

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDO EDUARDO COVATTI

**DESENVOLVIMENTO DE UM *GATEWAY*
WIRELESSHART E IEC 61850**

Porto Alegre

2014

FERNANDO EDUARDO COVATTI

**DESENVOLVIMENTO DE UM *GATEWAY*
WIRELESSHART E IEC 61850**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre

2014

FERNANDO EDUARDO COVATTI

**DESENVOLVIMENTO DE UM *GATEWAY*
WIRELESSHART E IEC 61850:**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universität Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Walter Fetter Lages, PPGEE-UFRGS

Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos, Brasil

Prof. Dr. João César Netto, PPGC-UFRGS

Doutor pela Universite Catholique de Louvain – Louvain-la-Neuve, Bélgica

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, PPGEE-UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, fevereiro de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe que sempre me estimulou a me manter estudando.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao professor Dr. Carlos Eduardo Pereira pela disponibilidade de me orientar durante este período e também por todas as oportunidades criadas.

Aos colegas Jean Michel Winter e Ivan Muller pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso, apoio na elaboração de artigos e deste trabalho.

A Datacom e a CEEE-GT por disponibilizar horas de trabalho para atender as disciplinas do mestrado e elaborar a dissertação.

RESUMO

Sistemas de automação para monitoramento e controle de subestações de energia elétrica têm passado por uma constante evolução motivada por diversos fatores como o advento de novas tecnologias, a maior complexidade dos sistemas elétricos, o aumento de demandas de energia, bem como as reduções de custo necessárias para se obter uma maior competitividade das empresas do setor. Melhorias significantes nesses aspectos são obtidas através da implementação da norma IEC 61850. Tal norma proporciona, como vantagem principal, a interoperabilidade entre dispositivos de diversos fabricantes. Entretanto, ainda há uma lacuna no que diz respeito ao uso de sistemas de comunicação sem fio, pois a norma atual não contempla tal opção. O uso de redes sem fio pode trazer uma série de benefícios ainda não explorados, como prover baixos custos de manutenção e instalação. Esse trabalho propõe uma solução para a integração de sistemas de comunicação sem fio com a norma IEC 61850, atendendo aos requisitos de subestações de energia, tais como, confiabilidade e segurança.

Palavras-chave: IEC 61850, Subestações de Energia Elétrica, WirelessHART.

ABSTRACT

Automation systems for power substations monitoring and control have been constantly evolving due to different factors like the advent of new technologies, higher complexity in the power system, high energy demands, as well as cost reductions required by the companies in the sector in order to remain competitive. Significant improvements can be achieved in these aspects through the implementation of IEC 61850 standard, whose main advantage lies in the interoperability between the different devices. However, there is still a gap in the use of wireless communication systems. The current standard does not adopt wireless communication options which would bring the benefits of low maintenance and installation costs. This work proposes a solution for the integration of wireless communication technologies within the standard IEC 61850 attending the requirements of the power substations, such as reliability and security even in real-time applications.

Keywords: IEC 61850, Power Substations, WirelessHART.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	DEFINIÇÃO E CONCEITOS DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES	13
2.1.1	Histórico	13
2.1.3	Quantificação das Informações de Supervisão	16
2.1.4	Protocolos	16
2.1.5	Topologias de Rede	18
2.2	REDES SEM FIO	25
2.2.1	Requisitos	25
2.2.2	Padrões	27
2.3	A NORMA IEC 61850	29
2.3.1	Automação de Subestações	29
2.3.2	A Estrutura da IEC 61850	31
2.3.3	Modelagem de Dados	33
2.3.4	Princípios de Comunicação	36
2.3.5	Requisitos Temporais	40
2.3.6	Metodologias de Configuração	43
2.4	O PADRÃO WH	44
2.4.1	Protocolo WH	45
2.4.2	Camadas do Protocolo	46
2.4.3	Segurança	47
2.4.4	Roteamento	48
3	ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE	49
3.1	TRABALHOS RELACIONADOS À UTILIZAÇÃO DE REDES SEM FIO EM SUBESTAÇÕES	49
3.2	APLICAÇÕES DE REDES SEM FIO EM SUBESTAÇÕES	53
4	GATEWAY WH IEC 61850	57
4.1	MAPEAMENTO DAS MENSAGENS	59
4.2	CONFIGURAÇÃO DO GATEWAY	60
4.3	PRÉ-REQUISITOS TEMPORAIS	63
4.4	ARQUITETURA DO SOFTWARE	65
4.5	DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO	67
4.6	PLATAFORMA EMBARCADA	72
5	RESULTADOS OBTIDOS	76
5.1	CENÁRIO DE TESTES	76
5.1.1	IEC 61850	76
5.1.2	WH	76
5.2	RESULTADOS	77
5.3	COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS	82
6	TRABALHOS FUTUROS	84
7	CONCLUSÕES	86
	REFERÊNCIAS	89

