático
C	Funções de Controle
G	Funções Genéricas
I	Funções de Interface e Armazenamento
L	Funções do Sistema
M	Medição
P	Funções de Proteção
R	Funções Relacionadas à Proteção
S	Sensores e Monitoramento
T	Transformadores
X	Equipamentos de Manobra
Y	Transformadores de Potência
Z	Equipamentos Adicionais

Fonte: DUARTE (2012).

Segundo Duarte (2012), todo LN possui sua identificação de quatro letras, sempre começando com a letra do grupo ao qual pertence, como exemplo:

- XCBR: nó lógico que pertence a Equipamentos de Manobra (X), do tipo disjuntor.
- PDIF: nó lógico que pertence a Função de Proteção (P), do tipo proteção diferencial.

### 3.3 LINGUAGEM DE CONFIGURAÇÃO DE SUBESTAÇÃO

Com a necessidade de uso dos nós lógicos em diferentes dispositivos físicos e com o intuito de determinar e configurar os caminhos e parâmetros de troca de informação entre os nós lógicos, o padrão IEC 61850 especifica uma linguagem formal de descrição da configuração para sistemas de automação de subestações, chamada de Linguagem de Configuração de Subestação (SCL) ou do inglês - *Substation Configuration Language*, tendo como premissa a uniformização da nomenclatura utilizada através de um modelo único de descrição de dados, criando um vocabulário comum (PECENIN, 2011).

Para garantir a troca de informações entre as ferramentas de engenharia dos IEDs e as ferramentas de engenharia das SEs, todos os arquivos são formatados segundo o padrão IEC-61850, e possuem as seguintes finalidades: (PAULINO, 2010).

- SSD: *System Specification Description*: Descreve o diagrama e a funcionalidade da automação associado aos nós lógicos;
- SCD: *Substation Configuration Description*: Descreve a configuração da subestação incluindo a rede de comunicação e informações sobre o fluxo de dados de comunicação;
- ICD: *IED Capability Description*: Descreve as capacidades e pré-configurações dos IEDs. Neste arquivo estão descritas todas as funções suportadas por um IED;
- CID: *Configured IED Description*: Descrição da configuração de um IED específico. Neste arquivo estão descritas as funções parametrizadas ou habilitadas pelo usuário para aquele IED (PAULINO, 2010).

### 3.4 VANTAGENS DO PADRÃO IEC 61850

Além da interoperabilidade, o padrão prevê tempos de atuação da proteção mais rápidos, uma vez que seleciona quais eventos e alarmes têm maior prioridade, sendo prioritários os disparos de proteção. Além disso, por estabelecer protocolos de rede, o sistema de automação é facilmente implementado (RODRIGUES, 2013).

Podem ser citadas como vantagens à aderência aos protocolos do padrão IEC 61850 para a integração do sistema de subestações: (RODRIGUES, 2013).

- Universalização do protocolo de comunicação entre os IEDs;
- Redução no cabeamento e pontos de I/O dos equipamentos digitais;
- Compartilhamento das informações sobre o processo e sistema entre os subsistemas;
- Transmissão em tempo real do *status* das chaves seccionadoras e disjuntores para o sistema de controle e supervisão.

### 3.5 COMENTÁRIOS FINAIS

O padrão IEC 61850, veio por meio de sua pilha de protocolos, viabilizar a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes, suprimindo a necessidade que havia nas SEs de utilização de conversores e estação *Gateway*, a fim de tornar compatíveis diferentes protocolos utilizados. Tal conjunto de protocolos

proposto pelo padrão visa mapear e priorizar mensagens trocadas, condicionando mensagens com restrições críticas a atraso, de recepção e repetição.

As funções de controle, proteção e supervisão propriamente ditas, são descritas com um grupo de dados e serviços associados em classes, formando Nós Lógicos e dividindo as variáveis presentes na SE por subgrupos de funções. Desde modo, a SCL criou um vocabulário comum para o sistema de automação de subestações, visando determinar e configurar os caminhos e parâmetros de troca de informação entre os nós lógicos, e conseqüentemente, fornecer as ferramentas de engenharia necessárias para troca de informações em todo sistema.



## 4 METODOLOGIA

Os modelos de topologia de comunicação em estrela, estrela dupla e anel serão analisados a partir das premissas do modelo de Markov, árvore de falhas, redundâncias, análises de disponibilidade e confiabilidade que serão discutidas a seguir. Métodos, os quais fornecerão perspectivas de indisponibilidade, disponibilidade e confiabilidade que o sistema apresentará, e conseqüentemente, taxas referentes à segurança e recomposição do sistema. Variáveis como, velocidade de detecção de falhas, número de componentes, latência de comunicação e complexidade da topologia também serão aspectos discutidos e relacionados nos resultados da análise proposta.

No que diz respeito à comunicação, é importante ressaltar que ela sempre desempenhou um papel crítico na operação em tempo real do sistema elétrico de potência. Um componente-chave de um sistema de comunicação é a capacidade de descrever-se tanto da perspectiva de dados, quanto de serviços (funções de comunicação que executa um IED). Outros requisitos "chaves" incluem (KANABAR, 2009):

- Alta velocidade de comunicação entre IEDs ;
- Alta disponibilidade;
- Interoperabilidade de vários fornecedores;
- Suporte para Transferência de Arquivos;
- Apoio Auto-configurável / configuração;
- Suporte para segurança.

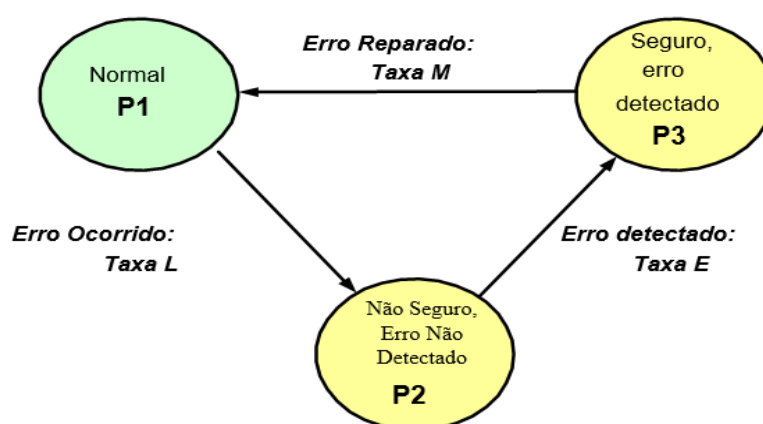
Tratando-se do conceito de comunicação, a confiabilidade é um importante aspecto a ser analisado. De acordo com a IEC 60870-4, ("Equipamentos e sistemas de tele controle; Parte 4 - Requisitos de desempenho") a confiabilidade é definida como uma medida de equipamento ou um sistema para executar sua função pretendida nas condições especificadas, em um determinado período de tempo. Neste contexto, a subestação deve continuar operacional mesmo se qualquer componente do sistema falhar (ANDERSSON, BRAND, 2005).

Para garantir a confiabilidade, os dispositivos eletrônicos inteligentes devem ser programados adequadamente e também possuir alto MTBF (*Mean Time*

*Between Failures*)<sup>1</sup>. A redundância também é uma maneira de aumentar a disponibilidade do sistema.

#### 4.1 MODELO DE ESTADO DE MARKOV

Para calcular a confiabilidade, disponibilidade e segurança, o modelo de estado de Markov conforme apresentado na Figura 13 é aplicado. As propriedades importantes, especialmente para a segurança são: A taxa de falha (L), taxa de reparação (M) e a taxa de detecção de erro (E) (ANDERSSON, 2005).



**Figura 13 - Modelo de estado Markov.**  
Fonte: ANDERSSON (2005).

Supõe-se que o sistema tem três estados: condições normais de funcionamento (P1), regido por boas condições operacionais de trabalho; estado de falha, quando ainda não é detectado o problema (P2); e estado de falha detectada (P3), onde medidas podem ser tomadas para tornar o sistema seguro novamente, porém, com disponibilidades possivelmente degradadas, se o sistema não tem componentes redundantes. (ANDERSSON, 2005).

