
**PROJETO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELETRICOS
CONFORME NORMA IEC 61850**

MARCELO LUIS PEREIRA ARAUJO

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Controle e Proteção de SEP, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em 30 de julho de 2012

**Peterson Resende - Dr.
Supervisor**

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Coordenador do CESEP**

SUMÁRIO

Capítulo 1	6
Introdução.....	6
1.1 Relevância	7
1.2 Objetivos	7
1.3 Organização do texto	7
Capítulo 2	9
Conceitos Básicos em Sistemas de Automação	9
2.1 Redes de comunicação e suas arquiteturas	9
2.2.1 Protocolos de Rede	10
2.2 Sistemas de Automação de Subestações (SAS)	11
2.3 Sistema de Proteção de SEP	12
Capítulo 3	13
3.0 A norma IEC 61850	13
3.1 Seções da norma	13
3.2 Mensagens GOOSE.....	19
3.3 Sistema de Automação de Subestações – SAS	20
3.4 Classe Comum de Dados (CDC).....	25
3.5 Mapeamento de serviços abstratos para protocolos.....	28
3.6 Linguagem de Programação	31
3.7 Requisitos de Comunicação	33

3.8	Procedimento de Testes.....	38
3.8.1	Testes de Conformidade	39
3.8.2	Testes de Interoperabilidade	41
3.8.3	Testes de Desempenho	41
3.9	Benefícios de utilização da norma IEC 61850	42
3.10	Confiabilidade para comunicação nas arquiteturas baseadas em IEC 61850..	44
3.11	Sincronização de tempo em sistemas baseados em IEC 61850.....	50
	Capítulo 4	52
	Critérios para projetos de sistemas de automação utilizando a norma IEC 61850.....	52
4.1	Redes de Comunicação	52
4.1.1	Arquitetura de rede.....	52
4.1.2	Redundância de Comunicação.....	53
4.2	Sistemas de Automação.....	57
4.2.1	Guia para especificação	57
4.3	Fluxo de Engenharia para desenvolvimento do projeto	60
	Capítulo 5	65
	Conclusões e sugestões de trabalhos futuros.....	65
	Referencias Bibliográficas	67

RESUMO

Os primeiros sistemas de automação utilizados em subestações elétricas, normalmente eram compostos de fabricantes e gerações diferentes. Isso dificultava a integração e comunicação entre os mesmos, uma vez que a maioria possuía protocolos específicos e em muitos casos proprietários.

A norma IEC 61850 visa padronizar a comunicação entre sistemas e dispositivos em subestações elétricas e tem como objetivo principal garantir a interoperabilidade entre IEDs (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) de diferentes fabricantes.

Entretanto, a norma não é simplesmente um protocolo novo. A norma especifica o IED, a arquitetura de rede, como as informações devem ser armazenadas e disponibilizadas, os serviços disponíveis, além de definir vários aspectos como velocidade, novas funcionalidades entre outros que disponibilizam ao usuário um verdadeiro universo de possibilidades.

Percebe-se que ainda existe falta de conhecimento dos requisitos da norma IEC 61850 por grande parte dos profissionais da área. Neste trabalho serão apresentadas as principais possibilidades sugeridas pela norma visando fornecer aos profissionais da área adquirir um conhecimento que permita desenvolver projetos de acordo com os requisitos definidos na mesma.

Dentre os pontos definidos pela norma, atenção especial será dada a: planejamento do sistema, modelos de dados, protocolos e tipos de mensagens, linguagem de programação e arquitetura do sistema.

Ao final do trabalho serão apresentadas as principais conclusões onde se destacam os benefícios de utilização da norma e os principais pontos da norma que devem ser estudados e levados em consideração no desenvolvimento do projeto.

ABSTRACT

The first automation systems used in electrical substations usually consisted of different manufactures and generations. That made integration and communication difficult between the systems, since the majority had specific protocols and in many cases owners.

The IEC 61850 standard aims to standardize communication between systems and devices in electrical substations and the main objective is to ensure interoperability between IEDs (Intelligent Electronic Devices) from different manufacturers.

However, the standard is not simply a new protocol. The standard specifies the IED, the network architecture, how the information should be stored and available, services available, and defines various aspects such as speed, new features and others providing a true universe of possibilities to the user.

It can be noticed that there is lack of knowledge of the IEC 61850 standard requirements by most professionals. In this work will be analyzed the main possibilities suggested by the standard in order to provide professionals to acquire knowledge that allows them to develop projects in accordance with the requirements defined in the standard.

Among the points defined by the standard, special attention will be given to: system planning, data models, protocols and message types, programming language and system architecture.

At the end of this work will be presented the main conclusions which highlight the standard benefits and the main points of the standard that must be studied and considered in the project development.

Capítulo 1

Introdução

Pode-se dizer que atualmente a energia elétrica é um insumo básico sendo de fundamental importância no crescimento econômico dos países. Atualmente o sistema elétrico nacional é cada vez mais integrado em termos de distribuição e transmissão tornando o sistema mais complexo o que vem trazer a necessidade de um maior gerenciamento e controle do sistema elétrico. Outro ponto importante que justifica a implantação de sistemas de automação mais modernos se dá em função da crescente demanda energética que devido às restrições de recursos encontradas levam a necessidade da utilização máxima dos recursos existentes.

Foi necessário então desenvolver sistemas de automação com mais recursos que possam monitorar e controlar o sistema elétrico em tempo real visando aumentar a qualidade no fornecimento de energia, reduzindo quantidade e tempo de paradas.

Outro ganho significativo com estes sistemas de automação é a redução de custos operacionais e de segurança.

Isso foi possível devido ao notável desenvolvimento nos últimos anos das tecnologias ligadas a dispositivos eletrônicos. Com esta evolução os sistemas de automação passam cada dia a serem mais rápidos, confiáveis e possuem recursos antes inimagináveis. Podemos citar como os principais responsáveis por isso o desenvolvimento do processamento digital de sinais e das tecnologias de comunicação de dados e redes.

Atualmente um SAS (Sistema de Automação de Subestação) tem diversas funções onde podemos destacar: Supervisão, controle, proteção, oscilografia, intertravamento, telecomando entre outras. Estes sistemas são formados por diversos componentes que antes não faziam parte como *switches*, roteadores, *gateways*, modernos controladores e novos *softwares* que vêm permitir a execução destas novas funções. Outro ponto de destaque no desenvolvimento dos SAS é a criação da norma IEC 61850.

1.1 Relevância

A norma IEC 61850 vem sendo largamente utilizada na automação de sistemas elétricos e a tendência é de um crescimento ainda maior na utilização desta norma devido aos grandes benefícios definidos pela mesma. Portanto os engenheiros precisam estar preparados para desenvolvimento de projetos de acordo com os requisitos da norma.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar um estudo dos requisitos da norma IEC 61850 e elaborar um procedimento para desenvolvimento de projetos baseados na norma que permita aos engenheiros desenvolverem projetos de acordo com a norma e principalmente utilizando todos os recursos e benefícios definidos pela mesma.

A versão básica da norma tem aproximadamente 2000 páginas, a partir deste trabalho será possível ao leitor tomar conhecimento das principais partes da norma e com base na leitura decidir pela necessidade da leitura de toda a norma ou das seções específicas de cada tema.

1.3 Organização do texto

Este trabalho será desenvolvido basicamente em duas partes. A primeira parte consiste no estudo da norma e de outros trabalhos relativos aos benefícios e requisitos da norma. A segunda parte será um procedimento para que profissionais da área possam aplicar a norma da melhor maneira possível em cada tipo de projeto.

O Capítulo 2 contém a base conceitual para entendimento da norma e desenvolvimento de projetos baseados na mesma. Neste capítulo, é apresentada uma introdução a protocolos de rede, sua aplicação e diferenças. São apresentados também conceitos e características de sistemas de automação para sistemas elétricos industriais. As principais funcionalidades e requisitos da norma IEC 61850 são detalhadas no capítulo 3. No quarto capítulo, apresenta-se os principais critérios a serem considerados no desenvolvimento dos projetos.

As conclusões desse trabalho e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros são apresentadas no capítulo 5.

Capítulo 2

Conceitos Básicos em Sistemas de Automação

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar os conceitos básicos necessários para entendimento dos demais capítulos do trabalho. São apresentados conceitos genéricos sobre redes de comunicação suas principais características e funcionalidades. Os principais sistemas de automação também são detalhados.

É descrito resumidamente neste capítulo também as características de um sistema de proteção de SEP (Sistemas Elétricos de Potência).

2.1 Redes de comunicação e suas arquiteturas

As primeiras redes de comunicação eram na maior parte das vezes soluções proprietárias, ou seja, não era possível que dispositivos de comunicação de diferentes fabricantes fossem utilizados em uma mesma solução.

Para permitir a integração entre estes dispositivos a ISO (*International Organization for Standardization*) desenvolveu um modelo de referência chamado OSI (*Open Systems Interconnection*) para que os fabricantes criassem protocolos baseados no mesmo. O modelo é teórico e os protocolos criados a partir do mesmo não precisam utilizar todas as camadas definidas porém ele é de grande valia para explicar aspectos funcionais da rede.

O padrão de interesse neste trabalho é o *Ethernet TCP/IP* que é baseado no modelo OSI com algumas alterações. Este padrão é composto por 04 camadas: Aplicação, Transporte, Internet e Interface com a rede.

O padrão *Ethernet TCP/IP* é composto por uma pilha de protocolos nas diversas camadas com objetivos diferentes não havendo assim conflito entre os mesmos. O TCP/IP é utilizado nas camadas de Aplicação, Transporte e *Internet*. Já o *Ethernet* é utilizada na camada de Interface com a rede que pode ser subdivida em três partes: LLC, MAC e Física. Resumidamente podemos definir as seguintes funcionalidades para cada camada:

Aplicação: É a camada em que os programas usam para trocar informações com a rede de comunicação.

Transporte: É a camada responsável por dividir as informações da camada de aplicação em pacotes e enviar a camada de *Internet*.

Internet: Responsável por adicionar aos pacotes as informações de endereçamento virtual das estações envolvidas na troca de dados.

Interface com a Rede: É a camada responsável por enviar ou receber os dados na rede. Esta camada da rede é diretamente influenciada pelos dispositivos que fazem parte da rede.

Atualmente em função da quantidade de dispositivo existentes no mercado é possível fazer redes de comunicação com diversas arquiteturas. Podemos citar as seguintes: Anel, barramento e estrela. Estas arquiteturas podem ser agrupadas formando configurações mistas. Atualmente as redes de arquitetura em barramento são evitadas, pois são menos imunes a falhas do que as redes em anel e estrela.

2.2.1 Protocolos de Rede

Atualmente existem diversos protocolos utilizados em um SAS, desde os antigos padrões seriais aos mais modernos que são baseados no modelo Ethernet TCP/IP. Abaixo podemos verificar alguns destes protocolos assim como sua relação com o modelo OSI.

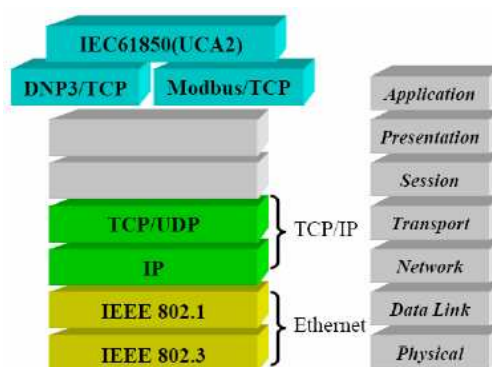


Figura 1. Protocolos de rede

(Fonte: POZZUOLI, (s.d.) pág. 57.)

2.2 Sistemas de Automação de Subestações (SAS)

Segundo Mello (2006), um sistema de automação para subestações é composto pelos seguintes equipamentos principais:

- Sistema de aquisição de dados.
- Unidades de aquisição e controle.
- TPs e TCs.
- Transdutores.
- Relés de interface.
- Equipamentos de oscilografia.
- Medidores Multifunção.
- Relés de Proteção.
- GPS
- Sistema de Supervisão.

Dentre estes equipamentos podemos destacar como principais as unidades de aquisição e controle e o sistema de supervisão que são resumidamente descritos abaixo de acordo com Mello (2006).

Unidades de Aquisição e Controle: Tem como funções primárias coletar os estados e medidas dos dispositivos da subestação e fornecer estas informações ao sistema de supervisão além de executar lógicas de controle e intertravamentos. Os principais componentes destas unidades são: Fontes, módulos de entradas e saídas (Digitais/Analógicos), módulo de processamento (CPU) e módulos de comunicação em rede.

Sistema de Supervisão: É onde se desenvolvem todas as telas que servirão de interface entre o operador e o sistema. São nestas telas que o operador conseguirá visualizar o estado de todos os equipamentos as medições de variáveis e de onde

será possível comandar os dispositivos. Outra importante função do sistema de supervisão é o armazenamento de dados históricos.

Para sistemas com diversas subestações podemos ter também um centro de operação remoto às subestações que irá concentrar todas as informações do sistema.

2.3 Sistema de Proteção de SEP

Segundo Costa (2004), em um SEP é necessário um sistema de proteção seletivo e eficaz para assegurar a confiabilidade e a continuidade no suprimento de energia. No SEP o mecanismo básico de proteção, denominado de relé, é utilizado para isolar as áreas envolvidas com defeito. Com o desenvolvimento da tecnologia digital, deu-se início ao desenvolvimento dos relés digitais. Tal dispositivo é um relé gerenciado por um microprocessador específico, controlado por um *software*, onde os dados de entrada são digitais.

Os primeiros sistemas de proteção eram baseados em unidades locais que processavam as medidas e atuavam nos dispositivos efetuando a proteção. Em algumas situações era possível efetuar tele-proteção permitindo intertravamento entre elementos distantes.

Atualmente as empresas de energia como as concessionárias estão descobrindo os benefícios que os sistemas digitais podem trazer na proteção, controle e coordenação de sistemas elétricos em função de possuírem ações rápidas e precisas.

Capítulo 3

3.0 A norma IEC 61850

A norma IEC 61850 visa padronizar a comunicação entre sistemas e dispositivos em subestações elétricas. Pode-se citar como objetivo principal garantir a interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes, permitindo a troca de dados entre os mesmos possibilitando entre outras vantagens a realização de proteção através da rede inclusive para subestações distantes umas das outras e a flexibilidade de implementação de funções de intertravamento.

3.1 Seções da norma

A norma IEC 61850 traz definições referentes às comunicações dentro de uma subestação. O documento define os vários aspectos das redes de comunicação de subestações em 10 seções principais.