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Dispositivos utilizados na automação de uma SE.....	15
Figura 2 Topologia em estrela.....	19
Figura 3 Topologia em estrela com redundância.....	20
Figura 4 Topologia em anel.....	21
Figura 5 Topologia Anel/Estrela.....	21
Figura 6 Topologia em Anel com redundância e relés dispensando comutadores externos....	22
Figura 7 Combinação de Anel com diversas estrelas.....	23
Figura 8 Combinação com o uso de dois anéis.....	24
Figura 9 Combinação com anel duplo.....	25
Figura 10 Barramentos da IEC 61850.....	31
Figura 11 Relação entre a modelagem e o mapeamento das partes da norma IEC 61850 (YONA, 2012).....	32
Figura 12 Hierarquia e modelo de dados (YONA; 2012).....	34
Figura 13 Protocolos da Norma IEC 61850 (BRAND; 2006).	37
Figura 14 Pacote GOOSE.....	39
Figura 15 Concatenação de vários ASDUs em um frame (IEC 61850-9-2; 2004).....	40
Figura 16 Utilização dos diferentes tipos de arquivo SCL (SCHOSSIG, 2010).....	44
Figura 17 Típica rede WH.....	46
Figura 18 WH e o modelo OSI (IEC 62591, 2010).....	47
Figura 19 Conversão serial para IEC 61850 na comunicação em um microgrid (YOO, 2011).	51
Figura 20 Comunicação Sem Fio para proteção do barramento de distribuição (Adaptado de PARIKH et al., 2012).....	54
Figura 21 Diagrama de contexto do <i>gateway</i> IEC 61850 WH.....	57
Figura 22 Pacote Hart Sobre UDP.....	59
Figura 23 Seção de Comunicação de um arquivo SCD.....	61
Figura 24 Seção do IED de um arquivo ICD.....	62
Figura 25 Tipos de dados definidos num Arquivo ICD.....	63
Figura 26 Arquitetura simplificada de comunicação do <i>gateway</i>	65
Figura 27 <i>Gateway</i> WH do fabricante Emerson.....	66
Figura 28 Mecanismo para envio de mensagens GOOSE.....	67
Figura 29 Visão geral do sistema.....	68
Figura 30 Fluxograma Simplificado de funcionamento.....	69
Figura 31 Mensagem GOOSE verificada com a ferramenta analisadora de protocolos Wireshark.....	72
Figura 32 Raspberry Pi - modelo B utilizado para rodar o software.....	73
Figura 33 Tempos de Latência do Sistema Operacional Utilizando o Xenomai na Raspberry Pi.....	74
Figura 34 Latência das mensagens nas diferentes redes.....	77
Figura 35 Latência D2 do comando HART periódico.....	78
Figura 36 Diagrama de Iteração entre os componentes envolvidos na medição.....	79
Figura 37 Latências D1, D2 e D3 para o comando HART aperiódico.....	80
Figura 38 Latência D2 para o comando HART periódico (Raspberry Pi).....	81
Figura 39 Latências D1, D2 e D3 para o comando HART aperiódico (Raspberry Pi).....	82
Figura 40 Proposta de <i>gateway</i> Futuro.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Exemplo de nó Lógico (IEC 61850-7-4, 2003).....	35
Tabela 2 Exemplo de Classe de Dados do tipo DPC (IEC 61850-7-3, 2003).....	36
Tabela 3 Tipos de mensagens Suportadas pela norma IEC 61850.....	41
Tabela 4 Taxa de amostragem para mensagens de proteção e controle (IEC 61850-5, 2003).42	
Tabela 5 Taxa de amostragem para mensagens de medição (IEC 61850-5, 2003).....	42
Tabela 6 Latência Máxima em diversos Trabalhos	53

LISTA DE ABREVIATURAS

APDU: Application Protocol Data Unit

ASN: Absolute Slot Number

IEC: International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

ISM: Industrial, Scientific and Medical

MAC: Medium Access Control

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

TCP: Transmission Control Protocol

UDP: User Datagram Protocol

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UWB: Ultra-Wideband

WH: *Wireless*HART

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma grande variedade de protocolos de comunicação na indústria, os quais apresentam algumas diferenças em suas funcionalidades, bem como suas implementações, em dispositivos de diferentes fabricantes, e, esse problema, também acontece em sistemas de automação em subestações de energia elétrica. Diversos sistemas são utilizados em centros de controle (SCADA, EMS e DMS) para o monitoramento e controle de equipamentos do sistema de potência. Embora esses sistemas sejam para o mesmo equipamento físico, eles possuem diferentes níveis de detalhamento em relação às particularidades de cada dispositivo. Em 1998, com o objetivo de superar esses problemas de interoperabilidade, foram fundados o Comitê técnico 57 (TC57) e o grupo de trabalho 10 (WG10) da IEC, que desenvolveram e criaram a norma internacional para Redes de comunicação e sistemas em subestação denominada de IEC 61850 (IEC 61850-SER ed1.0, 2010). A norma IEC 61850 propõe um modelo de dados padrão, focando nos conceitos de orientação a objeto, definindo os protocolos de comunicação e funções para os dispositivos, de forma a facilitar a modelagem de uma subestação.

A IEC 61850 tem sido amplamente utilizada no setor elétrico, principalmente devido às reduções de custo com fabricação de equipamentos e cabeamento entre dispositivos. Todavia, essa norma não incorpora soluções para redes sem fio, o que é um aspecto negativo devido aos diversos benefícios advindos do uso destes sistemas, tais como escalabilidade, flexibilidade, baixo custo de infraestrutura e rápida instalação. Porém, a indústria já utiliza padrões para comunicação sem fio, os quais são compatíveis com os requisitos e ambientes agressivos. Os padrões sem fio utilizados e recomendados pelos órgãos internacionais tais como a IEC e que apresentam os requisitos mínimos de segurança, determinismo, confiabilidade e etc. para ambientes industriais são o WirelessHart (IEC 62591, 2010), ou WH, ISA 100.11a (IEC 62734, 2011) e WIA-PA (IEC 62601, 2011).

Esse trabalho apresenta uma proposta de desenvolvimento de um *gateway* WH para IEC 61850, buscando trazer para as subestações de energia soluções de comunicação sem fio. A proposta considera a manutenção da norma atual, mas expandindo as possibilidades de controle e monitoramento dos diversos equipamentos utilizados nesse setor através do uso de tecnologias sem fio. O texto é organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, onde são discutidos os conceitos de automação de subestações e redes sem fio, além de aprofundar o estudo da norma IEC 61850 bem como o protocolo WH e suas particularidades. No capítulo 3 é apresentado o estado da arte e estudos recentes do uso da IEC 61850 em redes sem fio. No capítulo 4 se detalha o trabalho desenvolvido de um *gateway* WH IEC 61850. Já no capítulo 5 são demonstrados os resultados obtidos com esse *gateway*. No capítulo 6 são feitas propostas de trabalhos futuros. Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre os resultados e informações obtidas no trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos básicos de automação de subestações bem como de redes sem fio.