Deste modo, a recuperação rápida de erros conduz a um pequeno estado de vulnerabilidade, ou seja, aumenta a segurança. Pode ainda ser observado, que o tempo de detecção de erro, também deve ser considerado como o tempo de indisponibilidade, ou seja, tem de ser adicionado, conforme Avelar, o MTTR<sup>1</sup> – *Mean*

<sup>1</sup> AVELAR, Victor. Torell, Wendy. Tempo Médio Entre Falhas: Explicação e Padrões. 2004.

*Time To Repair* (Tempo médio de reparo) para calcular a disponibilidade (ANDERSSON, 2005).

Para ser capaz de quantificar esses efeitos, utiliza-se o seguinte modelo de estado de Markov: “P1” foi adotado como estado de funcionamento normal do sistema. Ele se torna não seguro quando ocorre um erro, elevando a taxa L que leva ao estado P2. É seguro novamente, se o IED detectar o erro e levar para um estado seguro (ou seja, desliga ou bloqueia todas as saídas), impactando a taxa de E que leva ao estado P3. A reparação com uma taxa M leva de volta ao estado normal de funcionamento. P2 é, por conseguinte, a probabilidade de estar num estado não seguro. Assim, a probabilidade de segurança S é obtida pela equação (1): (ANDERSSON, 2005).

$$S = 1 - P2 = P1 + P3 \quad (1)$$

Se forem adotadas probabilidades para as taxas, uma situação estática para todos  $P_i$ , e um modelo de início em P1, pode-se expressar a probabilidade de insegurança P2 através da equação (2): (ANDERSSON, 2005).

$$P2 = (1)/(1 + E/L + E/M) \quad (2)$$

E a probabilidade de segurança resultante S pode ser expressa pela equação (3): (ANDERSSON, 2005).

$$S = (1)/(1 + 1/(E/L + E/M)) \quad (3)$$

Desde modo, a disponibilidade é a probabilidade de ser capaz de fazer o que o sistema tem a intenção de fazer, que é o estado normal, e, portanto, tem probabilidade A, dada pela equação (4): (ANDERSSON, 2005).

$$A = P1 = (1)/(1 + L/E + L/M) \quad (4)$$

Um sistema de automação depende de um sistema de comunicação, pode ser considerado inseguro quando alguns IEDs não são acessíveis devido a alguma

falha na rede, no período de detecção da falha até a reconfiguração do sistema para conectar todos os IEDs novamente. Isto significa que  $L$  é a taxa de falhas no interior da rede. Para um sistema não redundante  $E$  é a taxa de detecção de erro, e  $M$  a taxa de reparação. (ANDERSSON, 2005).

Para um sistema redundante, do ponto de vista de segurança, “E” é a detecção de erros e a taxa de recuperação automática. E “M” é sempre um, porque a recuperação tem que “reparar” o sistema. Para uma real influência da taxa de reparo da disponibilidade do sistema redundante, outro modelo como o método do diagrama de disponibilidade ou árvore de falhas é utilizado. (ANDERSSON, 2005).

#### 4.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E INDISPONIBILIDADE.

Em geral, os sistemas redundantes de SEs não dependem somente da redundância do sistema de comunicação, mas também dos IEDs, especialmente pelo número de comunicações de portas paralelas que determinam o número de possibilidade de conexões com os *switches* (SCHEER, 1999).

Para uma avaliação de confiabilidade de diferentes arquiteturas de comunicação, além da análise de redundâncias, é necessário fazer algumas suposições sobre as taxas de falha dos componentes. Nesta avaliação se incluem a análise de MTTF, análise de MTBF, análise de MTTR, tempo de recomposição do sistema, e o custo relativo da arquitetura utilizada (SCHEER, 1999).

Para calcular a indisponibilidade, dada uma taxa de falha e o tempo que leva para detectar e reparar uma falha tem-se a equação (5): (SCHEER, 1999).

$$q = \lambda MTTR = MTTR/MTBF \quad (5)$$

Onde: “q” é a indisponibilidade;

$\lambda$  = É uma constante da taxa de falha;

MTTR = Tempo Médio para Reparar (anos);

MTBF = Tempo Médio entre falhas (anos);

Para quantificar a disponibilidade de um elemento de um sistema, tem-se que (WEBER, 2006):

$$A = MTTF / (MTTF + MTTR) \quad (6)$$

Onde: "A" é a disponibilidade;

MTTR = Tempo Médio para Reparar (anos);

MTTF = Tempo Médio para falhar (anos);

Sabendo que:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (7)$$

E adotando um MTTR padrão de 24 horas (0,00274 anos), nota-se que a diferença numérica entre MTBF e MTTF é relativamente pequena, pois os tempos de operação são geralmente muito maiores que os tempos de reparo e na prática se considera que (WEBER, 2006):

$$MTBF = MTTF \quad (8)$$

Considerando um sistema reparável, a confiabilidade é definida como a probabilidade de um sistema de não falhar por dado período de tempo, assumindo uma taxa de falha constante, ou seja,  $\lambda_i(t) = \lambda_i$ , a confiabilidade de um elemento  $i$  é definida como (TOURNIER, 2010):

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i(t)} \quad (9)$$

E está relacionado ao tempo médio de falha sem reparo, calculado por:

$$MTTF_i = \int_0^{\infty} R_i(t) dt \quad (10)$$

Logo, tem-se que a confiabilidade de um sistema de "n" componentes em série é definida por (TOURNIER, 2010):

$$R_s(t) = \prod_{i=0}^n R_i(t) \quad (11)$$

E a disponibilidade de um sistema de “n” componentes em série é definida por:

$$A_s = \prod_{i=0}^n A_i \quad (12)$$

Para um sistema composto de “n” componentes em paralelo tem-se que (TOURNIER, 2010):

$$A_s = 1 - (1 - A_i)^n \quad (13)$$

$$R_s(t) = 1 - (1 - R_i(t))^n \quad (14)$$

### 4.3 ÁRVORE DE FALHAS

Uma árvore de falhas (Figura 14) é usada para determinar a probabilidade de uma falha específica, modelando a parte do sistema que influencia a falha em particular. A "falha de interesse" é chamada de evento de topo. Para encontrar a probabilidade de que as comunicações não estarão disponíveis em uma determinada subestação, utiliza-se uma porta OU (OR) para expressar a ideia de que qualquer falha pode causar o início do evento (SCHEER, 1999).

Eventos de nível inferior podem ser eventos fundamentais, como falhas de dispositivos, *modems*, ou processadores de comunicação. Se uma indisponibilidade razoável existe para o dispositivo, não é necessária uma análise mais aprofundada do dispositivo, mas se um dispositivo não tem uma indisponibilidade simples, pode-se precisar analisá-lo com a sua própria árvore de falhas e eventos internos para calcular uma indisponibilidade (SCHEER, 1999).