Seção	Descrição
1	Introdução e visão geral
2	Glossário
3	Requisitos gerais
4	Gerenciamento do sistema e projeto
5	Requisitos de comunicação para funções e modelos de dispositivos
6	Linguagem de configuração para IEDs de subestações elétricas (SCL)
7	Estrutura de Comunicação Básica para Equipamentos de Subestação e Alimentadores
7.1	Princípios e modelos
7.2	Serviços de Interface de comunicação abstrata (ASCI)
7.3	Classe de dados comum (CDC)
7.4	Classes de nós lógicos e de dados compatíveis
8	Mapeamento de serviços de comunicação específicos
8.1	Mapeamento para MMS (ISO/IEC 9506 Parte 1 e Parte 2) e para ISO/IEC 8802-3

9.1	Valores amostrais sobre enlace serial unidirecional <i>multidrop</i> ponto a ponto
9.2	Valores amostrais sobre ISO/IEC 8802-3
10	Testes de conformidade

Tabela 1. Seções da norma.

(Fonte: IEC 61850-1, 2003.)

Embora inicialmente o padrão IEC 61850 tenha sido concebido apenas para uso interno a uma subestação, atualmente diversas empresas vêm empregando o padrão na comunicação entre subestações.

Apresenta-se a seguir um pequeno detalhamento sobre as diversas seções da norma.

Segundo Miranda (2009) a seção 1 descreve como premissa a interoperabilidade na troca de informações entre os dispositivos de fabricantes distintos, como, por exemplo, IEDs, sendo que a comunicação deve suportar as funções operativas e garantir entre outras, as seguintes características:

- A comunicação baseada no perfil de padrões já existentes.
- A utilização de protocolos abertos com suporte a auto-descrição dos dispositivos, o que deve permitir a adição de novas funcionalidades.
- A utilização de uma estrutura de dados que represente informações específicas, por exemplo, estados e medições, relativas as necessidades da indústria de energia elétrica.
- A sintaxe e semântica das informações devem basear-se no uso de objetos de dados comuns relativos ao sistema de potência.
- Suportar futuros desenvolvimentos tecnológicos.

A seção 02 contém o glossário com as terminologias e definições utilizados nas várias partes da norma.

Conforme Mackiewicz (2006), as seções 3, 4 e 5 especificam os requisitos funcionais gerais e específicos para comunicação em uma subestação. Estes requisitos são

usados para auxiliar na identificação dos serviços e modelos de dados, protocolos de aplicação requeridos e protocolos inferiores como transporte, enlace, rede e camada física que irão atender as necessidades globais.

Segundo Miranda (2009) analisando cada uma das seções pode-se resumir o contexto de cada uma delas da seguinte maneira:

A parte 3 define requisitos gerais de comunicação em rede, com ênfase para as exigências de qualidade e recomendações específicas sobre a relevância de outras normas e especificações. Pode-se destacar:

- No requisito de confiabilidade o padrão exige que a falha de um componente de comunicação não afete a operabilidade do sistema e que o monitoramento e controle local sejam mantidos.
- A falha de um componente não deve desativar funções críticas do sistema, de tal modo que as funções de proteção devem atuar de maneira autônoma.
- O padrão estabelece que a IHM (Interface Homem Máquina) local deve operar independentemente da sala de controle central.
- Deve-se observar as influências climáticas, mecânicas e elétricas que são aplicadas as mídias e interfaces de comunicação utilizadas para monitoramento e controle de processo dentro da subestação.
- Com relação a EMI (Interferência Eletromagnética) a norma define que os equipamentos devem suportar os níveis presentes na subestação.
- A integridade dos dados transmitidos deve ser garantida. Detecção de erros de transmissão e recuperação frente ao congestionamento devem ser considerados.
- A rede de comunicação dentro da subestação deve ser capaz de cobrir distâncias de até 2 km e deve ser capaz de servir toda a configuração típica de *bay*¹ no chaveamento de alta tensão.
- O desempenho dos dispositivos de comunicação não deve ser afetado por interrupções no fornecimento de alimentação por até 10 ms.

1 - Um *bay* pode ser composto por equipamentos para manobra, medição, controle e proteção associados a uma determinada parte do SEP. Sua natureza pode ser diversa, como, por exemplo, *bay* de linha, de transmissão e de acoplamento. Este termo é aplicado com maior frequência ao pátio de equipamentos das subestações.

As especificações pertencentes a parte 4 da norma descrevem as exigências básicas de gerenciamento de projetos e sistemas para automação da subestação com respeito aos tópicos:

- Processo de engenharia e as ferramentas de suporte.
- O ciclo de vida de todo sistema e dos IEDs.
- A garantia da qualidade iniciada com o estágio de desenvolvimento e terminada com o abandono e desmantelamento do SAS e seus IEDs.

A fase de engenharia inclui a definição das configurações de hardware necessárias para a subestação, a definição de IEDs e suas interfaces com outros IEDs e com o ambiente. Consiste também no dimensionamento das funcionalidades e quantidade dos sinais envolvidos, na parametrização e documentação do projeto.

O padrão IEC 61850 descreve que o fabricante deve anunciar a descontinuidade de um produto e prestar suporte após a interrupção do mesmo.

Finalmente, explicita que a qualidade é uma tarefa comum as duas entidades, fabricante e cliente. O fabricante deve estabelecer e manter um sistema de qualidade referente aos seus produtos. Já o cliente é responsável por garantir que o ambiente e as condições de funcionamento satisfazem as condições descritas na documentação técnica do SAS.

A parte 5 especifica os requisitos para comunicação das funções implementadas nos diversos níveis do SAS e para os modelos de dispositivos. A figura 2 indica as comunicações entre os diferentes níveis do SAS.

As funções referem-se a tarefas que devem ser executadas na subestação, por exemplo, controle, monitoração e proteção dos equipamentos da subestação.

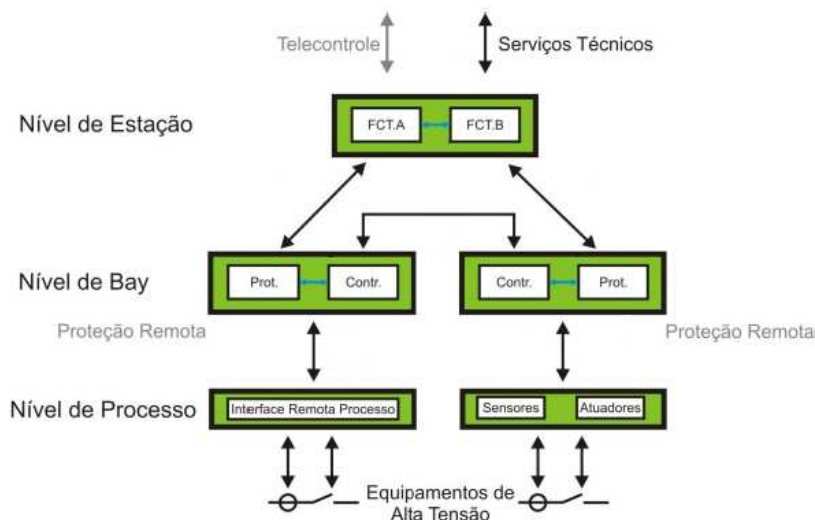


Figura 2. Níveis do SAS conforme IEC 61850.

(Fonte: Miranda, 2009.)

Apesar da similaridade lógica não há uma forma única para que as funções sejam atreladas aos dispositivos físicos. O mapeamento é dependente, por exemplo, da disponibilidade e desempenho requeridos, restrição de custos e estado da arte em tecnologia.

Conforme Mackiewicz (2006), uma quantidade significativa de configuração é necessária para organizar todos os dispositivos e para colocá-los em funcionamento. A fim de facilitar este processo e eliminar grande parte do erro humano é definida na parte 06 da norma uma linguagem de programação conhecida como *Substation Configuration Language* (SCL).

Esta linguagem permite uma descrição formal das relações entre o sistema de automação da subestação e os equipamentos de pátio, ou seja, configuração dos IEDs com seus respectivos parâmetros, além de configuração de funções de subestações, de acordo com a IEC 61850-5 e IEC 61850-7x.

A principal diferença da arquitetura proposta pela IEC 61850 é o conceito de definição abstrata de dados e serviços. Isto é, a criação de dados, objetos de dados e serviços é feita independente de qualquer protocolo. A definição abstrata permite que os objetos de dados e serviços possam ser mapeados por qualquer outro protocolo que atendam aos requisitos de dados e serviços.

A definição dos serviços abstratos é feita na seção 7.2 enquanto a seção 7.4 define os conceitos para os objetos de dados. Os objetos de dados são compostos por partes comuns como: estados, medições e controle. O conceito de *Common Data Classes* (CDC) foi desenvolvido utilizando-se de blocos comuns para compor objetos de dados maiores, de acordo com a parte 7.3 do padrão.

Segundo Miranda (2009), a parte 8.1 do padrão IEC 61850 especifica um método de troca de dados com, ou sem restrições críticas de tempo, através de uma LAN, tendo como objetivo o fornecimento de instruções e especificações detalhadas quanto aos mecanismos e as regras necessárias para implementar os serviços, objetos e algoritmos apontados no padrão IEC 61850, partes 7.2, 7.3 e 7.4, quanto ao uso da norma ISO 9506. Este método é chamado de *Manufacturing Message Specification* (MMS).

Os serviços e o protocolo MMS são especificados para operar sobre camadas do modelo OSI e compatíveis com os perfis de comunicação TCP/IP. A utilização do MMS permite o uso de arquiteturas centralizadas e distribuídas, e inclui a troca de dados seja de estado, operações de controle ou notificações em tempo real.

Existem vários serviços especificados na parte 7.2, que são intencionalmente mapeados para protocolos e perfis de comunicação que fazem uso da norma ISO 9506 (MMS, como protocolo de camada de aplicação), pois tratam informações com restrições críticas de tempo.

As seções 9.1 e 9.2 da norma definem o mapeamento de variáveis de medição amostradas para um quadro de dados *Ethernet*. A seção 9.2 define também o que ficou conhecido como barramento de processo.

Finalmente, a parte 10 da norma define uma metodologia de testes a fim de determinar a conformidade com as inúmeras definições de protocolos e restrições das demais partes da norma.

Um sistema de teste deve permitir um ensaio apropriado, adequado as exigências do sistema de proteção e comunicação, simulando as características da subestação e do sistema elétrico. Para tal, ele deve possuir as seguintes funções:

- Simuladores de sinal analógico que proporcionem correntes e tensões nos IEDs testados.
- Simuladores de sinal digital que representem as mudanças do status do disjuntor e outro simulador de sinais com controle remoto tal como saídas tradicionais dos IEDs.
- Simuladores de comunicação que gerem mensagens GSSE/GOOSE a fim de simular a operação de outros IEDs conectados a rede da subestação local.
- Analisador de mensagens GSSE/GOOSE que monitora e registra o tempo das mensagens recebidas proveniente do IED em teste a fim de avaliar o desempenho/resposta do relé.
- Ferramentas de configuração que permitam ao usuário configurar o dispositivo em teste para os requisitos dos IEDs testados e enviar mensagens GSSE/GOOSE simuladas para múltiplos IEDs incluídos no sistema de proteção, operando com comunicações de alta velocidade ponto-a-ponto distribuídas.
- Software de teste que permita configuração flexível das seqüências de teste solicitadas e simulações utilizando as funções anteriormente descritas.

3.2 Mensagens GOOSE

Segundo Araújo (2011) uma característica das mensagens GOOSE é a repetição em intervalos de tempo definidos, ao invés de utilizar o controle de recebimento, *ack*. A eficiência das mensagens GOOSE deve ser tal qual a de um cabo físico. Para garantir esta característica, é utilizado o conceito de prioridade. Os componentes da rede devem atender à norma IEEE 802.1Q. Essa norma estabelece que dentro do *frame Ethernet* devam estar contidas as informações de prioridade e de VLAN. Com essa informação, o *switch*, por exemplo, ao identificar que é uma mensagem GOOSE, a envia na frente de qualquer outro pacote, como pode ser vista na figura 3.

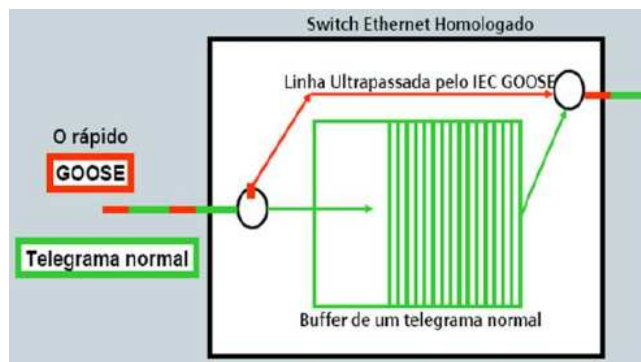


Figura 3. Transmissão de mensagem GOOSE.

(Fonte: Araújo, 2011.)

3.3 Sistema de Automação de Subestações – SAS

Segundo Guerrero (2011) a parte 5 da IEC 61850 (IEC, 2003e) recomenda estruturar o SAS em três diferentes níveis hierárquicos sendo: Nível de processo, nível de *bay* e nível de estação conforme apresentado na figura 4.

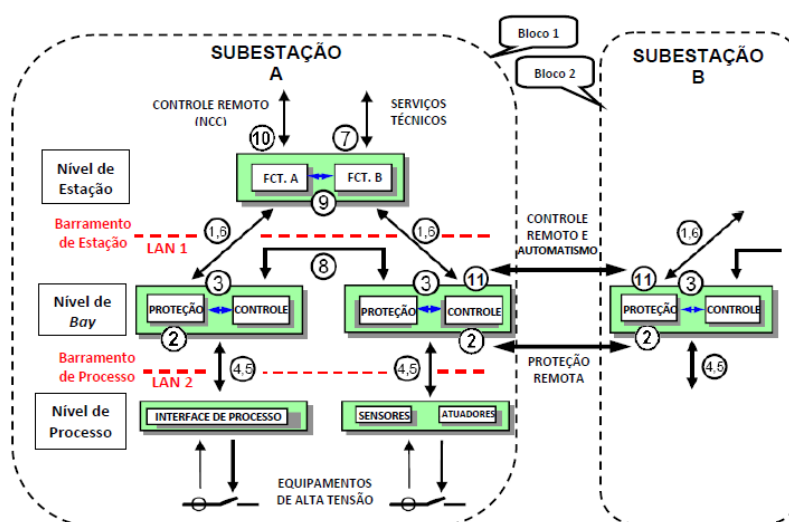


Figura 4. Estruturação SAS conforme IEC 61850.

(Fonte: Guerrero, 2011.)

Podemos verificar na figura 4 a existência de 02 barramentos de comunicação, um de processo e um de estação. Na Tabela 1 é apresentada a descrição das funcionalidades de cada uma das interfaces de troca de dados indicada na figura 4.