2.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES

As empresas do setor elétrico tentam entregar energia confiável para os clientes com maior eficiência possível, reduzindo perdas e maximizando seus lucros. Uma das formas de se atingir estes objetivos é reduzindo-se os custos de manutenção e operação das subestações de energia. A automação de subestações tem um papel essencial nesse aspecto, pois pode prover as informações necessárias, através de dispositivos inteligentes, para manter e operar uma subestação com máxima eficiência.

2.1.1 Histórico

Uma subestação consiste em diversos equipamentos como relés microprocessados, disjuntores, chaves seccionadoras motorizadas, transformadores, bancos de capacitores, reatores, alimentadores e linhas de transmissão ou subtransmissão. Através de dispositivos inteligentes é possível monitorar a funcionalidade de cada um desses equipamentos e notificar os operadores em casos de falha, além de permitirem o monitoramento do sistema via interface gráfica ou mesmo o acesso remoto a todas informações.

Adicionalmente, as subestações têm sido equipadas com dispositivos para executar fechamentos automáticos, seccionamento automático de barramentos, transferência de cargas automática, chaveamento automático de capacitores ou reatores. No passado, essas e outras funcionalidades eram implementadas usando uma combinação de painéis de controle, chaves, luzes, medidores, transdutores e etc. Todos a custo de extensivo cabeamento.

Com a expansão do potencial dos dispositivos presentes nas subestações para patamares que anteriormente não poderiam ser alcançados, a automação dentro delas ainda tem sido tratada como algo novo, principalmente devido a sistemas legados que ainda fazem parte da realidade das empresas. O principal desenvolvimento nessa área foi o de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED), que incorporam um ou mais microprocessadores e diversas portas de comunicação com a capacidade de receber e transmitir dados, além de executar comandos de controle. Alguns exemplos são relés de proteção, medidores e demais sensores. Com o advento dos IEDs foi possível reduzir o número de painéis e cabeamento necessários para automatizar uma subestação e por consequência a redução do espaço e custo de instalação.

De forma a coletar os dados disponibilizados por esses IEDs e controlar a subestação de uma maneira mais simples, são empregadas unidades terminais remotas (UTR) ou unidades concentradoras de subestação (UCS), de forma a centralizar as informações de todos os IEDs e depois enviá-las para um sistema supervisor gráfico do tipo Interface Homem-Máquina (IHM) ou mesmo um centro de controle e operação do sistema (COS) remoto para que se possa tomar decisões de operação, engenharia ou planejar manutenções (KHEDKAR, DHOLE, 2010). A Figura 1 exemplifica os dispositivos utilizados na automação de uma Subestação.

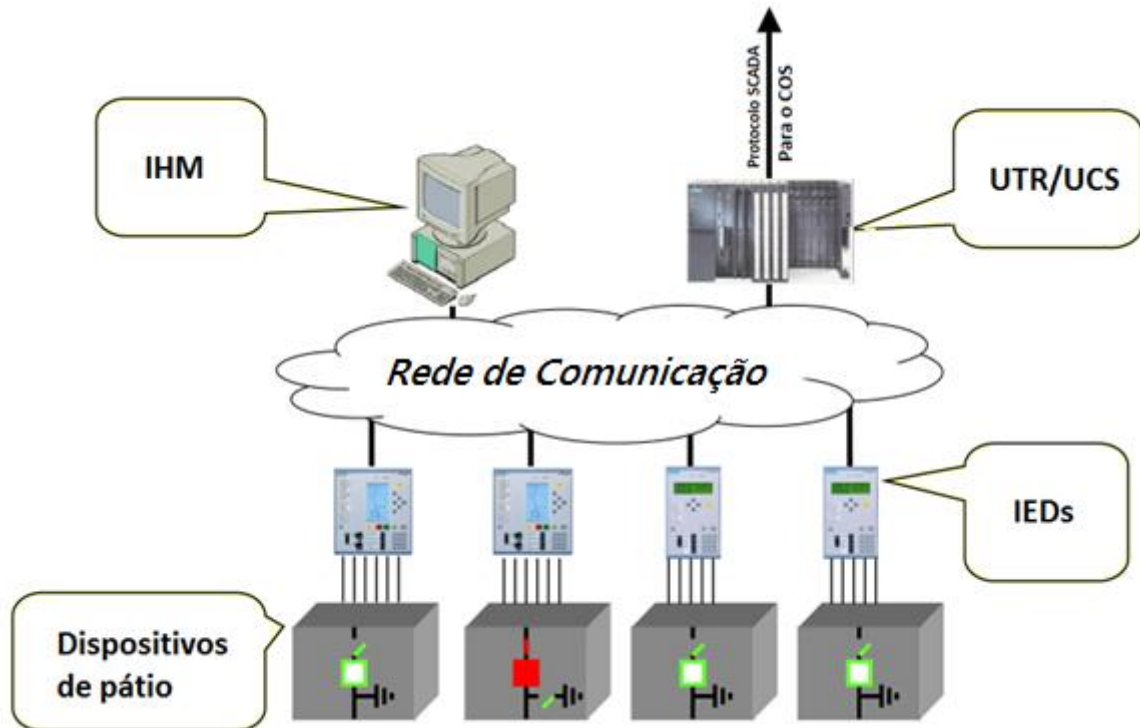


Figura 1 Dispositivos utilizados na automação de uma SE.

As informações necessárias para conseguir controlar cada equipamento que compõe uma subestação variam de acordo com suas funcionalidades. Por exemplo, um alimentador de distribuição necessita de informações de tensão do barramento, corrente do alimentador, estado do disjuntor, estado do relé de religamento, saída dos relés de abertura por corrente, ocorrências de sobrecorrente. Além disso, algumas saídas de controle são necessárias como de abertura/fechamento do disjuntor e de habilitar/desabilitar o religamento. Quanto maior a complexidade do elemento numa Subestação, mais informações e funcionalidades são necessárias para controle.