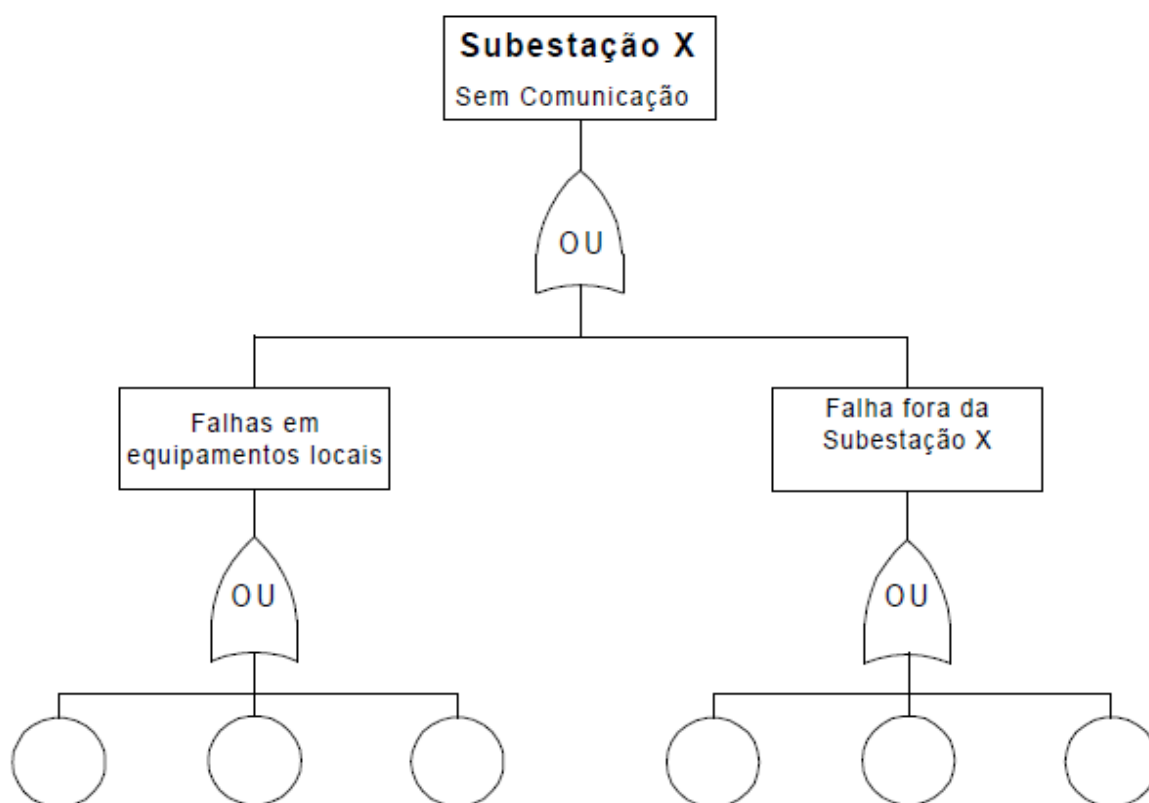


Figura 14 - Exemplo de Árvore de falhas.  
Fonte: SCHEER, 1999.

#### 4.4 COMENTÁRIOS FINAIS

A metodologia a ser empregada para o estudo de caso a seguir, baseia-se nas premissas de estado de Markov, o qual proporcionará a probabilidade de segurança para o sistema de *switches* nas configurações com redundância (anel e estrela dupla); E segundo a metodologia da árvore de falhas para a topologia em estrela, o qual se adota um evento de topo, neste caso, o evento é a falha de comunicação no barramento de estação que está referido a situação hipotética a ser proposta.

Como base referencial e de análise quantitativa, utiliza-se para todas as topologias o cálculo de confiabilidade, que consequentemente proporcionarão resultados de MTTF em anos para todo o sistema, e cálculos de disponibilidade, que proporcionam quanto o sistema se apresentará disponível em relação ao MTTF e MTTR de cada elemento, levando em consideração a respectiva associação construtiva dos mesmos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise de confiabilidade das diferentes topologias será adotada a utilização de alguns componentes, sendo estes:

- *MACH4000 Series Gigabit Backbone Layer 2/3 Rack-Mount Switch*; MTBF entre 11,1 à 18,9 anos. Tempo de recomposição em anel menor que 80 ms; Fabricante HIRCHMANN (HIRSCHMANN, 2012);
- *IED 670 series* da ABB, MTBF de 100-200 anos com função de auto-supervisão (ABB, 2015);
- Infraestrutura por fibra óptica.

A configuração hipotética adotada para a análise será um sistema composto por 3 *Bays*, cada um formado por 3 IEDs de proteção especificados acima. Este sistema estará conectado a um barramento de estação de uma subestação por meio de fibras ópticas, com o respectivo emprego dos *Switches Ethernet* dispostos conforme a topologia a ser empregada.

Para o *switch* proposto, utilizando a equação (6) e adotando um MTBF médio de 15 anos, tem-se que a disponibilidade para o elemento é de 99,9817%; E para o IED, adotando um MTBF médio de 150 anos, tem-se disponibilidade de 99,9982%.

Para as fibras ópticas, adotando uma taxa de uma falha por quilômetro, assume-se um comprimento máximo de menos de 100 metros para cada ligação, logo, tem-se um MTTF de 50 anos, e conseqüentemente uma disponibilidade de 99,9945%. (MILITARY, 1991).



## 5.1 ANÁLISE DA TOPOLOGIA EM ESTRELA

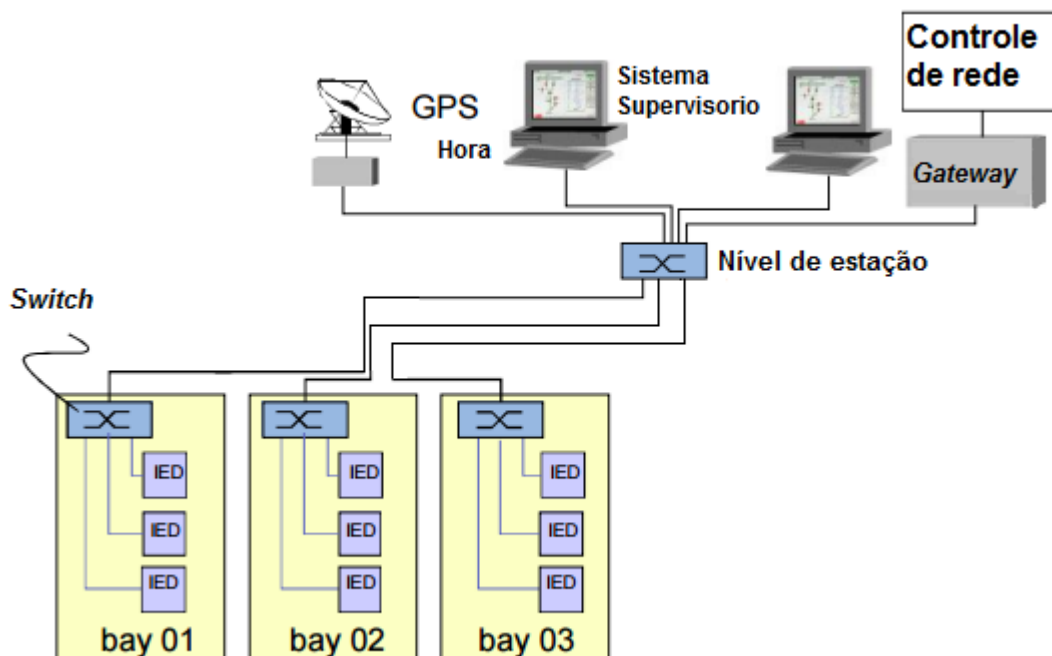


Figura 15 - Topologia Hipotética em Estrela.  
Fonte: ABBCH-RD, 2015.

A partir da situação hipotética proposta pela figura 15, a disponibilidade para o sistema pode ser calculada da seguinte forma, conforme a fórmula (12) (TOURNIER, 2010):

$$Asistema = [As \times Aied^3 \times Afo^3]^3 \times As \times Afo^3 \quad (15)$$

Onde  $As$  é a disponibilidade do *switch*;

$Aied$  é a disponibilidade do IED;

$Afo$  é a disponibilidade da fibra óptica;

Logo, tem-se que a disponibilidade do sistema é de 99,8447%.