Interface	Funcionalidade
1	Troca de dados de proteção entre o nível de estação e o nível de <i>bay</i> .
2	Troca de dados de proteção entre subestações (dados analógicos para proteção diferencial de linhas e dados binários para proteção de distância).
3	Troca de dados entre dispositivos do mesmo bay.
4	Troca de valores amostrados dos transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs) entre o nível de processo e o nível de <i>bay</i> .
5	Troca de dados de controle entre o nível de processo e o nível de <i>bay</i> .
6	Troca de dados de controle entre o nível de <i>bay</i> e o nível de estação.
7	Troca de dados entre o nível de estação e um ponto de monitoração remota dentro da mesma LAN
8	Troca de dados entre <i>bays</i> . Destacam-se aplicações de funções de intertravamento.
9	Troca de dados entre dispositivos do nível de estação.
10	Troca de dados de controle entre uma subestação e o centro de controle remoto.
11	Troca de dados entre subestações (dados binários para intertravamentos ou automatismos entre subestações).

Tabela 2. Troca de dados conforme norma.

(Fonte: Guerrero, 2011.)

Podemos verificar na figura 5 a seguir que as funções de um SAS são implementadas em diversos dispositivos físicos (PD). Estas funções são decompostas em sub-funções chamadas de nós lógicos (LN). Estes por sua vez para possibilitar a troca de dados são interligados através de conexões lógicas (LC) que estão alocadas em conexões físicas (PC). Os PDs representam todos os IEDs interligados no SAS, e PCs representam o meio físico de comunicação utilizado na rede LAN.

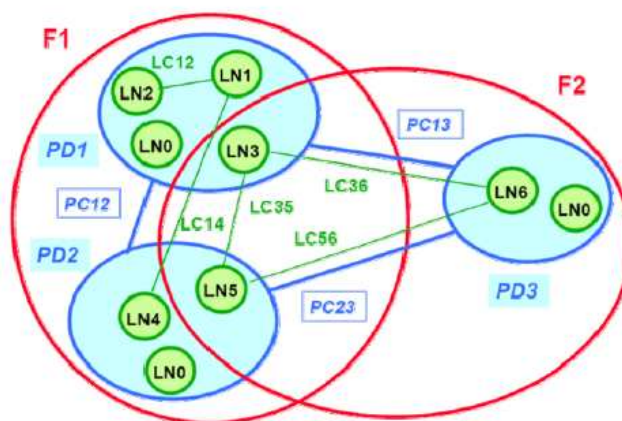


Figura 5. Distribuição de funções no SAS.

(Fonte: MIRANDA, 2009.)

Ainda segundo Guerrero (2011), cada IED, ou PD, possui um grupo de nós lógicos que além de interagir internamente, podem interagir externamente com nós lógicos de outros dispositivos.

Segundo Miranda (2009), o padrão IEC 61850 utiliza o conjunto de conhecimentos de orientação a objeto para enunciar as características essenciais e específicas de uma modelagem de dados orientada a informação e não ao dispositivo.

Harmoniza assim, atributos a funções dos equipamentos físicos de um sistema elétrico, de forma a garantir a consistência e o intercâmbio de dados padronizados, independente da marca ou fabricante.

De acordo com o padrão IEC 61850 cada função do SAS foi dividida em um LN, por sua vez o conjunto de LNs forma um dispositivo lógico (DL) que reside no IED. Na figura 6 pode-se conhecer a estrutura completa das funções.

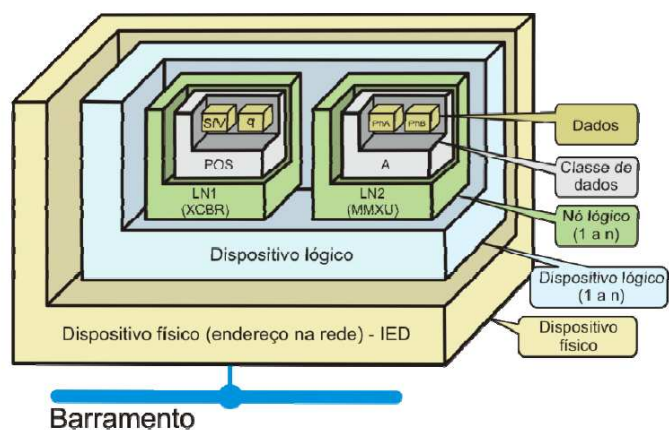


Figura 6. Estrutura de funções conforme IEC 61850.

(Fonte: MIRANDA, 2009.)

Os nós lógicos são agrupados por função e cada um possui um indicador conforme tabela abaixo.

Grupo	Descrição
A	Controle Automático
C	Controle Supervisionado
G	Função Genérica
I	Interfaces e Arquivamento
L	Sistema de Nó Lógico
M	Contador e Medição
P	Função de Proteção
R	Função Relacionada a Proteção
S	Sensores, Monitoração
T	Transformador de Instrumento
X	Disjuntor e Chave Seccionadora
Y	Transformador de Potência e Funções Relacionadas
Z	Equipamentos Adicionais do SEP

Tabela 3. Grupos de Nós Lógicos.

(Fonte: Miranda, 2009.)

Abaixo podemos verificar uma tabela com a referência dos principais nós lógicos para proteção.

Função de Proteção	Referência IEEE C37.2	Nó Lógico segundo IEC 61850 (parte 7-4)
Distância	21	PDIS
Volts/Hz	24	PVPH
Subtensão	27	PTUV
Sobretensão	59	PTOV
Direcional de Potência	32	PDPR
Perda de Excitação	40	PUEX
Sobrecarga	49	PTTR
Sobrecorrente Instantâneo	50	PIOC
Sobrecorrente Temporizado	51	PTOC
Direcional de Sobrecorrente	67	PTOC
Frequência	81	PTOF (sobrefrequência) PTUF (subfrequência)
Teleproteção (carrier ou fio piloto)	85	PSCH
Diferencial	87	PDIF

Tabela 4. Nós Lógicos de Proteção.

(Fonte: Guerrero, 2011.)

Segundo Guerrero (2011), um IED que segue o padrão IEC 61850 possui uma estrutura genérica de nós lógicos, que define as informações específicas e necessárias para o SAS. Esta estrutura é apresentada na figura 7.

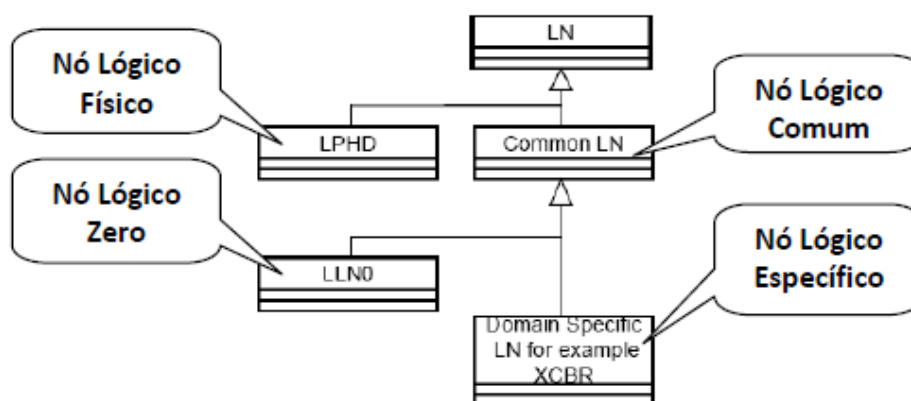


Figura 7. Estrutura genérica Nó Lógico IED.

(Fonte: Guerrero, 2011.)

Ainda segundo Guerrero (2011) os índices apresentados na figura 7 são referidos como:

LPHD: nó lógico independente do domínio de aplicação que gerencia as informações relacionadas ao IED.

LLNO: nó lógico que gerencia as informações relacionadas aos dispositivos lógicos.

Common LN: define uma estrutura comum onde os dados mandatórios (M), são herdados pelo nó lógico zero (LLNO) e por todos os nós lógicos habilitados dentro do dispositivo lógico de um IED.

Todos os nós lógicos definidos dentro da parte 7-4 da IEC 61850 (IEC, 2003a) são considerados especializações do nó lógico comum.

3.4 Classe Comum de Dados (CDC)

Segundo Miranda (2009), o elemento de dados característico de um nó lógico é definido de acordo com a especificação de uma classe comum de dados (CDC) descrita na parte 07 da norma IEC 61850.

Cada CDC tem um nome definido e determina o tipo de estrutura dos dados dentro de um nó lógico, como por exemplo, informação de estado, medição, parametrização ou controle e seus atributos. A tabela 5 indica os CDCs relacionados na norma.

Tipo de Atributo	Descrição	Tipo de Informação
ACT	Proteção Ativa	Estado
ACD	Proteção Direcional Ativa	Estado
SEC	Contador de Violações	Estado
SPS	Ponto Simples	Estado
DPS	Ponto Duplo	Estado
INS	Inteiro	Estado
BCR	Contador Binário	Estado
MV	Valor Real	Medição
CMV	Valor Complexo	Medição
SAV	Valor Análogo	Medição
WYE	Valor Fase Terra do Sistema Trifásico em Estrela	Medição
DEL	Valor Fase Terra do Sistema Trifásico em Triângulo	Medição
SEQ	Seqüência de Fase	Medição
HMV	Valor de Harmônica	Medição
HWYE	Valor de Harmônica para ligação em estrela	Medição
HDEL	Valor de Harmônica para ligação em triangulo	Medição
SPC	Posição Única Controlável	Controle
DPC	Posição Dupla Controlável	Controle
INC	Posição Inteira Controlável	Controle
BSC	Informação Binária de controle de posição de passos	Controle
ISC	Informação Analógica de controle de posição de passos	Controle
APC	Informação do Valor de Referencia	Controle
SPG	Parâmetros de um ponto de medição	Parametrização

Tipo de Atributo	Descrição	Tipo de Informação
ING	Parâmetros de valores inteiros	Parametrização
ASG	Parametrização analógica	Parametrização
CURVE	Parametrização de curva	Parametrização
DPL	Identificador do Dispositivo	Supervisão
LSL	Identificador do Nó Lógico	Supervisão
CSD	Descrição do formato da curva	Supervisão

Tabela 5. CDC relacionados norma IEC 61850.

(Fonte: Miranda, 2009.)

A organização hierárquica dos dados através da concatenação dos nomes das instâncias, nós lógicos, dados e atributos de dados, permite criar o modelo de informação hierárquica (*ObjectReference*) ou árvore hierárquica. Abaixo podemos verificar o exemplo de uma árvore hierárquica implementada em um IED.

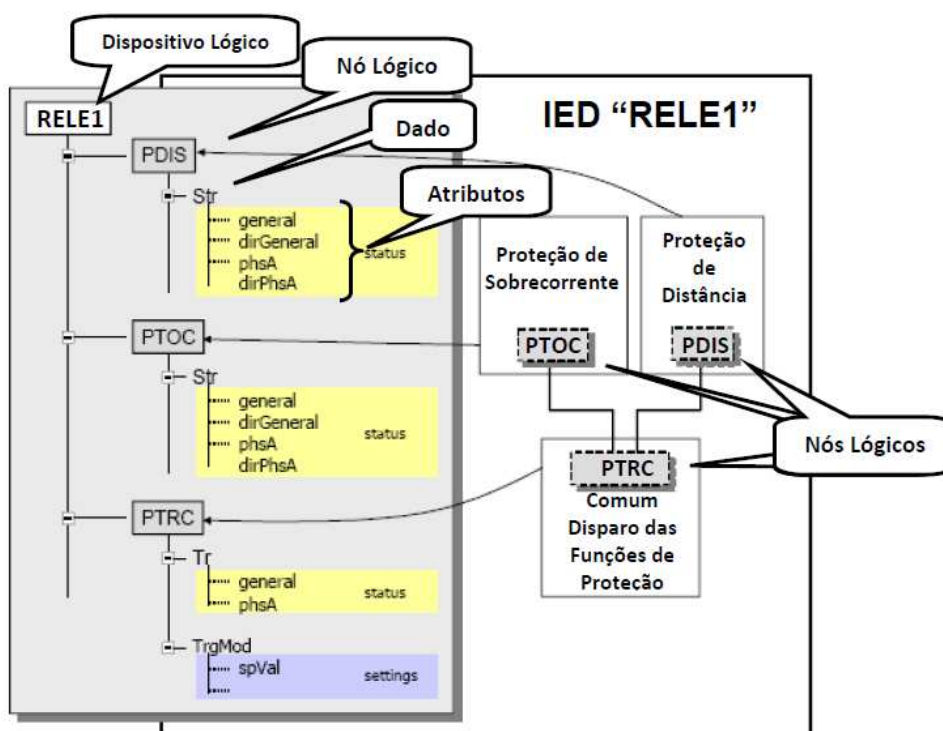


Figura 8. Arvore Hierárquica de um IED.

(Fonte: Guerrero, 2011.)

3.5 Mapeamento de serviços abstratos para protocolos

A norma especifica modelos de comunicação abstratos que facilitam a definição de serviços que os protocolos disponibilizam. São os chamados modelos ASCI, Modelos de Interface dos Serviços de Comunicação. Os mesmos são definidos utilizando-se técnicas de modelagem por objeto. Segundo Guerrero (2011) são definidos dois tipos de interfaces, que são cliente-servidor e *peer-to-peer*. Estes modelos são representados conforme figura 9.

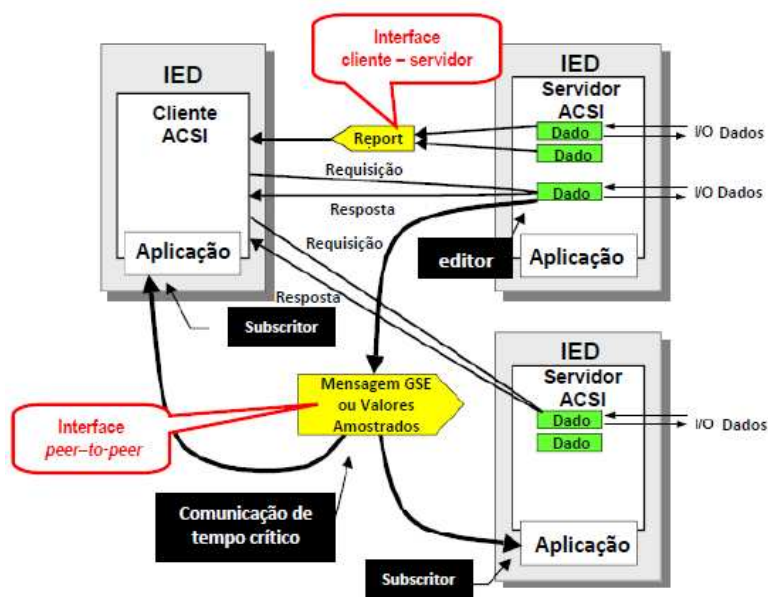


Figura 9. Mapeamento de serviços.