2.1.2 Critérios de supervisão de acordo com o Operador Nacional do Sistema

Sendo assim, o Operador Nacional do Sistema (ONS) especifica, em uma série de documentos chamados de procedimentos de rede, quais informações supervisórias cada agente deve enviar para seus centros de operação de forma a prover a observabilidade

necessária para conseguir assim manter o sistema interligado nacional funcionando corretamente.

Como pode ser observado como exemplo no anexo: *Crerios de supervisao de acordo com o ONS para uma linha de Transmissao*, uma grande quantidade de informacoes se faz necessaria para supervisionar um modulo, sendo que uma subestacao pode ser composta de diversas linhas, alem de transformadores, barramentos, bancos de capacitores, alimentadores e etc., cada um com sua complexidade que pode ser encontrada no submodulo 2.7 dos procedimentos de (ONS, 2012) rede.

2.1.3 Quantificacao das Informacoes de Supervisao

Essas informacoes que o ONS solicita, nao necessariamente sao suficientes para, por exemplo, se teleassistir uma subestacao. As agentes do setor praticam o monitoramento e controle a distancia das subestacoes de forma a reduzir ainda mais os custos com mao de obra e nao necessitar que um operador esteja disponivel 24 horas por dia dentro de uma subestacao para executar as rotinas e manobras de operacao. Dessa forma, quaisquer outras informacoes que nao estao nos procedimentos de rede, porer que facilitam o atendimento de alguma ocorrencia ou mesmo a nao necessidade de uma inspecao visual de algum equipamento, sao requisitadas pelos centros de controle dos agentes, aumentando ainda mais a quantidade de informacoes supervisionadas. Para exemplificar, um modulo de linha de transmissao dentro de uma subestacao da CEEE-GT que e teleassistida, possui em media cerca de 200 pontos de supervisao (entre medidas, estados, eventos e comandos). Para as 65 subestacoes da empresa, sendo que apenas metade delas sao teleassistidas, cerca de 50 mil pontos de supervisao fazem parte do sistema de supervisao no centro de operacao da CEEE-GT em meados de 2014.

2.1.4 Protocolos

De forma a se conseguir automatizar todos os equipamentos de uma subestação e também transmitir as informações entre os diferentes sistemas de controle, diversos protocolos foram criados para o setor elétrico. Antigamente o controle era feito sem protocolos de comunicação entre os dispositivos, somente por conexões diretas aos equipamentos de pátio e painéis com medidores, anunciadores, relés de proteção mecânicos, chaves de controles e etc. Com o surgimento de sistemas digitais, os sistemas de controle antes completamente analógicos começaram a ser substituídos, porém sem uma preocupação dos fabricantes em termos de interoperabilidade, robustez ou segurança. Assim, os inúmeros protocolos proprietários dos diversos fabricantes, quando documentados, causavam uma grande dificuldade de integração ou mesmo substituição dos dispositivos. Essa dificuldade de integração muitas vezes era proposital para manter o domínio de mercado. Com o surgimento dos IEDs na década de 80, o número de protocolos cresceu exponencialmente, sendo que cada fabricante criava um novo protocolo para cada IED lançado, fazendo com que os agentes sofressem ainda mais para integrar esses IEDs com seus sistemas de controle e UTRs. Assim, no final da década de 80, foi formado um grupo de trabalho (WG) da IEEE para investigar esse problema em busca de uma solução. O WG criou uma lista de requisitos para os protocolos e o resultado desse trabalho foi uma verificação de todos os protocolos presentes no sistema, resultando na publicação da norma IEEE 1397 de 1997, que selecionou dois protocolos a serem recomendados para troca de informações entre IEDs e UTRs: Distributed Network Protocol Version 3 (DNP3) e o IEC 60870-5-101. Posteriormente, tal norma teve mais algumas evoluções e uma segunda revisão foi lançada em 2000. Ambos os protocolos previam comunicação serial no nível físico como RS-232, RS-485, V.24e etc.

Em meados de 2002, esse mesmo grupo que desenvolveu a norma 1397, compôs uma força tarefa para prover recomendações similares para as emergentes necessidades em sistemas de comunicação e a norma da IEEE 1615 2007 foi desenvolvida, porém com um

foco mais genérico com relação às redes de comunicação. Assim, servindo como guia para que os projetistas pudessem verificar os benefícios de utilizar os conjuntos de protocolos relacionados a redes Internet com diferentes protocolos no nível físico, como por exemplo, Ethernet e diferentes meios físicos como fibra, par trançado e etc. Tal norma também tem o intuito de auxiliar os fabricantes, integradores de sistemas ou mesmo consultores a instalar os diversos dispositivos de forma a que se obtenha interoperabilidade, sem a necessidade de outros adicionais, customizações ou configurações especiais. Além disso, a norma IEEE 1615-2007 avalia o uso de redes sem fio no ambiente de subestação e possibilita seu uso, desde que o sistema atenda os requisitos de desempenho das aplicações. Com relação aos dispositivos sem fio, é indispensável que eles estejam de acordo com a IEEE 1613-2009, a qual apresenta as condições do ambiente de subestação e estabelece uma base comum para desenvolver e avaliar (testar) dispositivos de comunicação a serem instalados nesse ambiente. Também a norma 1615 alerta para que tais dispositivos não causem interferência em outros dispositivos da subestação, conforme estabelecido nas normas IEEE C37. 90.2 e IEC 61000-4-3.

Mesmo com o foco mais genérico em relação às redes de comunicação, a norma 1615 apresenta, em seus anexos, os protocolos primários de transferência de informação em subestações de energia elétrica que foram estendidos de seus protocolos originalmente seriais para atender redes Ethernet, que são o DNP3 over IP e o IEC 60870-5-104. Contudo, é introduzida também a norma IEC 61850 que contempla modelos de objetos, mapeamento desses modelos para protocolos de comunicação e a linguagem de configuração, sendo o objeto de estudo desse trabalho.