A confiabilidade do sistema proposto, representado pelo seu respectivo MTTF, pode ser calculado da seguinte forma conforme a fórmula (11) (TOURNIER, 2010):

$$Rsistema(t) = [Rs(t) \times Ried^3(t) \times Rfo^3(t)]^3 \times Rs(t) \times Rfo^3(t) \quad (16)$$

Onde  $Rs(t)$  é a confiabilidade do *switch* representado por  $e^{-\frac{t}{15}}$  ;

Aied é Ried(t) é a confiabilidade do IED representado por  $e^{-\frac{t}{150}}$  ;

Afo é a Rfo(t) é a confiabilidade da fibra óptica representado por  $e^{-\frac{t}{50}}$  ;

$$MTTFsistema = \int_0^{\infty} Rsistema(t) dt \quad (17)$$

$$MTTFsistema = \int_0^{\infty} (e^{-\frac{t}{15}})^4 \times (e^{-\frac{t}{150}})^9 \times (e^{-\frac{t}{50}})^{12} dt \quad (18)$$

Deste modo, verifica-se que o sistema apresenta um MTTF de 1,76 anos, o que corresponde aproximadamente a 1 ano e 9 meses .

Analisando a situação hipotética proposta segundo o método de árvore de falhas para a topologia em estrela, conforme a figura (15) tem-se que, adotando um MTTR de 24 horas e MTBFs dos respectivos componentes mencionados anteriormente, pode-se obter pela equação (5) os seguintes valores:

Para cada IED 670 *series* da ABB, com MTBF médio de 150 anos, obtém-se uma indisponibilidade de  $18,2648 \times 10^{-6}$ , para cada *switch* MACH4000 Series da *Hirshmann*, com MTBF médio de 15 anos, obtém-se uma indisponibilidade  $182,648 \times 10^{-6}$ , e para a fibra óptica, tem-se que,  $q = 54,7975 \times 10^{-6}$ . Equacionando o sistema segundo a figura 16 tem-se que (SCHEER, 1999):

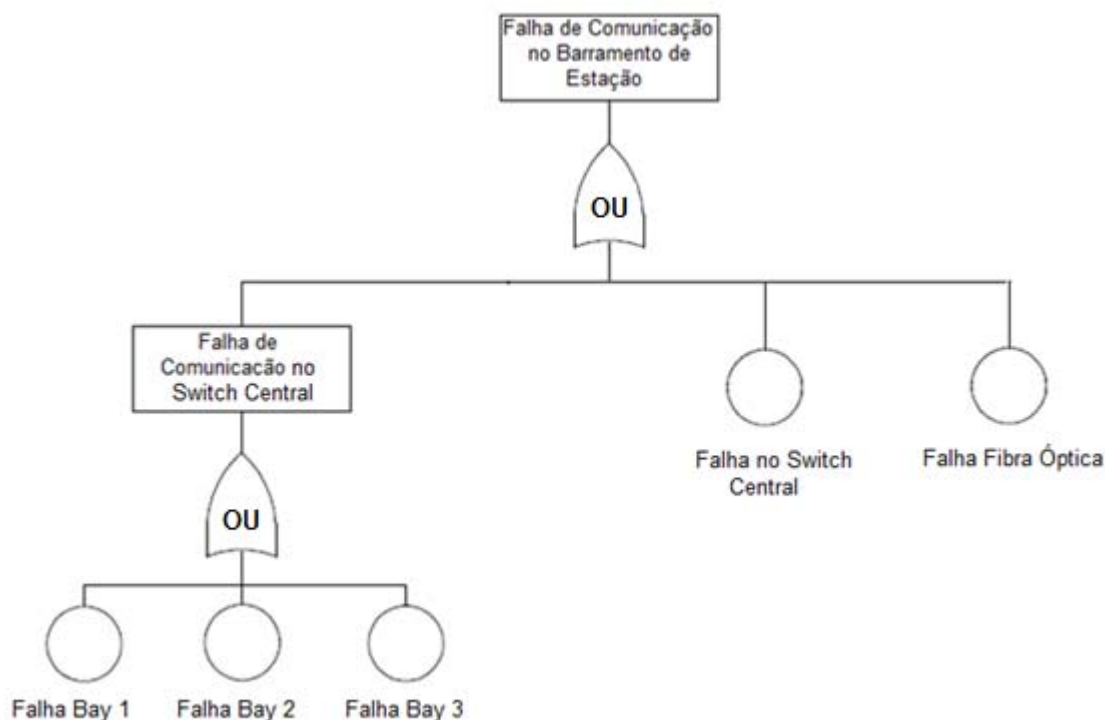
$$q = (3qs + 9ied + 9qfo) + qs + 3qfo \quad (19)$$

Onde,  $qs$  é a indisponibilidade do *switch*;

$qied$  é a indisponibilidade do IED;

$qfo$  é a indisponibilidade da fibra óptica.

Logo a indisponibilidade do evento de topo da figura 16 será de  $q = 1607,3427 \times 10^{-6}$ :



**Figura 16 – Árvore de falhas.**  
Fonte: SCHEER, 1999.

Em uma Topologia em Estrela, todos os nós periféricos podem se comunicar entre si transmitindo dados para o nó central e recebendo dados do mesmo. A falha de uma linha de transmissão ligando qualquer nó periférico para o ponto central vai resultar no isolamento do respectivo nó periférico, mas o resto do sistema não será afetado. A topologia em si, pela própria disposição dos componentes apresenta algumas vantagens (NETWORKING, 2015):

1. Menor quantidade de cabos de rede e interconexões, comparado as outras topologias abordadas;
2. Ideal para IEDs com uma única porta *Ethernet*;
3. Ideal para redes que não contemplem redundância de funções entre IEDs;

4. Maior flexibilidade, pois os dispositivos podem ser adicionados ou removidos sem afetar os outros dispositivos da rede (NETWORKING, 2015).

Dentre algumas desvantagens podemos citar:

1. Ausência de redundância de caminho de rede para cada IED e funções associadas;
2. Risco de igualar ou exceder a capacidade máxima de portas do *switch* impedindo reconfigurações ou interligação de novos elementos à rede;
3. Caso ocorra uma falha no nó central, o sistema todo é afetado (NETWORKING, 2015).

## 5.2 ANÁLISE DA TOPOLOGIA EM ANEL

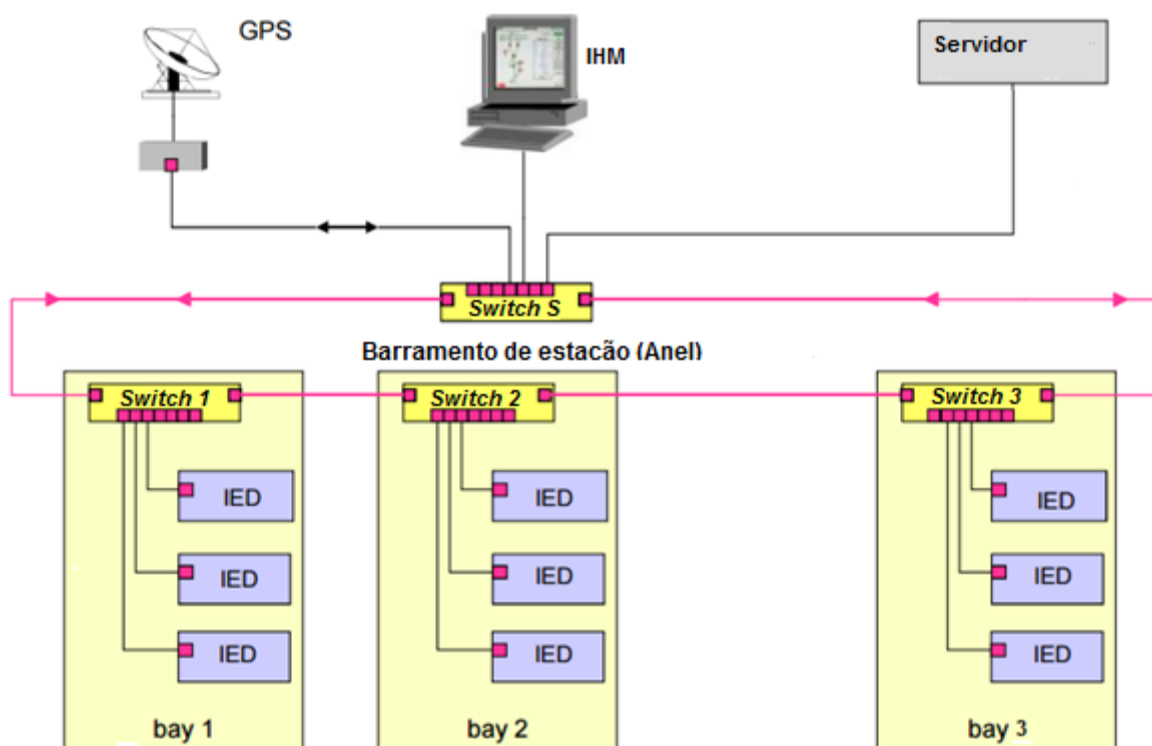


Figura 17 – Topologia Hipotética em Anel.  
Fonte: ABBCH-RD, 2015.