(Fonte: Guerrero, 2011.)

Os serviços definidos são descritos na tabela 6.

Grupos	Descrição	Serviços
Servidor	Representa o comportamento visível externo de um dispositivo.	<i>GetServerDirectory</i>
Associação de Aplicação	Define como dois ou mais dispositivos podem ser conectados (<i>two-party e multicast</i>) e também o controle nas formas de acesso a um determinado dispositivo.	<i>Associate</i> <i>Abort</i> <i>Release</i>

Grupos	Descrição	Serviços
Dispositivo Lógico	Representa um grupo de funções agrupadas como um dispositivo lógico.	<i>GetLogicalDeviceDirectory</i>
Nó Lógico	Representa uma função específica do sistema de subestação, por exemplo, proteção de sobretensão.	<i>GetLogicalNodeDirectory</i> <i>GetAllDataValues</i>
Dados	Define um meio para especificar informações a serem alteradas, por exemplo, posição de uma chave com informação de qualidade, e <i>timestamp</i> .	<i>GetDataValues</i> <i>SetDataValues</i> <i>GetDataDefinition</i> <i>GetDataDirectory</i>
Set de Dados	Permite agrupar vários dados juntos.	<i>GetDataSetValue</i> <i>SetDataSetValue</i> <i>CreateDataSet</i> <i>DeleteDataSet</i> <i>GetDataSetDirectory</i>
Substituição	O cliente pode requisitar ao servidor para repor um valor do processo por um valor selecionado pelo cliente, por exemplo, no caso de um valor de medição inválido.	<i>SetDataValues</i> <i>GetDataValues</i>
Configuração do Grupo de Controle	Define como mudar de um grupo de valores de configuração para outro e como editar tais grupos.	<i>SelectActiveSG</i> <i>SelectEditSG</i> <i>SetSGValues</i> <i>ConfirmEditSGValues</i> <i>GetSGValues</i> <i>GetSGCBValues</i>

Grupos	Descrição	Serviços
Notificação ou Log	<p>Descreve as condições para se gerar notificações automáticas, sejam periódicas ou disparadas por eventos (mudança de variáveis do processo, por exemplo) e o registro de eventos.</p> <p>As notificações podem ser enviadas imediatamente (<i>Unbuffered</i>) ou não (<i>Buffered</i>).</p>	<p><i>Buffered RCB:</i></p> <p><i>Report</i></p> <p><i>GetBRCBValues</i></p> <p><i>SetBRCBValues</i></p> <p><i>Unbuffered RCB:</i></p> <p><i>Report</i></p> <p><i>GetURCBValues</i></p> <p><i>SetURCBValues</i></p> <p><i>Log CB:</i></p> <p><i>GetLCBValues</i></p> <p><i>SetLCBValues</i></p> <p><i>QueryLogByTime</i></p> <p><i>QueryLogAfter</i></p> <p><i>GetLogStatusValues</i></p>
Eventos Genéricos da Subestação (GSE)	<p>Provê uma rápida e confiável distribuição de dados; troca de <i>status</i> binários dos IEDs no modelo de comunicação <i>peer-to-peer</i>.</p> <p>Eventos genéricos da subestação orientados a objeto (GOOSE): suporta a troca de uma vasta gama de dados comuns organizados por um <i>Data Set</i>.</p> <p>Evento genérico de estado da subestação (GSSE): provê a capacidade de transferir as mudanças de estado.</p>	<p><i>GOOSE CB:</i></p> <p><i>SendGOOSEMessage</i></p> <p><i>GetGoReference</i></p> <p><i>GetGOOSEElementNumber</i></p> <p><i>GetGoCBValues</i></p> <p><i>SetGoCBValues</i></p> <p><i>GSSE CB:</i></p> <p><i>SendGSSEMessage</i></p> <p><i>GetGsReference</i></p> <p><i>GetGSSEElementNumber</i></p> <p><i>GetGsCBValues</i></p> <p><i>SetGsCBValues</i></p>

Grupos	Descrição	Serviços
Transmissão de valores amostrados	Rápida e cíclica transferência de amostras, por exemplo, de transformadores de instrumentação.	<i>Multicast SVC:</i> <i>SendMSVMessage</i> <i>GetMSVCBValues</i> <i>SetMSVCBValues</i> <i>Unicast SVC:</i> <i>SendUSVMessage</i> <i>GetUSVBCBValues</i> <i>SetUSVCBValues</i>
Controle	Descreve os serviços para controlar, por exemplo, dispositivos ou grupos de parâmetros de configuração.	<i>Select</i> <i>SelectWithValue</i> <i>Cancel</i> <i>Operate</i> <i>CommandTermination</i> <i>TimeActivatedOperate</i>
Tempo e sincronização de tempo	Provê a base de tempo para o dispositivo e o sistema.	<i>Time Synchronization</i>
Transferência de arquivo	Define a troca de blocos de dados como arquivos.	<i>GetFile</i> <i>SetFile</i> <i>DeleteFile</i> <i>GetFileAttributeValues</i>

Tabela 6. Mapeamento de serviços.

(Fonte: IEC 61850-1, 2003.)

Pode-se a partir da definição de serviços iniciar o mapeamento de serviços de comunicação em sua forma real.

3.6 Linguagem de Programação

A configuração dos dispositivos na rede IEC 61850 é feita através da estrutura padronizada de programação definida na linguagem SCL que é regida pela seção 6 da

norma. Pode-se dizer que a SCL cria um vocabulário único para troca de dados entre todos os dispositivos.

A SCL é composta por arquivos que contém informações sobre os IEDs, rede, configurações e funcionalidades. Segundo Paulino (2007) estes arquivos são divididos em 04 grupos sendo:

SSD: Possui a descrição dos dados de todo sistema, contém o diagrama unifilar com as funções alocadas, e é o ponto de partida para gerar o SCD.

SCD: É o arquivo com a descrição da configuração da subestação gerado pela ferramenta de configuração do sistema, contém os ICDs da subestação e descreve a configuração completa da subestação incluindo a rede de comunicação e informações sobre o fluxo de dados de comunicação.

ICD: É a descrição da capacidade do IED, descreve as capacidades e pré-configurações dos IEDs gerados pela ferramenta de configuração de descrição dos IEDs. Neles estão descritas todas as funções que poderão ser utilizadas no sistema.

CID: Neste arquivo estão descritas as funções parametrizadas ou habilitadas pelo usuário no IED.

Abaixo é possível verificar o fluxo de geração destes arquivos.

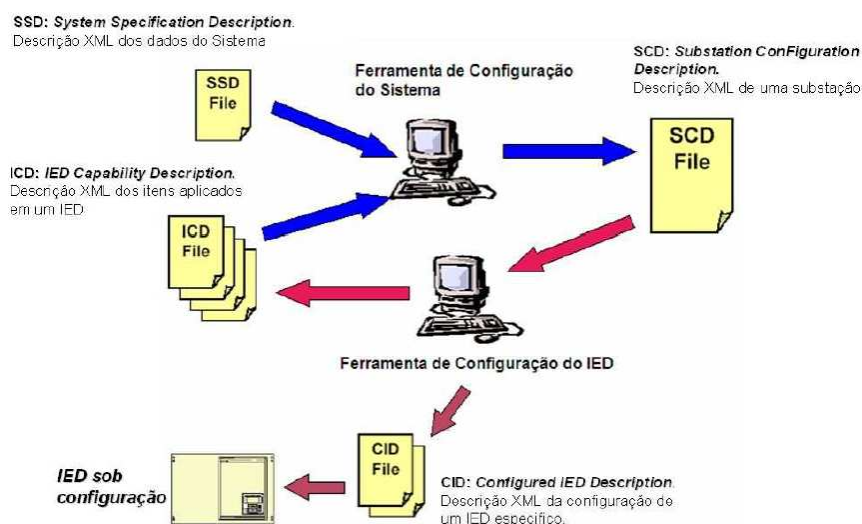


Figura 10. Geração de arquivos.

(Fonte: Paulino, 2007.)

3.7 Requisitos de Comunicação

A IEC 61850 define 07 tipos de mensagens de acordo com a prioridade de seus dados com isso mensagens de maior importância como comando de abertura e *trips* têm maior banda disponível para trafegar na rede. Outros tipos de mensagens como transferências de arquivos trafegam com velocidades menores.

Segundo Moreira (2009), as mensagens são definidas em 07 classes:

- Tipo 1 – Mensagens rápidas;
- Tipo 1A – *Trip*;
- Tipo 2 – Velocidade média;
- Tipo 3 – Baixa velocidade;
- Tipo 4 – Dados em rajada (*raw data*) ou SV – *sampled values*;
- Tipo 5 – Transferência de arquivos;
- Tipo 6 – Sincronização de tempo.

As mensagens também podem ser divididas em outras duas classes: cliente-servidor e GOOSE/SV. A composição destas mensagens na pilha de protocolos pode ser analisada na figura 11.

As mensagens GOOSE estão interligadas diretamente ao nível de enlace permitindo troca de dados em tempo real de rotinas de intertravamentos e *trip*.

As mensagens SVs também estão interligadas diretamente ao nível de enlace, pois têm como função transmitir os dados de medição de corrente e tensão dos TCs e TPs. Estas mensagens precisam ser reconstituídos de maneira rápida e correta para que se obtenham as formas de onda originais.

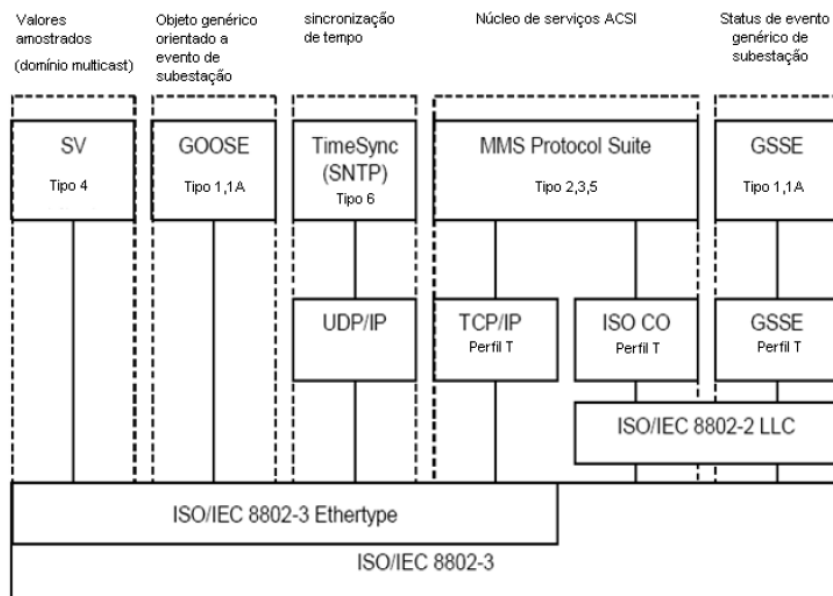


Figura 11. Estrutura de protocolos conforme IEC 61850.

(Fonte: Moreira, 2009.)

As mensagens do tipo cliente-servidor são: Sincronização de tempo do tipo 6, Serviços ACSI dos tipos 2, 3 e 5 e Eventos genéricos do status da subestação, GSSE (*Generic Substation Status Event*) do tipo 1 e 1A.

Segundo Moreira (2009), as mensagens do tipo 6 servem para garantir a sincronização entre IEDs. O protocolo padronizado pela norma para sincronização é o *Simple Network Time Protocol, SNTP*, mas existe uma polêmica com relação a adoção desse protocolo, pois alguns fabricantes, como por exemplo, a *Schweitzer Engineering Laboratories, SEL*, diz que o SNTP não é adequado para as aplicações com precisões de até 1 μ s previstas na IEC 61850. A SEL adota como alternativa o IRIG-B, *Inter-range instrumentation group*. Oficialmente o SNTP é o padrão adotado pela IEC 61850, mas em breve será lançado um novo padrão para sincronização, o IEEE 1588, que deve resolver a polêmica.

Como já foi dito, as mensagens do tipo cliente-servidor são enviadas através de todas as camadas de rede definidas na IEC 61850. Como existe um tempo de processamento associado a cada uma dessas camadas, as mensagens desse tipo têm um tempo de transmissão maior que as mensagens GOOSE e SV.

As mensagens GOOSE são da classe de mensagens *Generic Substation Event*, GSE, assim como as mensagens GSSE, ambas são do tipo (1 e 1A). Porém enquanto as mensagens GSSE suportam apenas estruturas fixas de dados, as mensagens GOOSE transportam estruturas configuráveis.

Tanto as mensagens GOOSE quanto as GSSE usam serviços *multicast* para enviar o mesmo evento ocorrido na subestação para múltiplos IEDs. As mensagens podem ser utilizadas para diferentes aplicações com diferentes requisitos de performance. O desempenho para cada tipo de aplicação é definido pela norma de acordo com a figura 12.

Type	Applications	Performance Class	Requirements (Transmission Time)
1A	Fast Messages (Trip)	P1	10 ms
		P2/P3	3 ms
1B	Fast Messages (Other)	P1	100 ms
		P2/P3	20 ms
2	Medium Speed		100 ms
3	Low Speed		500 ms
4	Raw Data	P1	10 ms
		P2/P3	3 ms
5	File Transfer		≥1000 ms
6	Time Synchronization		(Accuracy)

Figura 12. Tipos de mensagens definidas na norma IEC 61850.

(Fonte: HOU e DOLEZILEK, 2008.)

O requisito de tempo para as mensagens do tipo 6 é ditado pela precisão requerida na sincronização de tempo. A norma exige que a precisão das mensagens de sincronização de tempo seja dez vezes mais rápida do que a precisão da estampa de tempo. As mensagens de sincronização dos relógios devem ter precisão de 0.1 ms para atender a especificação de estampa de tempo de 1ms.

Os tempos de transmissão indicados na figura 12 são o máximo permitido para a troca de um conjunto de dados no sistema de comunicação. Este cálculo considera o tempo de processamento das lógicas no dispositivo de origem e de destino.

O tempo de transmissão é claramente ilustrado na figura 13. O termo t_a é o tempo gasto internamente no processamento do algoritmo de comunicação do dispositivo PD1. Este algoritmo recebe os dados de entrada do dispositivo e o processa para efetuar a transmissão. O termo t_b representa o tempo gasto pela mensagem para percorrer a rede fisicamente e chegar até o dispositivo PD2. Já o termo t_c é o tempo gasto para que o controlador de comunicação do dispositivo PD2 receba e processe a mensagem enviada por PD1. Podemos definir o tempo de transmissão como o somatório dos tempos anteriores definidos, sendo: $t = t_a + t_b + t_c$.