2.1.5 Topologias de Rede

Para uma comunicação de rede cabeada, uma série de topologias de rede pode ser utilizada entre dispositivos, as mais comuns em ambiente de subestação são em estrela ou anel.

A Figura 2 mostra a estrutura mais simples para uma topologia em estrela.

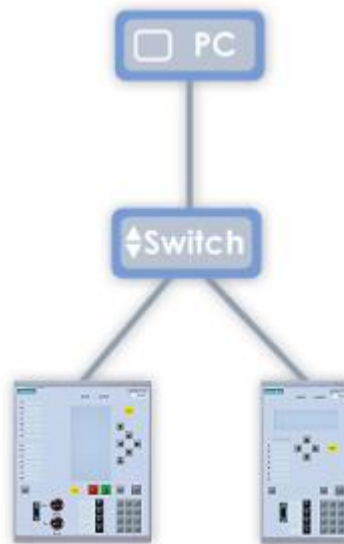


Figura 2 Topologia em estrela

Em tal configuração, o mínimo necessário é um switch, que conecte os dispositivos entre si. No caso são mostrados três dispositivos, sendo um PC e 2 relés, porém diversos dispositivos podem ser conectados a um switch, dependendo do número de portas nele disponibilizado. Um dos problemas da estrutura acima é que não existe nenhuma redundância de comunicação. No caso de uma falha no switch as informações não são mais distribuídas entre os dispositivos e numa falha na interface de rede do dispositivo, ele ficaria inacessível aos outros.

Outra proposta de configuração em estrela com redundância é mostrada na Figura 3:

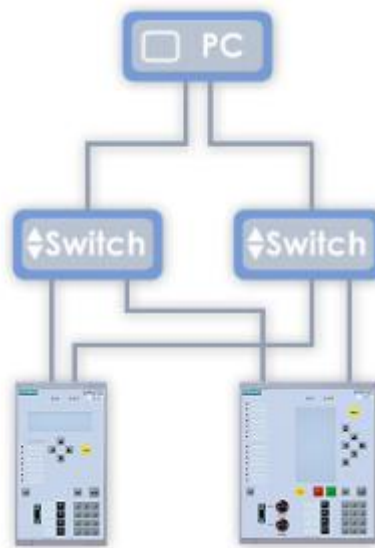


Figura 3 Topologia em estrela com redundância

Com essa estrutura se dobra o número de comutadores e interfaces de rede de cada dispositivo. No caso, apenas uma interface de cada dispositivo se comunica com o switch, mas no caso de uma falha, a outra interface (reserva) é automaticamente ativada pelo dispositivo.

O uso de diversos comutadores para se conseguir redundância, aumenta a necessidade de cabeamento entre os diversos comutadores e dispositivos. Uma alternativa mais prática é interconectar os comutadores em forma de anel, conforme a Figura 4, para isso são utilizados protocolos que evitem o loop de rede como o *Spanning Tree Protocol* (STP) (IEEE 802.1D, 1998) ou o *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) (IEEE 802.1W, 2001).

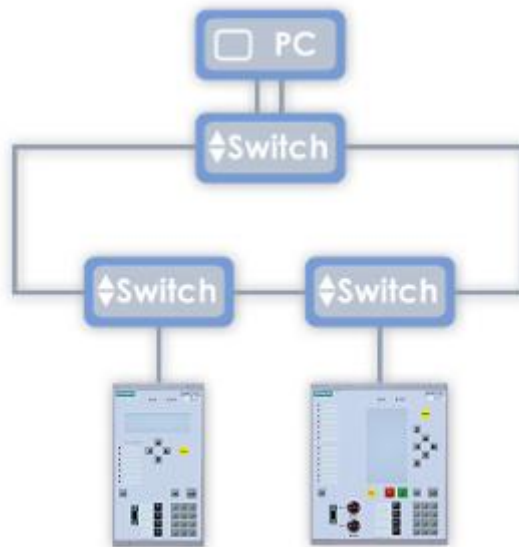


Figura 4 Topologia em anel

Porém nota-se que a topologia dos comutadores em anel apresentada na Fig.4 não possibilita a redundância de interfaces para os relés. Uma possibilidade seria utilizar uma topologia mista conforme a figura 5, onde temos um anel entre os comutadores e uma topologia em estrela entre os dispositivos.

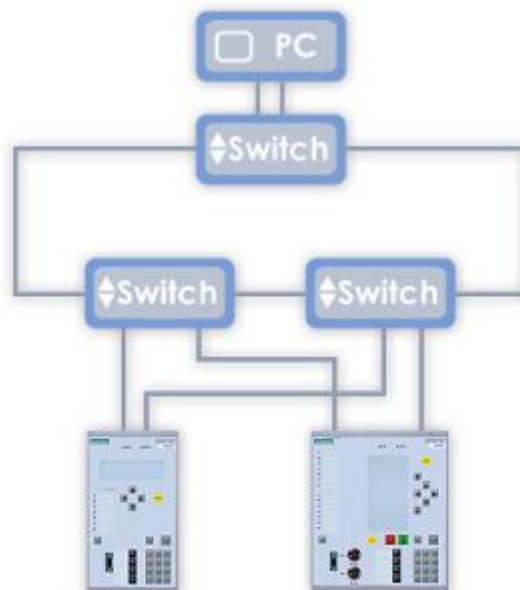


Figura 5 Topologia Anel/Estrela

Alguns dispositivos como relés e até mesmo PCs possibilitam o uso de uma topologia em anel sem o uso de comutadores externos de forma a simplificar um pouco a estrutura da rede, ou mesmo diminuir o número de comutadores. A Figura 6 apresenta esta topologia.