Os cálculos utilizados para encontrar a disponibilidade nas topologias em anel são mais complexos do que aqueles utilizados nas topologias em série ou paralelas. Um método comum utilizado é baseado em enumerar as diferentes combinações de dispositivos que estão em operação com aqueles que não estão. Portanto, para o conjunto de *switches* ligado em anel apresentado na Figura 17, existem 8 elementos (quatro fibras e quatro *switches*) que conduzem a  $2^8$  ou 256 combinações diferentes para avaliação. No entanto, uma boa aproximação do cálculo já pode ser conseguida apenas por enumerar o número de combinações válidas de todos os elementos que trabalham menos um. Portanto, tem-se que (TOURNIER, 2010):

$$Asistema = \left[ \left( As \times \left( \left( As^4 \times (Afo^4 + 4 \cdot Afo^3(1 - Afo)) \right) + 4 \cdot (As \cdot (1 - As) \times Afo^4) + 7 \cdot (As^4 \times Afo^2 \times (1 - Afo)^2) \right) \right) \times Aied^9 \times Afo^9 \right] \quad (20)$$

Onde  $As$  é a disponibilidade do *switch*;

$Aied$  é a disponibilidade do IED;

$Afo$  é a disponibilidade da fibra óptica.

Logo, temos que a disponibilidade do sistema é de a 99,9343%.

No que diz respeito à confiabilidade do sistema em anel, seu respectivo MTTF pode ser calculado da seguinte forma: (TOURNIER, 2010):

$$Rsistema(t) = \left[ \left( Rs(t) \times \left( \left( Rs(t)^4 \times (Rfo^4(t) + 4 \cdot Rfo^3(t)(1 - Rfo(t))) \right) + 4 \cdot (Rs(t) \cdot (1 - Rs(t)) \times Rfo^4(t)) + 7 \cdot (Rs^4(t) \times Rfo^2(t) \times (1 - Rfo(t))^2) \right) \right) \times Ried^9(t) \times Rfo^9(t) \right] \quad (21)$$

Onde  $Rs(t)$  é a confiabilidade do *switch* representado por  $e^{-\frac{t}{15}}$  ;

$Aied$  é  $Ried(t)$  é a confiabilidade do IED representado por  $e^{-\frac{t}{150}}$  ;

Afo é a Rfo(t) é a confiabilidade da fibra óptica representado por  $e^{-\frac{t}{50}}$ ;

$$MTTF_{sistema} = \int_0^{\infty} R_{sistema}(t) dt \quad (22)$$

$MTTF_{sistema} =$

$$\int_0^{\infty} (e^{-\frac{t}{15}} x (((e^{-\frac{t}{15}})^4 x ((e^{-\frac{t}{50}})^4 + 4 \cdot (e^{-\frac{t}{50}})^3 x (1 - e^{-\frac{t}{50}}))) + 4 \cdot ((e^{-\frac{t}{15}}) x (1 - e^{-\frac{t}{15}}) x (e^{-\frac{t}{50}})^4) + 7 \cdot ((e^{-\frac{t}{15}})^4 x (e^{-\frac{t}{50}})^2 x (1 - e^{-\frac{t}{50}})^2))) x (e^{-\frac{t}{150}})^9 x (e^{-\frac{t}{50}})^9) dt \quad (19)$$

Deste modo, verifica-se que o sistema apresenta um MTTF de 3,25 anos, o que corresponde aproximadamente a 3 anos e 4 meses.

A topologia em anel apresenta n-1 redundância, apresentando algumas vantagens de utilização, tais como:

1. Transmissão de dados relativamente simples, com pacotes de dados que trafegam em uma única direção;
2. A adição de nós tem pouco impacto na largura de banda;
3. A configuração impede colisões de rede com emprego do protocolo RSTP (N-TRON,2015).

Dentre as desvantagens de utilização pode-se citar:

1. A falha de um *switch* pode tornar um sistema de controle inoperável;
2. A implementação requer *switches* gerenciáveis com custos elevados;
3. Todo o tráfego de dados deve fluir no anel, limitando a largura de banda da instalação para 100Mb / s (N-TRON,2015).

Utilizando o método de estados de Markov para analisar a segurança proporcionada pelo conjunto de *switches* das topologias em anel e estrela dupla, ambas com redundâncias, temos as seguintes situações:

No caso da topologia em anel, utilizando 4 Switches Ethernet MACH4000 Series com MTTFS de aproximadamente 15 anos, tem-se (ANDERSSON, 2005):

$$L = nS/MTTFS \quad (23)$$

$$E = (nS \cdot tS)/tS \quad (24)$$

Onde L é igual taxa L (Erro Ocorrido);

E é igual a taxa E(Erro detectado);

nS é o número de *switches*;

MTTFS é o Tempo Médio para Falhar do switch;

tS é o tempo de recomposição do sistema.

Deste modo, nota-se que L é igual a 0,26666/ano e E é igual 4/s, assumindo que a média de detecção de erro e tempo de recomposição do sistema é de 80ms, e que M é 1 devido a redundância que a topologia em anel fornece, tem-se segundo a fórmula (3) que a probabilidade de segurança do sistema de *Switches* será de aproximadamente 99,999999789% (ANDERSSON, 2005).

### 5.3 ANÁLISE DA TOPOLOGIA EM ESTRELA DUPLA

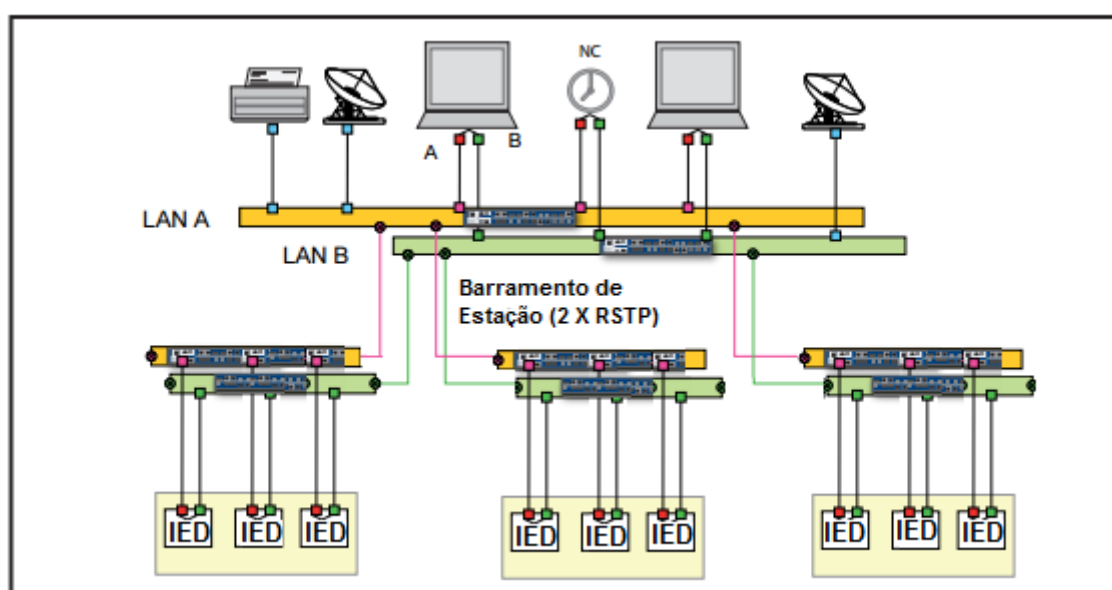


Figura 18 – Topologia Hipotética em Estrela Dupla.  
Fonte: (HIRSCHMANN, 2015).