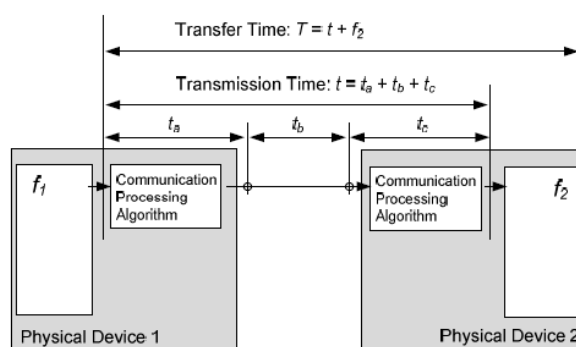


Figura 13. Composição do tempo de transmissão entre dois dispositivos.

(Fonte: HOU e DOLEZILEK, 2008.)

O tempo total para que uma mensagem gerada por PD1 seja transmitida via rede e atue em PD2 é chamado de tempo de transferência sendo calculada por: $T = t + t f_2$. Este é o tempo que realmente importa para o sistema de controle, pois representa o tempo realmente gasto para comunicação de dados entre esquemas de proteção e sistema de controle. Ele pode ser facilmente medido pela diferença do tempo de estampa registrados através de seqüenciador de eventos nos IEDs com relógios sincronizados.

As mensagens do tipo GOOSE, como dito anteriormente, são mapeadas diretamente na camada *Ethernet* devido a necessidade de alta velocidade. Este fato combinado à estrutura de transmissão de dados do protocolo *Ethernet* não há garantia se um IED irá receber a mensagem enviada, não existe também uma mensagem de reconhecimento da mensagem pelo IED (*ack*). Devido a este fato a norma estabelece uma política de retransmissão de dados que permita atingir um alto nível de confiabilidade na entrega das mensagens. A figura 14 demonstra este esquema de retransmissão de mensagens GOOSE.

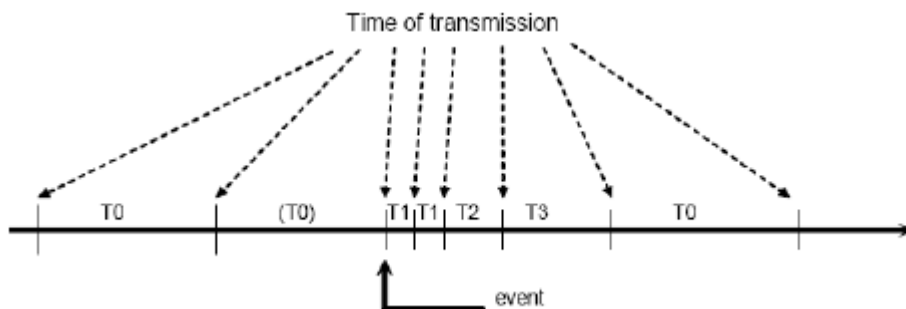


Figura 14. Esquema de retransmissão conforme norma IEC 61850.

(Fonte: HOU e DOLEZILEK, 2008.)

Após iniciada as transmissões, as mensagens GOOSE são publicadas constantemente contendo um conjunto de dados chamados *Data Set*. Durante a configuração as mensagens são ajustadas para um tempo máximo (*mt*) de espera entre publicações de mensagens de acordo com o nome do *Data Set* a ser incluso na mensagem. *Data Set* é um conjunto de dados binários e analógicos transmitidos em cada mensagem.

As mensagens são publicadas cada vez que o tempo do *Data Set* ou o *mt* expira. Após a alteração do elemento de *Data Set*, o tempo entre transmissões (*tot*) é muito curto, 4 ms, ou seja, as mensagens são enviadas muito rapidamente para que todos os destinatários possam recebê-las. Após iniciar com publicações rápidas, *tot* cresce até atingir *mt*.

Para cada mensagem que a estação publica calcula-se o *Time to Live (ttl)* baseado no próximo *tot*. Porém, ao invés de fazer o *ttl* igual ao *tot* é calculado um *ttl* múltiplo de *tot* para prevenir de falsos alarmes causados por freqüentes e pequenos atrasos causados nas redes *Ethernet*. O valor de *ttl* é $2 \times tot$ quando *tot* vale T_0 e $3 \times tot$ quando *tot* tem qualquer outro valor.

Para poucas mensagens após a alteração de estado de um elemento de proteção de um *Data Set* a mensagem é enviada a cada 4 ms e posteriormente menos rapidamente. Cada mensagem inclui o *ttl* que prevê o tempo de atraso que a próxima mensagem pode ser publicada.

Quando ocorre um novo evento de *Data Set*, uma nova mensagem é criada e publicada. A nova mensagem é publicada e repetida em um intervalo mais curto T_1 conforme indicado na figura 14. O tempo de retransmissão cresce gradualmente para T_2 e T_3 até atingir um tempo de retransmissão estável $tot = T_0 = mt$. Este tempo é reduzido quando ocorre um novo evento.

Os clientes calculam constantemente o tempo de espera (*ttw*) baseado no *tfl* de cada mensagem. Os dados são considerados obsoletos quando o *ttw* expirar e não for publicada uma nova mensagem. Se o cliente detectar que o *ttw* expirou ele assume que a comunicação foi perdida.

O esquema de retransmissão de mensagens é necessário para garantir a performance de transmissão e para permitir que um dispositivo saiba qual canal de comunicação está operante. Entretanto dependendo do tempo de estabilidade final de retransmissão o esquema pode não ser suficiente para garantir confiabilidade de tarefa de missão crítica. Além disto, sem o uso de mensagens GOOSE personalizadas o transmissor nunca saberá se os demais IEDs receberam as suas mensagens.

3.8 Procedimento de Testes

Os SASs baseados na norma IEC 61850 devem passar por testes de interoperabilidade e conformidade com o objetivo de demonstrar que o mesmo possui conformidade com a norma.

Segundo Paulino (2007), os testes devem ser realizados em duas etapas principais. Numa primeira etapa são verificadas as funções não distribuídas fornecidas com o IED, é um teste individual onde é verificado se funções tais como proteção, oscilografia, registro seqüencial de eventos, medição, sinalização, alarmes etc. estão operando corretamente.

Na segunda fase, são realizados os testes de sistema, são envolvidos dois ou mais IEDs. Verifica-se a conformidade com a norma IEC 61850 e a interoperabilidade entre os dispositivos para cada uma das funções distribuídas. São simuladas as mensagens trocadas pelos IEDs, incluindo as informações de configuração e operacionais do SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) transferidas no modo cliente-servidor, bem como as mensagens de alta velocidade GOOSE ou GSSE.

Devem se considerar cenários de teste que sejam realistas e verifiquem as situações que possam ocorrer efetivamente incluindo as mais desfavoráveis. Sempre que possível, devem ser usadas arquiteturas de teste idênticas ou o mais próximo possível da arquitetura final do SAS, testando-se, além da conformidade com a norma, as funcionalidades especificadas e considerando-se os fabricantes e modelos de IEDs que serão fornecidos. Quando forem utilizados IEDs de diferentes fabricantes os testes devem considerar esta condição.

As seguintes etapas de teste devem ser consideradas:

- Teste funcional de cada componente individualmente.
- Teste funcional dos IEDs de um mesmo vão.
- Teste funcional de um conjunto de IEDs de diferentes vãos, incluindo os equipamentos no nível de subestação.

3.8.1 Testes de Conformidade

Ainda segundo Paulino (2007), a norma IEC 61850, em sua Parte 10, estabelece os requisitos para os testes de conformidade a serem realizados em um IED ou em um SAS. O objetivo destes testes é verificar se o dispositivo sob teste (*Device Under Test – DUT*) obedece aos requisitos de comunicação definidos pela norma IEC 61850.

A princípio, os testes de conformidade para cada um dos IEDs que fazem parte do SAS são da responsabilidade do respectivo fabricante. Deve ser sempre solicitado ao mesmo o certificado de homologação como parte da documentação do IED.

O fabricante do IED também deve fornecer os arquivos MICS (*Model Implementation Conformance Statement*), PICS (*Protocol Implementation Conformance Statement*) e PIXIT (*Protocol Implementation extra Information for Testing*), descritos adiante. Estes arquivos são implementados em linguagem SCL e contém informações importantes sobre as possibilidades de comunicação e teste dos IEDs, assim como sobre a arquitetura interna e o SCSM (*Specific Communication Service Mapping* ou serviço de mapeamento de comunicação específico).

São objetivos dos Testes de Conformidade do SAS: reduzir os riscos da falta de interoperabilidade entre os dispositivos a um nível aceitável, fornecer o máximo de confiança ao cliente de que o dispositivo comunicará sem problemas com outros dispositivos certificados e realizar um teste de tipo da interface de comunicação de um SAS.

É altamente recomendável que o Teste de Conformidade em bancada seja feito antes da integração do sistema no campo a fim de descobrir, ainda em tempo, possíveis diferenças de interpretação e possíveis erros de software, bem como a exata funcionalidade da implementação do protocolo permitindo sua correção antes da implementação em campo. Desta forma, o cliente que está adquirindo o SAS evitará comportamentos inesperados na fase operacional e poupará tempo e dinheiro nas fases de implementação e manutenção do sistema.

O Teste de Conformidade deve incluir o seguinte:

- Documentação e controle de versão, conforme IEC 61850 Parte 4, contendo:

Arquivo PICS – (*Protocol Implementation Conformance Statement*), que corresponde ao resumo das possibilidades de comunicação do IED ou SAS a ser testado.

Arquivo MICS – (*Model Implementation Conformance Statement*), que detalha o padrão dos elementos do objeto de dados suportado pelo IED ou SAS a ser testado.

Arquivo PIXIT – (*Protocol Implementation eXtra Information for Testing*), que contém informações específicas relativas ao IED ou SAS a ser testado e que estão fora do escopo da norma.

- Configuração (SCL), conforme IEC 61850 parte 6.
 - Modelo de objeto de dados, conforme IEC 61850 partes 7-3 e 7-4.
 - Serviços de comunicação, conforme IEC 61850 partes 7-2, 8-1, 9-1 e 9-2.
-

3.8.2 Testes de Interoperabilidade

Ainda segundo Paulino (2007), para os testes de interoperabilidade devem ser conectados à LAN dois ou mais IEDs, devendo ser geradas e transmitidas mensagens no padrão IEC 61850. Para isto, o equipamento de teste deve ser capaz de simular estas mensagens. Quando possível, uma solução mais realista é utilizar os próprios equipamentos do SAS para gerar as mensagens, desde que se disponha de um analisador compatível com a norma IEC 61850 capaz de analisar as mensagens GOOSE e demais mensagens geradas pelos IEDs.

Considera-se que cada IED tenha sido previamente testado com relação à conformidade com a norma e com os requisitos funcionais e que a operação das funções não distribuídas tenha sido também previamente verificada, sendo observadas as mensagens geradas e recebidas pelo IED relativamente a sinais de status, comandos, alarmes e informações para a interface homem máquina (IHM).

Diante da grande complexidade representada por um SAS com funções distribuídas, sugere-se começar pelas situações mais simples e ir aumentando, pouco a pouco, o grau de complexidade. Iniciar com dois IEDs, testando as funções distribuídas menos complexas e com a rede sem tráfego. Prosseguir com os testes até que todas as funções distribuídas que envolvam os dois IEDs tenham sido testadas. Somente então acrescentar um terceiro IED e, depois outro, até que todo o SAS tenha sido testado.

Um ponto importante a ser observado é que a situação mais crítica para a interoperabilidade ocorre justamente quando IEDs de fabricantes diferentes operam com funções distribuídas.

3.8.3 Testes de Desempenho

Ainda segundo Paulino (2007), os testes de desempenho de um SAS têm como função verificar se o desempenho de cada função se mantém dentro dos limites especificados, mesmo quando a rede de comunicação é submetida a condições críticas de tráfego de mensagens ou ruído presentes no ambiente de instalação. Durante os testes de desempenho são verificados os tempos máximos de operação das funções, assim como os tempos máximos que cada mensagem irá levar desde

sua geração em um IED até que seja recebida pelos IEDs subscritores que irão utilizar a informação. Atenção especial deve ser dado aos testes de mensagens GOOSE.

3.9 Benefícios de utilização da norma IEC 61850

Os recursos e benefícios de aplicação da IEC 61850 são tão numerosos que é difícil listar todos eles. De acordo com Mackiewicz (2006) as características que proporcionam benefícios mais significativos para os usuários são:

- Utilização de nomes para todos os dados: Todos os dados possuem *strings* para identificar os mesmos.
 - O nome de todos os objetos são padronizados e definidos no contexto do sistema de potência: O nome dos objetos não são definidos pelo fornecedor ou usuário. Todos os nomes são definidos pela norma de acordo com um padrão que permita identificar imediatamente o significado do dado.
 - Os dispositivos possuem auto-descrição: Os aplicativos clientes são capazes de baixar a descrição de todos os dados suportados por um dispositivo sem configuração manual de objeto de dados ou nomes.
 - Reduzir o custo de implantação: O uso de dispositivos comunicando em IEC 61850 permite troca de dados rápida entre dispositivos via rede evitando a necessidade de interligação de cabos entre os mesmos. Com isto há uma redução considerável nos custos de implantação com cabos e infra-estrutura.
 - Redução de custos dos transdutores: Pode-se utilizar um único sistema de medição para diversos dispositivos, reduzindo o custo de aquisição e instalação de uma quantidade maior de transdutores.
 - Redução do custo de configuração: O custo para configurar e comissionar dispositivos é reduzido drasticamente, pois os dispositivos IEC 61850 não necessitam de configurações manuais. Os aplicativos clientes podem carregar os pontos diretamente do dispositivo ou importá-los a partir do arquivo SCL. Reduzindo as configurações manuais evita-se o retrabalho.
-

- Redução do custo de migração de equipamentos: Como todos os dispositivos utilizam a mesma convenção de nomes a reconfiguração de aplicações clientes é minimizada quando dispositivos são alterados.
- Redução do custo de integração: Com a utilização de um padrão de rede que é amplamente utilizada em toda a empresa o custo para integração dos dados é substancialmente reduzido.
- Implementação de novas capacidades: As características únicas da IEC 61850 permitem funcionalidades que com os protocolos anteriores não eram possíveis. Esquemas de proteção de grandes áreas se tornam muito mais viáveis.