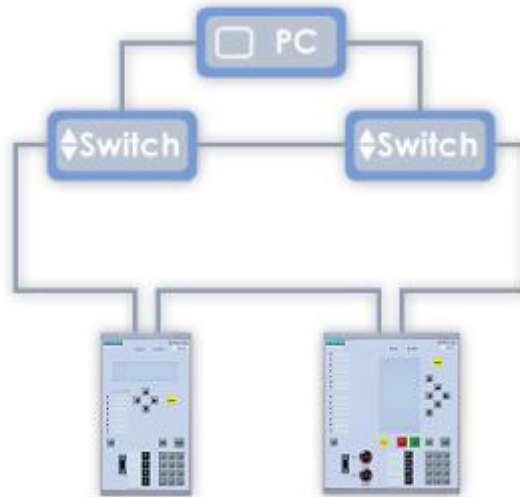


Figura 6 Topologia em Anel com redundância e relés dispensando comutadores externos

Na Figura 6 a informação é passada de dispositivo para dispositivo e no caso de uma falha de uma interface de rede (dos comutadores ou relés), a estrutura em anel se transforma em uma estrutura em linha. A comunicação continua funcionando sem interrupção, porém uma segunda falha, ou uma falha em um dispositivo por completo ocasiona a perda total de comunicação entre alguns dispositivos da rede (dependendo de onde ocorre a falha). Além disso, a quantidade de dispositivos em um anel é limitada pelo protocolo de rede utilizado para formação de anéis ou mesmo pelas recomendações dos fabricantes de comutadores ou relés. No caso do protocolo STP, com um *Max Age Time*, que é o tempo máximo para detectar modificações na topologia de uma rede, sendo, por exemplo, de valor inferior a 40s, pode impossibilitar o crescimento da rede para mais de cerca de 30 dispositivos.

Dentro dessas possibilidades de arquitetura em anel e estrela, as configurações mais utilizadas são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9.

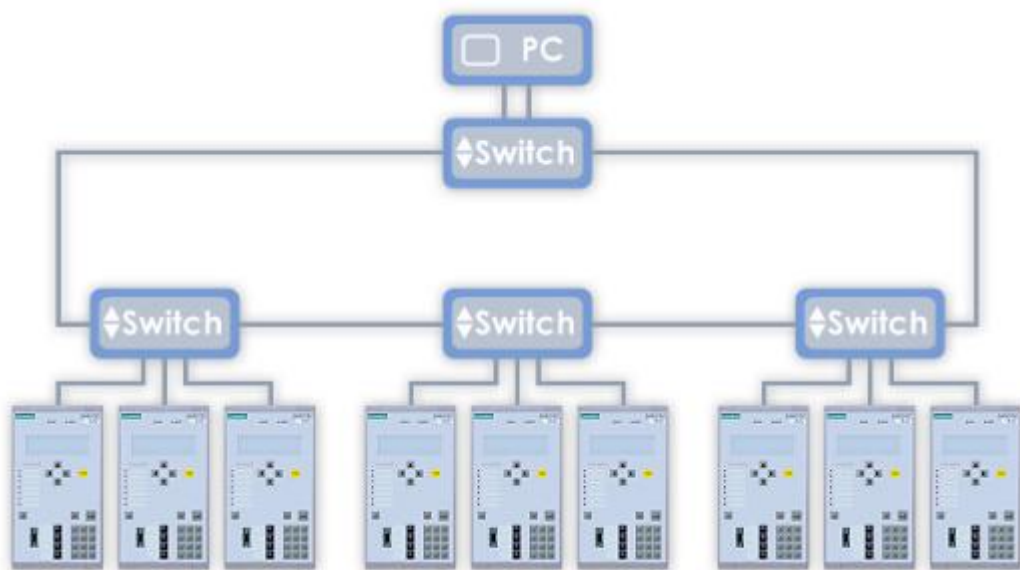


Figura 7 Combinação de Anel com diversas estrelas

A Figura 7 é uma das arquiteturas mais utilizadas, sendo que diversos dispositivos em estrela são conectados a comutadores arranjados em anel. É uma solução que não preza muito pela redundância entre comunicação, porém é uma solução com custo tolerável.

Outra possibilidade, adicionando uma maior redundância à configuração é oferecida na configuração da Figura 8, onde dois anéis independentes são conectados a dois comutadores, uma linha dupla interconecta os comutadores e, além disso, o PC possui redundância.

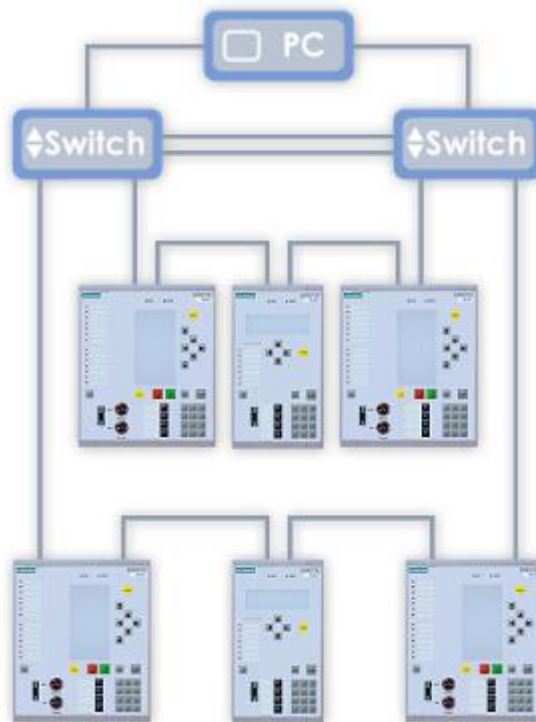


Figura 8 Combinação com o uso de dois anéis

A expansão dessa configuração é limitada pelo limite de dispositivos em cada anel, porém o número de anéis pode ser expansível, de acordo com o número de portas dos comutadores. Uma terceira alternativa com linhas duplas é mostrada na Figura 9, onde cada anel acaba utilizando dois comutadores para si.