A topologia em estrela dupla está baseada no protocolo PRP e na utilização de uma infra-estrutura de comunicação duplicada. Deste modo, para obter a disponibilidade do sistema da figura 18 a partir dos conceitos empregados nas fórmulas (12) e (13), tem-se que (TOURNIER, 2010):

$$Asistema = [(Aied^3 x (1 - (1 - Afo)^2)^3 x (1 - (1 - As)^2)]^3 x (1 - (1 - As)^2) x (1 - (1 - Afo)^2)^3 \quad (25)$$

Onde  $As$  é a disponibilidade do *switch*;

$Aied$  é a disponibilidade do IED;

$Afo$  é a disponibilidade da fibra óptica.

Logo, temos que a disponibilidade do sistema é de 99,9838%.

A confiabilidade do sistema em estrela dupla proposto, representado pelo seu respectivo MTTF, pode ser calculado da seguinte forma conforme as fórmulas (11) e (14) (TOURNIER, 2010):

$$Rsistema(t) = [(Ried^3(t) x (1 - (1 - Rfo(t))^2)^3 x (1 - (1 - Rs(t))^2)]^3 x (1 - (1 - Rs(t))^2) x (1 - (1 - Rfo(t))^2)^3 \quad (26)$$

Onde  $Rs(t)$  é a confiabilidade do *switch* representado por  $e^{-\frac{t}{15}}$  ;

$Aied$  é  $Ried(t)$  é a confiabilidade do IED representado por  $e^{-\frac{t}{150}}$  ;

$Afo$  é a  $Rfo(t)$  é a confiabilidade da fibra óptica representado por  $e^{-\frac{t}{50}}$  ;

$$MTTFsistema = \int_0^{\infty} Rsistema(t) dt \quad (27)$$



$$MTTF_{sistema} = \int_0^{\infty} (1 - (1 - e^{-\frac{t}{15}})^2)^3 x (e^{-\frac{t}{150}})^9 x \left(1 - (1 - e^{-\frac{t}{50}})^2\right)^3 x \left(1 - (1 - e^{-\frac{t}{15}})^2\right)^2 x (1 - (1 - e^{-\frac{t}{50}})^2)^3 \quad (28)$$

Deste modo, verifica-se que o sistema apresenta um MTTF de 5,49 anos, o que corresponde aproximadamente a 5 anos e 6 meses.

Utilizando o método de estados de Markov para analisar a topologia em estrela dupla, através de 8 *Switches* Ethernet MACH4000 Series com MTTF de aproximadamente 15 anos, tem-se por meio das fórmulas (23) e (24) que L é igual a 0,533333/ano e E é igual 8/s. Assumindo que a média de detecção de erro e tempo de recomposição do sistema é de 80ms, e que M é 1 devido a redundância que a topologia em estrela dupla fornece, tem-se segundo a fórmula (3) que a probabilidade de segurança do sistema de *Switches* será de aproximadamente 99,999999789% (ANDERSSON, 2005).

Na topologia em estrela dupla, ocorrerá a utilização de duas LANs, cada uma com 2 fibras ópticas (um para transmissão e outro para recepção) e mais 2 fibras ópticas como cópia de segurança entre cada *Bay* com o nível de estação, deste modo enquanto as fibras correspondem a menos de 2 km de distância, ela se torna superior na viabilidade de utilização em relação a custo e confiabilidade quando comparado com a topologia em anel, pois acima de 2 km o custo com fibras se torna superior aos *Switches* a serem empregados. (AUTOMATION, 2010).

A topologia em estrela dupla apresenta n-2 redundâncias, apresentando algumas vantagens de utilização, tais como:

1. Maior confiabilidade de comunicação com a duplicação da rede;
2. Utilização do protocolo PRP para gerir a transferência de dados;

Dentre as desvantagens de utilização pode-se citar:

1. Maior número de dispositivos com a duplicação da rede;
2. Maior custo de implantação;

## 5.4 FATORES RELACIONADOS À CONFIABILIDADE E DESEMPENHO DA REDE

### 5.4.1 Emprego dos Protocolos HSR e PRP

Em relação à comparação de confiabilidade entre os protocolos HSR e PRP, nota-se que o protocolo HSR parece ser a solução mais acessível quando comparado ao PRP, pois exige menos conexões e *switches* de comunicação independentes, porém, erros de *software* ou *hardware* em um IED poderia impactar a rede HSR diretamente e assim reduzir a sua confiabilidade (SIEMENS, 2014).

Quanto mais “nós” se tem em um anel de HSR, mais atrasos de comunicação e uso de largura de banda se terá causado pela latência, pois todas as estações estão compartilhando um meio físico. Isto significa que o tamanho dos anéis HSR é limitada. Na prática, esta desvantagem da topologia pode ser compensada por uma divisão em vários anéis. Além disso, a instalação de *switches* HSR com IEDs torna a manutenção e atualização do sistema mais problemático, enquanto o PRP suporta a conexão de dispositivos individuais sem capacidade PRP e componentes adicionais. Isto torna o PRP mais flexível para algumas implementações em comparação com o HSR. A manutenção também se torna mais fácil quando se conecta os IEDs a uma rede PRP redundante, pois a remoção de um IED individual ou até mesmo de todo o painel durante a operação ou a adição de novos IEDs não tem impacto sobre toda a rede (SIEMENS, 2014).

### 5.4.2 Latência de Comunicação

No que diz respeito à Latência de comunicação, ela deve ser a menor possível por motivos de aplicação. A latência aumenta proporcionalmente ao número de *switches* utilizados na configuração do sistema especialmente se muitos *switches* em cascata são utilizados. Com a utilização do *Gigabit Ethernet* a latência pode ser significativamente reduzida (HIRSCHMANN, 2012).

### 5.4.3 Fibra Óptica

A confiabilidade de um sistema de comunicação também está diretamente ligada a sua infraestrutura de ligação, um sistema de comunicação possuirá uma maior capacidade de transmissão de informação ou largura de banda com a utilização de fibra óptica, além disso, as fibras ópticas podem transmitir dados numa velocidade muito maior e possuem menor sensibilidade à interferência eletromagnética comparada ao cobre, possibilitando a transferência de dados com eficiência para distâncias maiores, acima de 100m, por exemplo (PWNET,2015).

### 5.4.4 IEDs com Funções de Auto-Supervisão

Outro fator importante para o aumento de disponibilidade e confiabilidade de todo o sistema de comunicação é a utilização de IEDs com funções de auto-supervisão, funções as quais asseguram que as falhas possam ser detectadas imediatamente. A auto-supervisão pode ser realizada utilizando recursos padrão, como as funções de vigilância e verificação presentes no *software* para obter o máximo de cobertura possível de supervisão (ABB, 2015).

Também é possível controlar o fluxo de dados para os vários sistemas de comunicação ligados ao dispositivo supervisionado. As mensagens do sistema de auto supervisão podem estar disponível localmente e remotamente, o que simplifica ainda mais a detecção de avarias, e reduz o tempo para o reparo, por exemplo, pela identificação de peças defeituosas (ABB, 2015).

## 5.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Segundo os resultados obtidos junto aos respectivos cálculos de disponibilidade e confiabilidade para as topologias em estrela, anel e dupla estrela, a Tabela 2 sumariza os dados, evidenciado que a configuração em estrela dupla proporciona um maior MTTF, conseqüentemente, uma maior disponibilidade devido à duplicação da rede a qual está submetida. Logo após, tem-se que a topologia em anel é a configuração que proporciona uma disponibilidade e confiabilidade intermediária em relação às demais, e, por conseguinte, a topologia em estrela pela falta de redundância, possui a configuração menos confiável.