De acordo com Stanley (2008) resumidamente os benefícios de segurança, custo e operação obtidos com a implantação da norma são descritos na tabela a seguir:

Benefício	Área	Obtido através de:
Manipulação mais fácil da documentação CIP das políticas de segurança.	Custo de segurança	Objetos nomeados.
Compatibilidade com meios de energia alternativa.	Operação	Uso de IEC 61850 como base para energia eólica e outras alternativas.
Rede LAN de interligações simples substituem complexas interligações ponto a ponto.	Custo	Protocolos roteáveis.
Aumento significativo na quantidade de informações.	Operação	Modelos de objeto utilizando objetos nomeados.
Aumento significativo na qualidade da informação disponível facilitando a investigação de eventos.	Operação	Estampa de tempo, velocidade dos dados e qualidade das informações incluídas nos objetos.
Manutenção simplificada do sistema.	Operação	Objetos nomeados.
Melhor integração com sistemas corporativos.	Custo de operação	Suportado pelo uso de tecnologia XML (<i>eXtensible Markup Language</i>).

Benefício	Área	Obtido através de:
Habilitação de defesa profunda usando ferramentas convencionais de segurança.	Custo de segurança	Protocolos roteáveis que fazem uso de ferramentas e tecnologia de segurança.
Configuração e instalação simplificadas.	Custo de operação	Descrição de dispositivos " <i>plug and play</i> ".
Expansão simplificada.	Custo de operação	Padrões com estrutura modular e objetos expansíveis.
Manutenção melhorada.	Operação	Diagnóstico extensivo e atributos de manutenção definidos nos objetos do dispositivo.
Facilidade de implantação de novos requisitos.	Custo de operação	Estrutura de dados, protocolos e estrutura do padrão flexíveis e extensíveis.

Tabela 7. Benefícios da norma IEC 61850.

(Fonte: Stanley, 2008.)

3.10 Confiabilidade para comunicação nas arquiteturas baseadas em IEC 61850

Segundo Anderson e Brand (2005), a redundância é uma maneira de aumentar a confiabilidade do sistema, mas deve ser utilizada com cuidado conforme discutido a seguir.

Conforme já mencionado anteriormente, o SAS é dividido em três camadas principais sendo estes níveis interligados através de redes de comunicação. Neste trabalho estamos considerando que as redes utilizadas estão conforme definições da IEC 61850, que é baseada em Ethernet comutada. Somente assim as funções distribuídas em mais de um IED com requisitos de atualização em tempo real podem ser utilizadas para conectar o nível de estação ao de supervisão e operação.

As redes de comunicação podem utilizar diferentes arquiteturas para interligar os dispositivos, considerando ou não redundância. As figuras a seguir apresentam as arquiteturas que serão estudadas.

- Rede em estrela simples: nesta situação todos os IEDs são conectados a um *switch* central. Figura 15 desconsiderando a parte tracejada.
- Rede em estrela redundante: nesta situação todos os IEDs são conectados a dois *switches* centrais formando duas redes independentes e paralelas. Figura 15 considerando a parte tracejada.
- Rede em anel simples: neste caso os IEDs são conectados através de um único link aos *switches* do sistema que são ligados em anel. Figura 16 desconsiderando a parte tracejada.
- Rede em anel duplo: neste caso os IEDs são conectados através de um único link a cada conjunto de *switches*. São utilizados dois conjuntos de *switches* ligados em anel formando duas redes idênticas e paralelas. Figura 16 considerando a parte tracejada.
- Rede em anel duplo com *switch* compartilhado: esta arquitetura é similar a anterior porém são utilizados *switches* compartilhados para os IEDs reduzindo assim a quantidade de *switches*.
- Rede em anel simples com redundância de link do IED: neste tipo de arquitetura é utilizado um único anel para interligar os *switches* porém os IEDs são conectados cada um a dois *switches*, através de *links* distintos e cruzados.

Para que possamos avaliar a confiabilidade do sistema é necessário conhecer os dados de falha de cada dispositivo que devem ser informados pelo fornecedor do mesmo. Segundo Anderson e Brand (2005), para efeito de estudo podemos considerar para o IED um MTTF de 100 anos, para *switches* de até 8 portas 50 anos e para *switches* com mais de 8 portas 40 anos.

São avaliadas então as seguintes arquiteturas:

- Rede S1: Figura 18
 - Rede S2: Figura 18
 - Rede S3: Figura 15
-

- Rede S4: Figura 16
- Rede S5: Figura 17

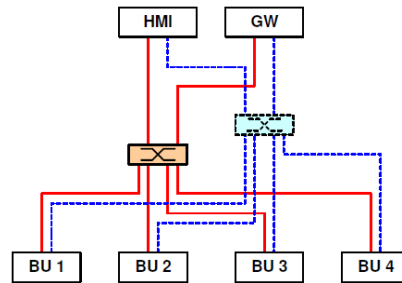


Figura 15. Rede em estrela.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

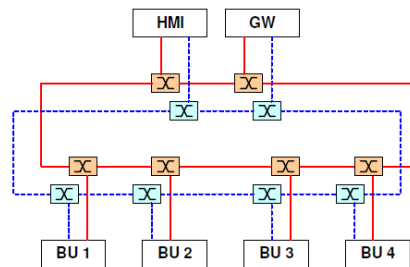


Figura 16. Rede em anel.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

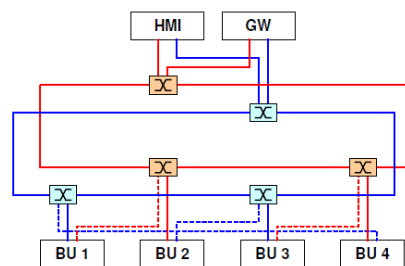


Figura 17. Rede em anel com switch compartilhado.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

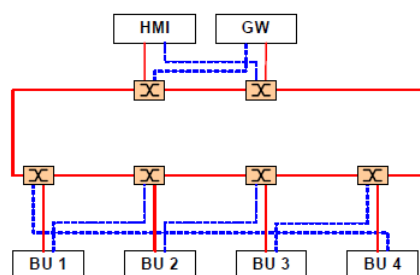


Figura 18. Rede em anel.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

Observa-se que para duas redes em paralelo o tempo de recuperação de uma falha não existe, enquanto que para uma rede em anel existe um tempo de reconfiguração. Algoritmos STP padrões levam em média 100 ms para recuperação do anel. Soluções proprietárias podem executar a recuperação em tempo inferior na ordem de 10 ms. Para efeito de cálculo neste estudo será considerado o tempo gasto pelo STP padrão. Será considerado um SEP com 8 *bays* com um *switch* por *bay* e dois *switches* no nível de estação. Com estes dados são obtidos os seguintes resultados:

Arquitetura	MTTF	MTTF com reparo (anos)	MTBR (anos)	Tempo de reconfiguração (ms)	Custo Relativo (%)
S1	12,9	16,6	4,5	100	100
S2	17,6	49,9	4,5	100	105
S3	27,3	49,9	11,5	0	80
S4	34,5	49,9	2,4	0	200
S5	35,7	49,9	4,5	0	110

Tabela 8. Resultado de Estudo Rede de Controle.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

Os custos apresentados são relativos, considerando principalmente a quantidade de *switches* utilizadas em cada arquitetura. Em um estudo real seria necessário avaliar a quantidade de dispositivos, tipos de cabos, distribuição dos componentes entre outros custos.

Vamos avaliar agora as arquiteturas do nível de processo. Serão consideradas 03 possíveis arquiteturas conforme figuras a seguir.

- Barramento duplo com separação dos barramentos de processo e estação.
- Barramento duplo único para processo e estação. Neste caso devem ser utilizadas VLANs para separação do tráfego de cada barramento.
- Barramento duplo único para processo e estação e unidade de controle integrada a de proteção. Solução semelhante a anterior com o benefício da redução do número de componentes e consequentemente da possibilidade de falha.

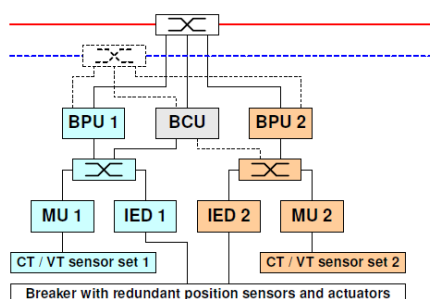


Figura 19. Rede de Barramento Duplo com separação de níveis.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

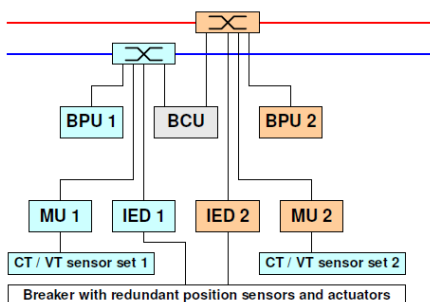


Figura 20. Rede de Barramento único.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

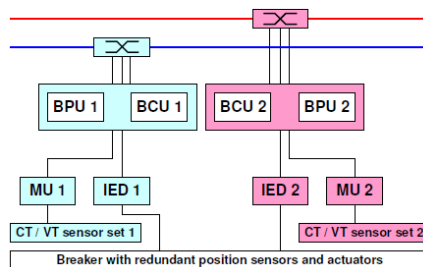


Figura 21. Rede barramento único com unidade de controle integrada.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

Para efetuar os cálculos será considerado um MTTF de 150 anos para concentradores de medição MU e de 200 anos para os disjuntores. Para as unidades de controle e proteção será considerado 150 anos.

Arquitetura	MTTF (anos)	MTTF com reparo (anos)	MTBR (anos)	Custo Relativo (%)
S6	14,6	19550	3,7	130
S7 - Proteção	34,2	60061	8,5	110
S7 - Controle	38,7	74,8	15,8	110
S8	34	60061	8,5	100

Tabela 9. Resultado de Estudo Rede de Processo.

(Fonte: Anderson e Brand, 2005.)

Se for considerado apenas a disponibilidade do *bay* de proteção tem-se o mesmo valor para todas as arquiteturas uma vez que os componentes são os mesmos. Com estes componentes o MTTF obtido é de 26 anos. Por isso é necessário a redundância.

Observa-se uma grande diferença entre o MTTF com e sem reparo. Para isto ser obtido é necessário que se tenha um sistema de supervisão que anuncia imediatamente cada falha de modo que o sistema possa realmente ser reparado.

3.11 Sincronização de tempo em sistemas baseados em IEC 61850

Sincronização de tempo é o processo utilizado para sincronizar a data e hora de todos os dispositivos na rede. É crucial em aplicações sensíveis ao tempo e devido a sua importância sua utilização é uma exigência da IEC 61850. Um sistema típico de sincronismo de tempo pode ser verificado na figura 22.

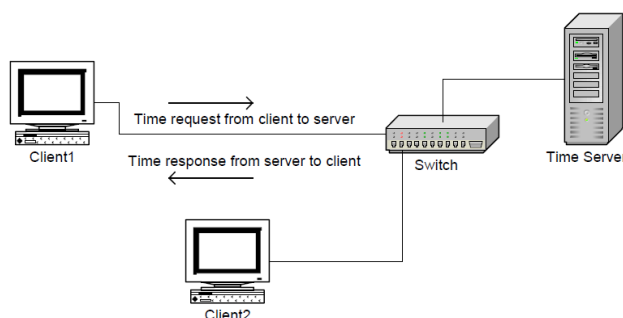


Figura 22. Modelo de sincronização de tempo.

(Fonte: Ozansoy, Zayegh e Kalam, 2008.)

Segundo Ozansoy, Zayegh e Kalam (2008) a precisão da sincronização de tempo depende fortemente do protocolo utilizado e do hardware.

O protocolo NTP é considerado o mais preciso e flexível meio de sincronização de relógios através de redes LANs com a precisão de poucos milésimos de segundos.

O sistema de sincronização de tempo especificado na norma IEC 61850 é apresentado na figura 23.

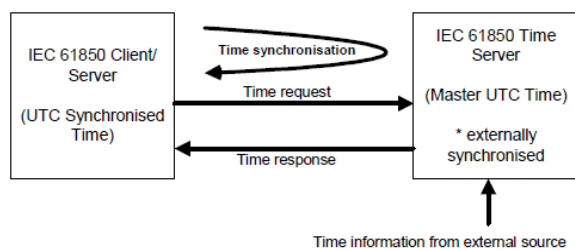


Figura 23. Sincronização de tempo conforme IEC 61850.

(Fonte: Ozansoy, Zayegh e Kalam, 2008.)

Ainda segundo Ozansoy, Zayegh e Kalam (2008) os dispositivos (IEDs) são sincronizados a partir de um servidor de tempo que é sincronizado externamente através de um dispositivo de hora confiável. Normalmente é utilizado um receptor GPS.

A norma não especifica um protocolo de sincronização a ser utilizado. O protocolo normalmente utilizado tem sido o SNTP. Diferentes classes de precisão são definidas de acordo com o tipo de precisão conforme tabela abaixo:

Classe	Precisão	Finalidade
IEC - Classe T1	± 1 ms	Estampa de tempo de eventos.
IEC - Classe T2	± 0.1 ms	Estampa de tempo quando do cruzamento por zero e de dados para o <i>synchrocheck</i> distribuído.
IEC - Classe T3	± 25 μ s	Transformadores de Instrumentação
IEC - Classe T4	± 4 μ s	Transformadores de Instrumentação
IEC - Classe T5	± 1 μ s	Transformadores de Instrumentação

Tabela 10. Classes de precisão para sincronismo de tempo.

(Fonte: Ozansoy, Zayegh e Kalam, 2008 e Guerrero, 2011.)

SNTP é uma versão simplificada de NTP. Neste sistema faltam algumas funcionalidades dos algoritmos de NTP, tais como as técnicas avançadas de filtragem utilizadas para controlar a latência variável. No entanto, ainda é considerado ser adequado para atender as demandas de muitos sistemas dentro de precisões aceitáveis.

Capítulo 4

Critérios para projetos de sistemas de automação utilizando a norma IEC 61850

Este capítulo tem como objetivo definir os principais critérios para elaboração de um projeto de um sistema de controle e automação para sistemas elétricos e suas redes de comunicação de acordo com os requisitos definidos pela norma.

O capítulo é dividido em três seções principais onde são detalhadas as redes de comunicação, os sistemas de automação e o fluxo de engenharia para desenvolvimento de projetos.

4.1 Redes de Comunicação

Um SAS que utilize a tecnologia IEC 61850 como já visto neste trabalho e baseado em redes de comunicação, portanto o projeto das redes de comunicação deve ser desenvolvido com devida atenção e cuidado. Deve-se ter a preocupação em projetar uma rede confiável, determinar e avaliar todos os pontos de falha.

É primordial durante o projeto da rede fazer um levantamento completo do tráfego de dados na rede para permitir o correto dimensionamento dos dispositivos de rede. Já se deve pensar neste momento em possíveis expansões do SAS.