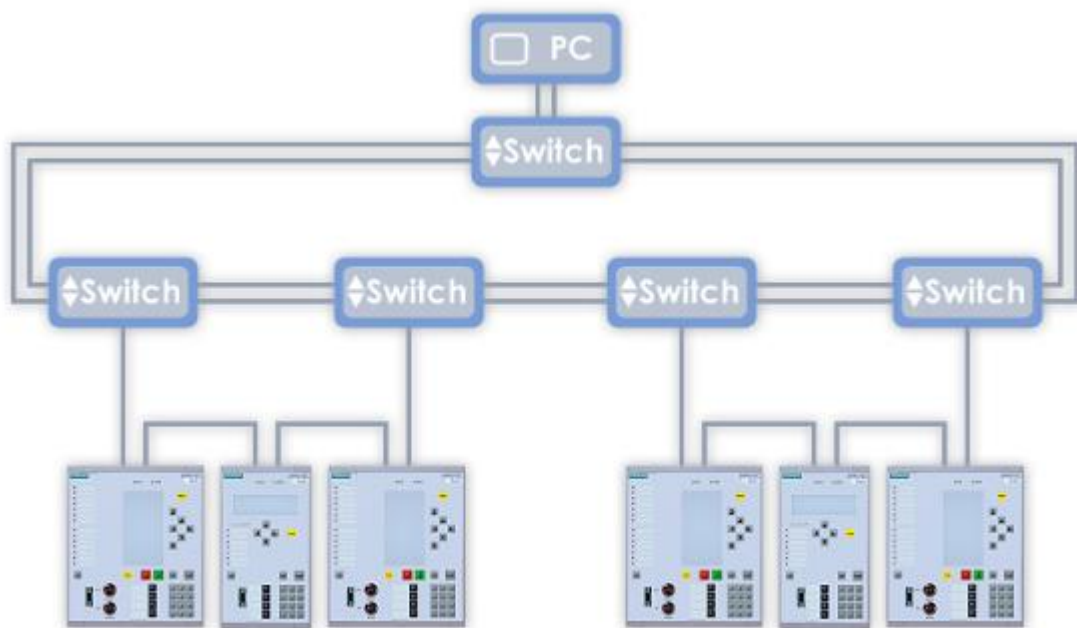


Figura 9 Combinação com anel duplo

Nessa combinação, permanece a limitação de dispositivos entre cada anel de relés, porém o número máximo de anéis é aumentado.

2.2 REDES SEM FIO

Nessa seção são apresentados os requisitos para que uma rede sem fio seja considerada adequada bem como apresentado os principais padrões industriais.

2.2.1 Requisitos

Uma das grandes vantagens do uso de sistemas de RF é a supressão de cabeamentos, podendo proporcionar uma redução de custos de instalação (dutos, cabos, estruturas, suportes, instalação e etc.) e uma maior mobilidade aos dispositivos (reposicionamento, escalabilidade e etc.). A principal desvantagem se dá em relação à susceptibilidade aos fenômenos de ondas eletromagnéticas (OEM) que podem interferir nos enlaces produzindo reflexões, difrações, desvanecimentos, bloqueios ou interferências. Além disso, há o

problema de coexistência com equipamentos de RF que possam fazer parte da planta, em especial quando é utilizada a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Dessa forma, os dispositivos que empregam RF como meio de comunicação devem ser tolerantes a estas dificuldades e proporcionar altos níveis de disponibilidade. A fim de alcançar confiabilidades tão altas quanto para redes cabeadas, diversas técnicas tais como diversidade de caminhos, frequência, tempo, codificação, etc. podem ser empregadas (JONSSON; KUNERT, 2009), (DOHERTY, TEASDALE, 2006).

Outra preocupação frequente é com relação à segurança de meios de comunicação sem fio devido à facilidade de interceptar um sinal nesse meio, ao contrário de meios que utilizem cabos ou fibras óticas, onde a conexão física é necessária. De forma a proteger os dados contra ataques e também manter a integridade das mensagens, algoritmos de encriptação são empregados, tais como chaves múltiplas em conjunto com contadores que não se repetem. Além disso, o espalhamento espectral dificulta ataques à rede. O acesso múltiplo pode ser dado via diversas técnicas tais como as divisões de frequência (*frequency division multiple access* - FDMA), tempo (*time division multiple access* - TDMA) ou por código (*code division multiple access* - CDMA).

As técnicas TDMA, que empregam tempos determinados para a comunicação de dados, juntamente com um correto escalonamento dos *slots* de tempo, e retransmissões em casos de falha, podem garantir o determinismo da comunicação. Já técnicas como a CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance*), que utilizam probabilidade de acesso, não garantem determinismo, pois ocorrem colisões que aumentam conforme o aumento da densidade da rede.

Além das técnicas de acesso ao meio, as topologias de rede (estrela, árvore, malha), o emprego de concentradores de rede (globais ou locais) e as faixas de RF escolhidas para o

ambiente influenciam na confiabilidade geral da rede. Portanto, devem-se analisar todos os requisitos para que um protocolo sem fio seja empregado numa determinada aplicação.

2.2.2 Padrões

A maioria dos protocolos sem fio utilizados em comunicações industriais fazem uso das normas IEEE 802.X ou são derivados delas.

O padrão IEEE 802.11, também conhecido como WLAN, provê altas taxas de transferência de dados em uma comunicação contínua. Esse padrão é popularmente empregado em instalações domésticas e comerciais. Ele possui quatro variações que são mais utilizadas:

- IEEE 802.11 *a* com operação na frequência de 5 GHz e taxas não efetivas de comunicação de 54 Mbps.
- IEEE 802.11 *b* com operação na banda ISM de 2.4 GHz e taxas não efetivas de até 11 Mbps.
- IEEE 802.11 *g* que também utiliza a banda ISM de 2.4 GHz e possui taxas máximas não efetivas de 54 Mbps.
- IEEE 802.11 *n* que pode operar tanto na banda ISM de 2.4 GHz como na de 5 GHz, possui taxas máximas de até 600 Mbps.