Tabela 2 - Disponibilidade e Confiabilidade das Topologias em Estrela, Anel e Estrela Dupla.

<b>Topologia</b>	<b>Disponibilidade (%)</b>	<b>MTTF (anos)</b>
Estrela	99,8447	1,76
Anel	99,9343	3,25
Estrela Dupla	99,9838	5,49

Fonte: Aatoria Própria.

No que diz respeito à probabilidade de segurança proporcionada pelo conjunto de *switches* das topologias com redundância, tem-se segundo a Tabela 3 que a topologia em anel fornece uma maior probabilidade de segurança devido a menor quantidade de switches que a configuração demanda, deste modo, nota-se que a taxa de erro ocorrido e a taxa de erro detectado (L e E, respectivamente) do sistema aumenta proporcionalmente com o número de *switches*.

Tabela 3 - Probabilidade de Segurança do Sistema de Switches das Topologias com Redundância.

<b>Topologia</b>	<b>Probabilidade de Segurança (%)</b>
Anel	99,999999789
Estrela Dupla	99,9999997890

Fonte: Aatoria Própria.

## 6 CONCLUSÃO

O padrão IEC 61850 padronizou a comunicação entre IEDs, possibilitando a transmissão de dados entre equipamentos de diversos fabricantes em uma subestação. Tendo em vista a diversidade de topologias de comunicação utilizadas para conectar os dispositivos de controle, supervisão, proteção e medição desde o nível de processo até o nível de estação, vê-se a necessidade de analisar a confiabilidade entre estas topologias.

A análise de confiabilidade fundamentada nas premissas do modelo de Markov, árvore de falhas, estudos de disponibilidade, confiabilidade e utilização de redundâncias, possibilita o estudo da rede de comunicação frente às possíveis falhas que possam ocorrer nos nós e *switches* existentes em cada configuração abordada. A análise das características construtivas das topologias também é essencial para assegurar a confiabilidade e a respectiva viabilidade de utilização.

No que diz respeito às topologias propriamente dito, após as análises propostas, verifica-se que a topologia em estrela fornece uma disponibilidade menor comparada à estrela dupla e anel, porém torna-se ideal às redes que não contemplam redundância de funções entre IEDs, possuindo um menor custo com infraestrutura e com a possibilidade de utilização de *switches* não gerenciáveis. Em relação à confiabilidade, a configuração em estrela abordada apresentou um MTTF do sistema de aproximadamente 1,76 anos, ou seja, o tempo médio de falha da configuração é relativamente menor que as topologias em anel e estrela dupla propostas, devido à falta de redundância do sistema que impacta diretamente sua confiabilidade.

A topologia em anel proporciona uma confiabilidade e disponibilidade maior que a configuração em estrela, onde a adição de nós tem pouco impacto na largura de banda, porém utiliza-se na maioria das vezes *switches* com protocolos RSTP e HSR, por exemplo, que torna o custo construtivo do sistema maior quando comparado à estrela. A redundância proporcionada pelo tráfego de informações em ambos os lados do anel frente uma falha propicia maior segurança ao sistema e vantajoso emprego frente aspectos de custo-benefício.

Por conseguinte, a configuração em estrela dupla oferece maior confiabilidade e disponibilidade entre as topologias estudadas, a duplicação do sistema e o emprego de *switches* com tecnologia PRP proporciona redundância ao sistema e

maior suporte a conexão de dispositivos individuais sem capacidade PRP e componentes adicionais tornando o sistema mais flexível para algumas implementações em comparação ao anel empregado com HSR.

A comunicação via fibra óptica também é essencial para assegurar melhorias, tanto na transmissão de dados com uma velocidade muito maior, quanto na menor sensibilidade à interferência eletromagnética comparada ao cobre.

Por fim, IEDs com funções de auto-supervisão são essenciais para detecção de falhas em imediato, por meio de funções de vigilância e verificação, garantindo deste modo, maior confiabilidade e disponibilidade ao sistema.

É válido ressaltar que além da confiabilidade e disponibilidade proporcionada por uma topologia, o seu emprego é fundamentado na aplicação que se deseja, pois além dos fatores estudados neste trabalho, o custo e a filosofia de trabalho do projetista com experiência na área serão fatores determinantes na escolha da melhor topologia a ser aplicada ou combinada em uma subestação.

**Tabela 4 – Comparativo entre as topologias.**

<b>Estrela</b>	<b>Anel</b>	<b>Estrela Dupla</b>
Disponibilidade menor comparada à estrela dupla e anel	Disponibilidade e a confiabilidade maior que a configuração em estrela	Oferece maior confiabilidade e disponibilidades entre as topologias estudadas
Menor custo com Infraestrutura	Custo maior que a configuração em estrela	Maior custo com implantação
Tempo médio de falha da configuração é relativamente menor que as topologias em anel e estrela dupla, devido à falta de redundância do sistema (MTTF=1,76anos)	Oferece boas condições de segurança ao sistema e vantajoso emprego frente aspectos custo benefício (MTTF=3,25 anos)	Tempo médio de falha da configuração foi o maior encontrado (MTTF=5,49anos)

**Fonte: Autoria Própria.**

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Um aspecto muito importante e decisivo ao escolher uma topologia para uma referida aplicação em um SAS está relacionado não somente com as premissas de maior disponibilidade e confiabilidade que uma configuração de rede propõe, mas também em relação ao custo necessário de implantação, pois além de um ambiente confiável e seguro, a competitividade no setor depende do custo-benefício que o projeto estabelece, deste modo, a análise de investimento inicial e o custos envolvidos na manutenção após um determinado tempo é um segmento a ser explorado como trabalho futuro.

## REFERÊNCIAS

ABB AB, Substation Automation Products, 2015. Västerås, Sweden. Disponível em [www.abb.com/substationautomation](http://www.abb.com/substationautomation). Acesso em 05 Nov. 2015.

ABB *Relion® 670 serie. Self supervision techniques, 670 series. Principles and functions*. Disponível em [https://library.e.abb.com/public/9830608e2e48f75fc12576f10031debf/1MRK580172-XEN\\_A\\_en\\_670\\_series\\_self\\_supervision.pdf](https://library.e.abb.com/public/9830608e2e48f75fc12576f10031debf/1MRK580172-XEN_A_en_670_series_self_supervision.pdf). Acesso em 27 Out. 2015.

ABBCH-RD, *Introduction to the IEC 61850 electrical utility communication standard*. Disponível em [http://lamspeople.epfl.ch/kirrmann/Slides/AI\\_421\\_IEC61850.pdf](http://lamspeople.epfl.ch/kirrmann/Slides/AI_421_IEC61850.pdf). Acesso em 27 Out. 2015.

ALMEIDA, Ezequiel Mendes de. **NORMA IEC 61850 – Novo padrão em automação de subestações**. 2011, 72 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011.

ANDERSSON, Lars; BRAND, Klaus. Reliability investigations for SA communication architectures based on IEC 61850. In: Power Tech, 2005 IEEE, 06, 2005, Rússia.

AUTOMATION, NETTED, MINIMUM COMMON SPECIFICATION FOR SUBSTATION PROTECTION AND CONTROL EQUIPMENT IN ACCORDANCE WITH THE IEC 61850 STANDARD, 2010. Disponível em [http://www.nettedautomation.com/download/std/61850/e3\\_iec\\_61850\\_specification\\_document\\_20100609.pdf](http://www.nettedautomation.com/download/std/61850/e3_iec_61850_specification_document_20100609.pdf). Acesso em 05 de Nov. 2015.

AVELAR, Victor. Torell, Wendy. Tempo Médio Entre Falhas: Explicação e Padrões. APC – American Power Conversion, 2004. Disponível em [http://computerworld.com.br/estaticas/downloads/wp\\_apc\\_mtbfd.pdf](http://computerworld.com.br/estaticas/downloads/wp_apc_mtbfd.pdf). Acesso em 17 Nov. 2015.