4.1.1 Arquitetura de rede

Segundo TAN (2011), ao projetar uma rede a arquitetura deve atender aos seguintes requisitos:

- Confiabilidade.
 - Exigência de largura de banda.
 - Redundância.
 - Latência.
-

- Convergência de rede.
- Capacidade de expansão.
- Manutenibilidade.

A transmissão dos dados de proteção é de importância crítica. A arquitetura projetada deve garantir que este tipo de dado seja transmitido com segurança em qualquer circunstância.

A arquitetura projetada deve permitir também aplicação extensiva de mensagens GOOSE.

4.1.2 Redundância de Comunicação

Segundo Antonova, Frisk e Tournier (2011), a redundância deve abranger não só os dispositivos de proteção, mas também os sistemas de comunicação dentro da subestação. Para alcançar uma alta confiabilidade e disponibilidade do sistema como um todo a rede de comunicação precisa evitar qualquer interrupção de comunicação quando ocorrer uma falha em qualquer dos componentes.

Switches Ethernet podem ser utilizados para prover uma rede de comunicação redundante e manter a operação da mesma. Protocolos redundantes para *Layer 2* podem executar duas melhorias: Identificar todas as possíveis rotas entre os dispositivos na rede e colocar as rotas alternativas em *stand-by* (bloqueadas) para evitar *loops* na rede. Estas rotas devem ficar em *stand-by* para evitar que dados em duplicidade fiquem circulando pela rede. O padrão *Ethernet TCP/IP* tem protocolos de redundância suportados tanto na camada 2 quanto na 3 do modelo OSI.

Ainda segundo Antonova, Frisk e Tournier (2011) um dos protocolos utilizados para fazer redundância é o *Spanning Tree (STP)*. Ele permite o bloqueio de rotas evitando a circulação de dados. O STP para funcionar necessita que a rede tenha diversas rotas onde ele configura algumas das rotas para *stand-by*. Se um segmento de rede se torna inacessível o STP reconfigura as rotas que estão em *stand-by* para que todos os dispositivos possam trocar dados.

Existem diversos tipos deste protocolo onde podemos destacar:

STP: É o primeiro e mais lento STP. Possui um tempo de recuperação em torno de 30s.

RSTP (*Rapid Spanning Tree Protocol*): É uma evolução do STP. Possui tempos de recuperação de 250ms até 12s dependendo da configuração. Ainda é lento para algumas aplicações industriais. Existem alguns protocolos proprietários que utilizam o RSTP e são otimizados para aplicações industriais. Mas estes por serem proprietários não são definidos como STP padrão.

MSTP (*Multiple Spanning Tree Protocol*): Permite múltiplas instâncias de STP através de VLANs. Isso significa que em uma única rede física pode ser multiplicada através do agrupamento de redes virtuais cada uma com sua instância de STP.

Abaixo podemos verificar duas aplicações do STP.

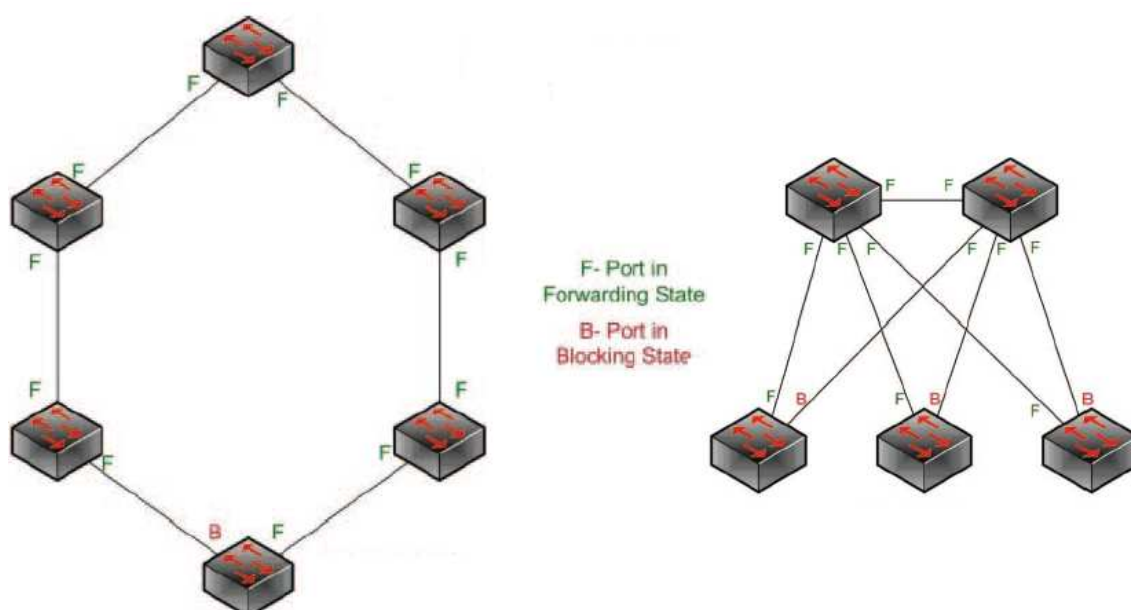


Figura 24. Implementação de protocolo STP.

(Fonte: Antonova, Frisk e Tournier. 2011.)

Podemos citar também alguns protocolos *Ethernet* de alta disponibilidade. Em sistemas de potência onde a rede de comunicação é utilizada para fazer proteção é necessária uma comunicação confiável.

A IEC 62439 define um conjunto de protocolos baseados em *Ethernet* de alta disponibilidade para garantir a entrega dos pacotes mesmo na falha de um elemento da infra-estrutura. Abaixo é apresentado um pequeno resumo destes protocolos.

MRP (*Media Redundancy Protocol*): É baseado na topologia em anel. Foi projetado para reagir deterministicamente a uma única falha em um *switch* ou em um segmento de rede. O protocolo define um gerenciador que envia quadros por uma porta e monitora o recebimento através de outra.

PRP (*Parallel Redundancy Protocol*): Implementa a redundância no nível do dispositivo através da utilização de nós duplos operando de acordo com as regras do PRP. O nó duplo é interligado a duas redes paralelas independente do protocolo. Um nó de origem envia o quadro nas duas redes e o destino o recebe nas duas portas uma conectada a cada rede. O receptor recebe o primeiro quadro e descarta a cópia. As duas redes não são interligadas e uma falha em uma não interfere na outra.

HSR (*High-availability Seamless Redundancy*): Mantém a propriedade de tempo de recuperação igual a zero no caso de falha de um elemento da rede para qualquer topologia, neste caso em particular anel ou anel em anel. Cada dispositivo possui duas portas de comunicação interligadas em meios *full-duplex*. Um nó de origem envia simultaneamente o mesmo quadro nos dois sentidos do anel, o destinatário aceita o primeiro pacote recebido e descarta o segundo.

CRP (*Cross-network Redundancy Protocol*): É baseado na duplicação da rede. O protocolo de redundância é executado nos últimos nós e não nos *switches*. Não existe um gerenciador, cada nó opera de maneira independente.

Quadros de diagnóstico contendo um relatório do estado da rede são utilizados para definir as rotas de comunicação. São utilizados também quadros de anúncio para informar da existência de um nó.

BRP (*Beacon Redundancy Protocol*): A topologia desta rede pode ser definida como dois *switches* de topo interligados a redes em qualquer topologia. Estes *switches* são conectados a nós chamados de “balizas”. Estes nós possuem duas portas físicas porém com um único endereço MAC sendo que uma porta fica ativa e a outra inativa. O *link* das duas portas é continuamente verificado e quando é verificada a falha de

comunicação com algum nó o sistema é reconfigurado para comunicar através da porta que estava inativa.

DRP (*Distributed Redundant Protocol*): Descreve o comportamento operacional dos *switches* em uma topologia em anel para detectar uma falha única na rede e recuperar-se dentro de um tempo determinístico. Neste protocolo todos os *switches* têm o mesmo papel. Cada um monitora a rede e reage a falhas na mesma.

Abaixo temos um quadro resumo onde é possível comparar os diversos protocolos.

Protocolo	Perda de Quadro	Topologia	Tempo de Recuperação
MRP	Sim	Anel	De 10 a 500 ms para 50 <i>switches</i>
PRP	Não	<i>Mesh</i>	0 s
HSR	Não	Anel	0 s
CRP	Sim	<i>Mesh</i>	1 s para até 512 nós
BRP	Sim	<i>Mesh</i>	4.8 ms para até 500 nós
DRP	Sim	Anel, Anel Duplo	100 ms para até 50 <i>switches</i>

Tabela 11. Quadro comparativo de protocolos.

(Fonte: Antonova, Frisk e Tournier. 2011.)

Em um sistema de automação baseado em IEC 61850 existem basicamente quatro diferentes tipos de aplicações para comunicação de dados.

- Cliente-Servidor baseado em TCP/IP, MMS (orientado a conexão)
- Serviços básicos como NTP, SNMP, HTML (tempo não crítico)
- GOOSE diretamente na camada 2 (*multicast*, mecanismo de repetição)
- Valores amostrados diretamente na camada 2 (*multicast*, fluxo de dados)

Os requisitos de desempenho e disponibilidade da comunicação para estes serviços são diferentes. Abaixo são descritos os requisitos normalmente necessários para estas aplicações.

Aplicação	Tempo Máximo Permitido para Entrega	Tempo Máximo Permitido para Recuperação
Cliente-Servidor - MMS	800 ms	400 ms
NTP, SNMP	500 ms	300 ms
GOOSE - Controle	12 a 100 ms	4 a 50 ms
GOOSE - Proteção	8 ms	4 ms
Valores amostrados	2 ms	0

Tabela 12. Requisitos de tempo de serviços.

(Fonte: Antonova, Frisk e Tournier. 2011.)

4.2 Sistemas de Automação

4.2.1 Guia para especificação

Segundo Tibbals e Dolezilek (2007), para garantir a integração dos dispositivos no padrão IEC 61850 alguns detalhes devem ser verificados. Alguns destes detalhes não são mandatórios no padrão porém são necessários para satisfazer a integração da comunicação. Os IEDs do sistema devem, portanto estar em conformidade com a IEC 61850 e satisfazer as seguintes funcionalidades:

- Devem permitir mensagens ponto a ponto através do GOOSE.
 - Configurações devem ser feitas através de arquivos SCL baseados em XML.
 - Relatórios, controle, auto-descrição e *poll response* devem ser permitidos através do protocolo MMS.
 - Cada IED deve suportar um nome descritivo com até 16 caracteres permitindo ao usuário identificá-lo.
 - Deve suportar objeto de dados do tipo ACT. Este status representa que o IED recebeu um comando para executar um controle.
 - Deve suportar 06 conexões cliente-servidor simultaneamente.
-

- Deve suportar o *download* de arquivos “.CID” através de mecanismos padrões *Ethernet TCP/IP*.
- Cada IED deve ter capacidade para adicionar ou remover nós lógicos nos dispositivos lógicos.
- Cada IED deve ter capacidade de renomear livremente nós lógicos e dispositivos lógicos.

Para executar com eficácia as comunicações projetadas pela IEC 61850, a implementação do GOOSE em cada IED deve suportar os seguintes requisitos:

- Cada IED deve ser capaz de criar, aceitar e processar uma mensagem GOOSE.
 - Devem suportar segregação de redes a partir de VLANs.
 - Cada IED deve ter capacidade de processar dados de outro IED.
 - Deve ser possível criar no IED mensagens GOOSE contendo dados booleanos e analógicos.
 - Deve ter capacidade de monitorar a qualidade das mensagens GOOSE.
 - Cada IED deve ser capaz de publicar oito mensagens GOOSE únicas.
 - Cada IED deve ser capaz de processar *data elements* e associar a sua qualidade.
 - Cada IED deverá ser capaz de monitorar a qualidade da mensagem e dados antes da utilização dos mesmos. No momento da configuração, o usuário final pode optar por ignorar os dados possivelmente corrompidos se a informação de qualidade da mensagem for baixa para evitar uma operação indesejada.
 - Cada IED deve suportar endereçamento de prioridade de mensagens GOOSE para a otimização de latência através de *switches Ethernet*.
 - Deve suportar uma mensagem GOOSE padrão sem configurações adicionais.
-

A fim de configurar o IED de forma eficaz o *software* a ser fornecido deve possuir as seguintes funcionalidades:

- Deve ser possível importar informações de configurações de outros IEDs através de arquivos ICD, CID ou SCD. Deve também fornecer mensagens de erros descrevendo possíveis problemas na importação.
- O *software* deve validar as informações para confirmar se está em conformidade com a IEC 61850.
- Deve suportar IEDs com nomes de até 16 caracteres.
- Deve suportar a edição e revisão de *data sets* dos IEDs.
- Deve ser possível mapear todos os dados disponíveis no *data set* dos IEDs.
- Deve permitir associar a qualidade dos dados aos mesmos.
- Deve permitir a edição e criação de mensagens GOOSE.
- Deve gerar advertências ao usuário para evitar a edição incorreta de *data sets* assim como a utilização de dados já utilizados.
- O *software* de configuração deve permitir que o usuário carregue diretamente o arquivo SCL para o IED, ou possa exportá-lo para o armazenamento ou carregamento remoto.
- O *software* de configuração deve permitir a importação e exportação de arquivos SCL, sem modificação das regiões privadas do original.
- O *software* de configuração deve criar arquivos no formato XML que podem ser modificados pelos editores XML e ferramentas para ajudar a resolver conflitos ou erros em arquivos danificados.

A seção dez da norma IEC 61850 define métricas a serem medidas nos dispositivos e documentadas pelos fornecedores para que os usuários finais podem comparar vários fornecedores. Para cada IED, precisão da estampa de tempo serão identificados e documentados, fornecendo as duas medidas seguintes:

- Erro máximo de sincronização do *clock*, o que indica a precisão do IED para sincronizar seu relógio com a referência de tempo.
- Erro de atraso máximo do tempo de estampa, que indica a precisão do IED para "estampar" os dados quando o evento ocorre.

4.3 Fluxo de Engenharia para desenvolvimento do projeto

De acordo com Mônaco (2009), a figura 25 ilustra as atividades que devem ser executadas por cada uma das entidades, deixando claro as interfaces entre as mesmas e as informações que devem ser trocadas.

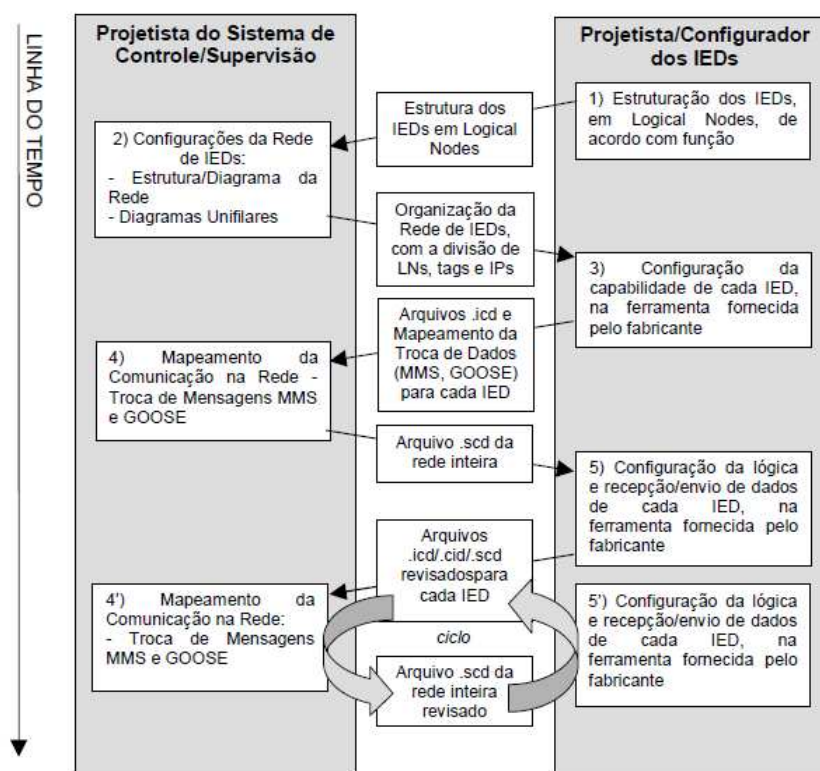


Figura 25. Fluxo de Engenharia.

(Fonte: Mônaco, 2009.)

Ainda segundo Mônaco (2009), as atividades de desenvolvimento são descritas a seguir:

Estruturação dos IEDs, em Logical Nodes: Nesta atividade inicial será feita a padronização dos tipos de elementos lógicos que serão usados no projeto. Neste momento serão tomados os tipos de equipamentos a serem controlados do projeto, a partir dos diagramas unifilares, e serão criados “Típicos de Acionamento/Controle” para cada tipo de equipamento/dispositivo.

Uma vez padronizados os típicos de acionamento/controle, para cada um destes será necessário definir uma estrutura de *Logical Nodes* que atenda suas funcionalidades, de acordo com a norma IEC 61850. Esta estrutura de *Logical Nodes* deverá ser seguida para todos os equipamentos que pertençam ao mesmo típico.

Quando definidos os típicos, deve ser feita também a relação entre os equipamentos a serem controlados do campo (de acordo com os diagramas unifilares) e os correspondentes IEDs que os controlarão, ou seja, a alocação dos equipamentos nos IEDs. Esta alocação deve levar em conta a capacidade do IED utilizado no projeto, tendo em vista a quantidade e tipos de *Logical Nodes* disponibilizado pelo modelo escolhido.

Configurações da Rede de IEDs: Uma vez recebida a estrutura dos típicos de acionamento/controle em *Logical Nodes* e a tabela de alocação dos equipamentos físicos nos IEDs correspondentes, é possível gerar os diagramas de configuração de toda a rede IEC 61850, que conterá toda a estrutura do projeto. Este diagrama conterá toda a estrutura física da rede, como IEDs, *switches*, o sistema de supervisão e controle, entre outros equipamentos que possam estar ligados na rede. Além disto, neste diagrama estarão os nomes (*tags*) dos IEDs e também endereços IPs de todos os equipamentos, que permitirá ao administrador do sistema uma supervisão e organização de toda a rede.

Configuração da capacidade de cada IED, na ferramenta fornecida pelo Fabricante: Esta atividade é feita através da criação do arquivo “.icd”. Além dos *Logical Nodes* que o IED poderá controlar, este arquivo possui também a informação do nome (*tag*) do IED, como também de seu IP. Pode conter também os pacotes de informações que o IED deverá enviar à rede IEC 61850 que são os chamados “*Data Sets*” bem como os blocos lógicos responsáveis pelo envio destes pacotes, que são os chamados “*Control Blocks*”.

A prática de projeto sugere que os *Data Sets* e *Control Blocks* referentes à comunicação entre os próprios IEDs devem já constar neste arquivo; pois servirão apenas para conhecimento do sistema de supervisão e controle. Com isto, torna-se desnecessário que o projetista/configurador dos IEDs envie ao projetista do sistema de supervisão e controle o mapeamento da comunicação a ser feita entre os IEDs (via mensagens GOOSE). Quanto aos pacotes a serem trocados com o sistema de supervisão e controle (quer seja via vertical ou horizontal), os mesmos devem ser configurados pela ferramenta de mapeamento de comunicação da rede do sistema de controle, na próxima atividade. Todavia, para alguns modelos de IED isto não é possível, pois eles não conseguem importar a configuração de *Data Sets* e *Control Blocks* do arquivo “.scd”. Então se deve fazer um estudo após a definição do modelo do IED a ser utilizado.

Mapeamento da Comunicação na Rede - Troca de Mensagens MMS e GOOSE: A troca de mensagens entre os IEDs é mapeada na ferramenta de engenharia do sistema de supervisão e controle, onde deve ser feita a gestão de todas as mensagens trocadas entre os IEDs e entre o controlador (considerado na rede IEC 61850 como um IED, pois troca mensagens via GOOSE com os outros IEDs), e também com o sistema de controle/supervisão.

De posse dos arquivos de capacidade dos IEDs, é possível conhecer quais informações cada IED tem disponível (*Logical Nodes*) e também, dependendo do modelo do IED/arquivo “.icd”, até os pacotes de informações e blocos de controle que cada IED poderá executar na rede.

A gestão de ambos os tipos de mensagem é em geral semelhante na ferramenta de mapeamento da comunicação do sistema de supervisão e controle. Em ambos os casos é necessário determinar um conjunto de informações que será enviado na mensagem (*Data Set*), e criar um bloco de controle que será o encarregado pelo envio da mensagem (*Control Block*), quanto aos períodos de envio e destinatários. A diferença entre as mensagens MMS e GOOSE está no tipo de *Control Block* a ser criado.

Toda a comunicação a ser feita na rede deve ser mapeada nesta ferramenta, independente de ser entre os IEDs somente, ou entre um IED e o Sistema de Controle, porque será gerado o arquivo que conterá a descrição da comunicação da rede inteira,

o “*Substation Configuration Description*”, com extensão “.scd”. Este arquivo deverá ser então carregado em todos os IEDs da rede, e todos os IEDs devem conter a mesma versão do arquivo, para evitar problemas de comunicação ou rejeição de mensagens.

Configuração da lógica e recepção/envio de dados de cada IED, na ferramenta fornecida pelo fabricante: A última parte faltante no projeto para o projetista/configurador dos IEDs é configurar a lógica interna de cada IED, na ferramenta de programação fornecida pelo fabricante. Cada IED será configurado para executar lógicas de proteção, controle, medição, etc., de acordo com os equipamentos físicos das subestações que ele controlará.

Com o arquivo “.scd” em mãos, o projetista já é capaz de conhecer logicamente toda a comunicação da rede. Se um IED necessitar de alguma informação de outro IED para sua lógica interna de intertravamento/proteção ou controle, uma vez carregado o arquivo “.scd” na sua ferramenta de programação, é possível configurar o recebimento da informação/variável desejada, copiando-a para sua lógica interna. O envio de informações não precisa ser configurado na ferramenta do sistema de supervisão e controle no passo anterior e já consta no arquivo “.scd”.

Após configurar a lógica interna de cada IED, é feito o *download* do programa em cada um. Assim todos os equipamentos da rede sabem exatamente como se comportar, tanto em nível de lógicas de proteção e controle, como de comunicação entre eles.

Nesta etapa, é possível que o projetista/configurador dos IEDs julgue necessário fazer uma revisão no arquivo de capacidade de algum IED (“.icd”). Assim pode ser gerado o arquivo de extensão “.cid”, que conterá uma revisão do arquivo de capacidade original.

Configuração da recepção/envio de dados no Sistema de Controle e Supervisão: Como informação, já que não afeta mais o fluxo de engenharia entre as duas entidades envolvidas, a configuração do envio e recepção de dados no sistema propriamente dito é a última atividade a ser efetuada pelo projetista do sistema de controle e supervisão.

Isto é feito realizando a importação do arquivo “.scd” gerado no sistema. Este já conterá toda a configuração da troca de informações entre a rede IEC 61850 e o sistema. Uma biblioteca de objetos típicos deve ser desenvolvida, baseada nos típicos

desenvolvidos anteriormente, contendo objetos como disjuntores, transformadores, geradores, etc. Finalmente a comunicação entre o sistema de controle e IEDs, e também controladores e IEDs é feita, baseada no mapeamento da comunicação da rede, presente no arquivo “.scd”.

Capítulo 5

Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

Ao final deste trabalho pode-se afirmar que foi possível atingir os principais objetivos propostos no início que eram apresentar as principais funcionalidades e requisitos definidos pela norma IEC 61850 e definir critérios e um guia de especificação para projetos de automação de sistemas elétricos conforme a norma.

Dentre os pontos da norma estudados destaca-se que atenção especial deve ser dada ao conhecimento de:

- Protocolos de redundância.
- Tipos de mensagens.
- Estrutura de dados.
- Linguagem de programação.
- Serviços disponíveis.

Através desse trabalho foi possível determinar requisitos de especificação como tempos de atualização, etapas de desenvolvimento de projetos, arquitetura de rede ideal, confiabilidade do sistema além de pontos que não são exigidos pela norma, mas que são de extrema importância para permitir uma total integração entre os dispositivos. Foi possível também enumerar os diversos benefícios da utilização da norma.

Outro ponto de extrema importância destacado neste trabalho está relacionado aos testes requisitados pela norma com relação à interoperabilidade entre IEDs. Estes testes devem ser efetuados em qualquer projeto desenvolvido de acordo com a norma para garantir a interoperabilidade e segurança do sistema.

Foi confirmado que através da utilização adequada da norma no desenvolvimento dos projetos, é possível efetuar a troca de dados entre IEDs inclusive de diferentes fabricantes, possibilitando, entre outras vantagens, a realização de proteção através

da rede, inclusive para subestações distantes umas das outras e a flexibilidade de implementação de funções de intertravamento. Fica claro também que a implantação da norma se dá principalmente para garantir a liberdade do usuário escolher fornecedores diferentes em uma solução global com o objetivo de redução de custos.

Finalizando este trabalho são feitas três sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros:

- A elaboração de um estudo de caso prático utilizando os critérios aqui definidos. Pode-se neste caso fazer uma análise das diferenças práticas de projetos conforme a norma e dos projetos convencionais de SAS.
 - A segunda sugestão é que após a implementação do estudo de caso sejam feitas medições de tempos de resposta para atualizações de dados na rede, comandos e intertravamentos para confirmar as funcionalidades e garantias de operação do sistema. Sugere-se que neste caso sejam efetuados todos os testes solicitados pela norma e discutidos no item 3.8 deste trabalho.
 - Finalizando fica como sugestão o desenvolvimento de um estudo da eficiência das mensagens GOOSE considerando principalmente a análise de perdas de mensagens e os atrasos de fim a fim considerando todos os ativos presentes na rede.
-

Referencias Bibliográficas

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. IEC 61850-1. Introduction and Overview. 2003

MONACO, Leandro Henrique. Integração com IEC 61850 - Fluxo de Engenharia. 13º Seminário de Automação de Processos - 07 a 09 de outubro de 2009 - Belo Horizonte.

HOU, Daqing; DOLEZILEK, Dave. IEC 61850 – What It Can and Cannot Offer to Traditional Protection Schemes. Schweitzer Engineering Laboratories - 2008.

TIBBALS, Tim; DOLEZILEK, Dave. More Than Communication – the Engineering Approach of IEC 61850. Schweitzer Engineering Laboratories - 2007.

STANLEY, A. Klein. Security, Cost and Operational Benefits of IEC 61850. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE - 20 a 24 de Julho 2008.

MIRANDA, Juliano Coelho. IEC 61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Através das Redes de Comunicação de Dados. Dissertação de Mestrado – Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

COSTA, Nilson Santos. Proteção de Sistemas Elétricos considerando Aspectos de Segurança da Rede de Comunicação. Tese de Doutorado – Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ANDERSON, Lars; BRAND Klaus Peter. Reliability investigations for SA communication architectures based on IEC 61850. Power Tech - 27 a 30 de Junho 2005. São Petesburgo.

MACKIEWICZ, R.E.. Overview of IEC 61850 and Benefits. Power Engineering Society. Outubro de 2006.

POZZUOLI, Marzio. Industrial Ethernet – Issues and Requirements, University of Toronto Ontario.

TANENBAUM, A. S. Computer Networks. 4^a ed. Amsterdsam: Prentice Hall, 2002. 632 p.

GUERRERO, Carlos Alberto Villegas. Uso do RTDS em Testes de Esquemas de Teleproteção Aplicando O Padrão IEC 61850. Dissertação de Mestrado – Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2011.

MELLO, Nilo Felipe Batista. Automação Digital de Subestações de Energia Elétrica. Monografia – Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MOREIRA, Vinicius Machado. Avaliação do desempenho da comunicação de dados baseada na IEC 61850 aplicada a refinarias de petróleo. Monografia – Especialização em Instrumentação. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009.

PAULINO, Marcelo Eduardo de Carvalho. Testes de IED's operando com redes de comunicação baseados na IEC 61850. Décimo segundo encontro regional Ibero-Americano do CIGRÉ. 20 a 24 de Maio de 2007. Foz do Iguaçu, Brasil.

PAULINO, Marcelo Eduardo de Carvalho. Procedimentos de Teste de Conformidade e Interoperabilidade à Luz da Norma IEC 61850 Aplicados a Subestações. SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. 14 a 17 de Outubro de 2007. Rio de Janeiro, Brasil.

ANTONOVA, Galina; FRISK, Lars; TOURNIER Jean-Charles. Communication Redundancy for Substation Automation. Annual Conference for Protective Relay Engineers. 2011.

OZANSOY C. R.; ZAYEGH A.; KALAM A. Time Synchronisation in a IEC 61850 Based Substation Automation System. Australasian Universities Power Engineering Conference. 2008.

TAN, Jian-Cheng. IEC 61850 Based Substation Automation System Architecture Design. Power and Energy Society General Meeting. 2011.

ARAUJO, Alana Ramos. Aplicação da norma IEC 61850-8-1 nas redes de proteção do sistema elétrico. Monografia – Engenharia de Computação. Universidade de Pernambuco. Recife, 2011.