DUARTE, Alexandre Bitencourt. **Fundamentos da série de normas IEC 61850 e sua aplicação nas subestações**. 2012, 58 f. Monografia (Pós-graduação em teleinformática e redes de computadores) – Departamento de Engenharia Eletronica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

FRANCO, Paulo; OLIVEIRA, Carlos; ROCHA, Geraldo. Aumento da confiabilidade de esquemas de proteção e controle em IEC 61850 com o uso de Message Quality.



Schweitzer Engineering Laboratories. Disponível em: <[http://www.selinc.com.br/art\\_tecnicos/Aumento\\_da\\_confiabilidade\\_de\\_esquemas\\_de\\_protecao\\_e\\_controle\\_em\\_IEC\\_61850.pdf](http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/Aumento_da_confiabilidade_de_esquemas_de_protecao_e_controle_em_IEC_61850.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2014.

GURJÃO, E.C; CARMO, U. A; SOUZA, B.A. **Aspectos de Comunicação da Norma IEC 61850**. Disponível em: <[http://www.ceb5.cepel.br/arquivos/grupo\\_trabalho/WgB5.11/ReferênciasSobre61850/145\\_SBSE\\_2006.pdf](http://www.ceb5.cepel.br/arquivos/grupo_trabalho/WgB5.11/ReferênciasSobre61850/145_SBSE_2006.pdf)>. Acesso em: 26 maio 2015.

HIRSCHMANN. PRP - Parallel Redundancy Protocol. Disponível em: [http://www.hirschmann.com/en/Hirschmann\\_Produkte/Industrial\\_Ethernet/Technologies/PRP\\_-\\_Parallel\\_Redundancy\\_Protocol/index.phtml](http://www.hirschmann.com/en/Hirschmann_Produkte/Industrial_Ethernet/Technologies/PRP_-_Parallel_Redundancy_Protocol/index.phtml). Acesso em: 10 jun. 2015.

HIRSCHMANN. *MACH4000 Series Gigabit Backbone Layer 2/3 Rack-Mount Switches*. Disponível em: [https://www.belden.com/docs/upload/MACH4000\\_brochure.pdf](https://www.belden.com/docs/upload/MACH4000_brochure.pdf). Acesso em 17 Out. 2015.

HIRSCHMANN. Substation network topology. Disponível em: <http://belden.picturepark.com/Website/Download.aspx?DownloadToken=8502db40-dcf1-485c-856a-a41a67cd8657&Purpose=AssetManager&mime-type=application/pdf>. Acesso em: 10 jun. 2015.

HIRSCHMANN. White Paper – Data Communication in a Substation Automation System (SAS), 2012. Disponível em: [https://www.hardy-schmitz.de/cms/yello/upload/Downloads/White\\_Paper\\_von\\_HIRSCHMANN/White\\_Paper\\_-\\_Data\\_Communication\\_in\\_Substation\\_Automation\\_SAS\\_-\\_Part\\_2\\_Original\\_23354.pdf](https://www.hardy-schmitz.de/cms/yello/upload/Downloads/White_Paper_von_HIRSCHMANN/White_Paper_-_Data_Communication_in_Substation_Automation_SAS_-_Part_2_Original_23354.pdf). Acesso em: 05 Nov. 2015.

IEC 60870-4, Equipamentos e sistemas de tele controle; Parte 4 - Requisitos de desempenho.

KANABAR, Mitalkumar; TARLOCHAN, Sidhu. Reliability and availability analysis of IEC 61850 based substation communication architectures. In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 07, 2009, Canadá.

KANEDA, Keiichi; TAMURA, Setsuo; FUJIYAMA, Nobuhisa; ARATA, Yoshikazu; ITO, Hachidai. IEEE – IEC 61850 based Substation Automation System. In: IEEE POWER INDIA CONFERENCE, 10, 2008, India.

KIMURA, Sergio; ROTTA, André; ABOUD, Ricardo; MORAES, Rogério; ZANIRATO, Eduardo; BAHIA, Juliano. Applying IEC 61850 to Real Life: Modernization Project for 30 Electrical Substations. In: PROCEEDINGS OF THE 10th ANNUAL WESTERN POWER DELIVERY AUTOMATION CONFERENCE, 04, 2008, Spokane, WA.

MENDES, R. Douglas. Redes de Computadores - Teoria e Prática. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2007.

“Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment,” US Department of Defense, Tech. Rep., 1991.

MOREIRA, André. Redes Ethernet (IEEE 802.3). Departamento de Engenharia Informática do ISEP. Disponível em: < <http://www.dei.isep.ipp.pt/~andre/documentos/ethernet.html>> Acesso em: 24 maio 2015.

N-TRON Corp. Differences Between Industrial Ethernet Fiber Optic Backbone, Ring, and Star Topologies Disponível em [https://www.shoshin.co.jp/c/ntron/pdf/Ring\\_vs\\_Star.pdf](https://www.shoshin.co.jp/c/ntron/pdf/Ring_vs_Star.pdf). Acesso em: 22 de Out. 2015

NETWORKING, Notes. *Star Topology ring Topology bus Topology Logical Physical mesh Topology*, 2015. Disponível em <http://computernetworkingnotes.com/network-technologies/network-topologies.html>. Acesso em 05 Nov. 2015

PAULINO, Marcelo. Testes de IEDs operando com redes de comunicação baseados na IEC 61850. Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ – Foz do Iguaçu-PR, Maio 2007.

PECENIN, Marcelo. Modelo de Arquitetura Base para Implementação de Aplicações Baseadas na IEC-61850 – Monografia de Pós Graduação em Engenharia de Software, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Câmpus Medianeira - Medianeira-PR, 2011.

PEREIRA, A. Cascaes; CÁCERES, David; FILHO, M. Jorge; PELLIZONI, R.; CORREIA, J. Roberto. Automação de Subestações e Usinas – Estado da arte e tendências utilizando a Norma IEC 61850, Anais do VII SIMPASE - Sétimo Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos – Salvador-BA, Agosto 2007.

PWNET, Internet via Fibra Óptica, 2015. Disponível em <http://pwnet.com.br/>. Acesso em 05 Nov. 2015.

RODRIGUES, F. Guilherme. Benefícios da utilização da norma IEC 61850 em sistemas de automação de subestações e proteção de sistemas elétricos. Dissertação de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, F. Luis; PEREIRA, Maurício. Uma abordagem prática do IEC 61850 para automação, proteção e controle de subestações, Anais do VII SIMPASE - Sétimo Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos – Salvador-BA, Agosto 2007.

SCHEER, W. Gary; Comparison of fiber-optic star and ring topologies for electric power substation communications. In: proceedings of the 1st Annual Western Power Delivery and Automation Conference, 1999, Estados Unidos.

SCHEER, W. Gary; DOLEZILEK, J. David. Comparing the reliability of ethernet network topologies in substation control and monitoring networks. In: Western Power Delivery Automation Conference, 2000, Estados Unidos.

SIEMENS, Industry. Availability in communication networks for station automation, 2014. Disponível em: [http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/automation/Tech-Art/2013/FAV-336-2013-IA-SC/FAV-336-2013-IA-SC-V01\\_EN.pdf](http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/automation/Tech-Art/2013/FAV-336-2013-IA-SC/FAV-336-2013-IA-SC-V01_EN.pdf). Acesso em 05 de Nov. 2015.

TOURNIER, Jean-Charles; WERNER, Thomas. A Quantitative Evaluation of IEC 61850. Process Bus Architectures, IEEE Article, 2010, Raleigh, USA.

WEBER, T. Silva. Tolerância a Falhas: medidas. 2006. Disponível em <http://docslide.com.br/documents/manuten-aa0-mtrr-mtbf-mttf.html>. Acesso em 05 Nov. 2015.