Porém com relação a aplicações industriais os protocolos derivados da IEEE 802.11 apresentam alguns problemas, como não permitir o desenvolvimento de dispositivos de baixo consumo, utilizar a técnica CSMA-CA que não garante determinismo devido às colisões, não possibilitar diversidades de caminhos, pois a topologia que forma essas redes é estrela e não malha. Algumas emendas da norma como a IEEE 802.11 *s* e IEEE 802.11 *e* que incluem, respectivamente, topologias em malha e melhoramentos na subcamada MAC, buscam tornar

a 802.11 promissora para aplicações industriais, porém ainda há poucos equipamentos disponíveis no mercado com essa variação (MÜLLER, 2012).

O padrão IEEE 802.15.1, também conhecido como Bluetooth, é um protocolo de comunicação sem fio para troca de mensagens em curtas distâncias com um baixo consumo se comparado às tecnologias do padrão 802.11. Sua utilização foi concebida para o uso pessoal e de escritório como uma alternativa ao uso de cabos RS-232. Utiliza a faixa de 2,4 GHz e uma técnica de espalhamento espectral com saltos de frequência entre 79 canais de 1 MHz de largura de banda. Os saltos são a uma taxa de 1600 saltos por segundos e são realizados de forma pseudo-aleatória através de algoritmos combinacionais recursivos. A topologia de comunicação empregada é do tipo estrela (rede *piconet*), onde um coordenador da rede é responsável por descobrir os outros dispositivos da rede. A comunicação entre os dispositivos se dá na forma mestre/escravo, onde o mestre controla as transmissões do escravo, e cada mestre pode se comunicar com até sete escravos.

Do ponto de vista de aplicações industriais alguns problemas limitam o uso do protocolo Bluetooth como o curto alcance, as topologias de rede não apresentarem redundância (no caso de perda de um mestre se perde a comunicação), o consumo de energia por bit elevado se comparado com outros protocolos industriais, a não garantia do determinismo, pois as técnicas de escalonamento não foram desenvolvidas para aplicações industriais.

Já outro padrão sem fio é o IEEE 802.15.4, que foi desenvolvido com objetivo de criar sistemas sem fio de baixo custo e consumo, além de ter baixas taxas de comunicação. A faixa de frequência empregada é de 2,4 GHz e a taxa máxima de dados é de 250 kbps em um único canal. Porém, tal padrão não consegue prover determinismo na sua forma original, pois utiliza o mecanismo CSMA-CA na camada de acesso ao meio. Tal padrão serve de base para uma série de outros protocolos, os quais o estendem nas camadas superiores.

O ZigBee estende o padrão 802.15.4 e adiciona roteamento e funcionalidades de rede, porém utiliza o CSMA-CA para acesso ao meio, o que não garante determinismo.

Já o protocolo WH, também utiliza como padrão o 802.15.4, porém, na camada MAC a arbitragem do barramento de dados é feita por mecanismo TDMA, onde *slots* de tempo são organizados em *superframes* garantindo determinismo, uma vez que as comunicações ocorrem em tempos determinados assim como retransmissões que venham a ser necessárias. O padrão WH será utilizado neste trabalho e em função disto será apresentado com um maior detalhamento na seção 2.4.

Outro protocolo adequado para o uso industrial assim como o WH é o ISA 100.11a. Ambos são muito semelhantes no que diz respeito aos parâmetros fundamentais de comunicação sem fio, porém o ISA 100.11a apresenta uma complexidade maior no seu desenvolvimento e definições, sendo superior em alguns aspectos ao WH. Porém o ISA 100.11a teve seu padrão aceito posteriormente ao WH, o que ocasionou uma demora maior para que os dispositivos que implementam esse protocolo entrassem no mercado, dando uma vantagem de mercado e exploração científica maior ao WH.

Por fim o WIA-PA, que é o padrão chinês para comunicações sem fio, também é baseado no 802.15.4 e implementa as camadas de rede e aplicação. Apresenta como pontos negativos o uso do CSMA-CA como forma acesso ao meio.

2.3 A NORMA IEC 61850

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos e aplicações da norma IEC 61850 de forma a se ter um entendimento maior sobre ela.

2.3.1 Automação de Subestações

Com o crescimento da complexidade dos sistemas de automação de subestações, os protocolos, que antes se preocupavam apenas com a parte de comunicação, foram ficando

cada vez mais difíceis de integrar entre os diversos dispositivos de diferentes fabricantes. De forma a resolver as dificuldades de integração já existentes, tornar os protocolos menos dependentes de domínio, se preocupar a fundo com a semântica dos dados trocados entre dispositivos e estabelecer a codificação das informações de alto nível se baseando num modelo de dados, teve o advento a norma IEC 61850.

Uma das premissas da norma é a interoperabilidade, que é a habilidade dos dispositivos de diferentes fabricantes se comunicarem para trocar informações e utilizá-las para suas funcionalidades específicas. Outra premissa é possuir configuração livre, que nada mais é que permitir liberdade na alocação de funções de forma que um IED possa realizar várias funções ou mesmo uma função ser realizada por vários IEDs. Por fim, possuir estabilidade ao longo prazo, que faz com que a norma possa sofrer atualizações e possibilite a continuidade e expansão dela conforme os avanços das tecnologias.

Com o uso de diferentes protocolos, fazia-se necessário o uso de uma interface para interligar os equipamentos e fazer a conversão das informações trocadas entre os mesmos. Sendo assim, a norma padroniza toda a comunicação, não sendo mais necessário um conversor. A tecnologia padrão empregada na norma é o uso de redes Ethernet. Para entender como funciona essa padronização, pode-se separar uma subestação em dois tipos de barramento de comunicação, o barramento de estação ou "station bus" e o barramento de processo ou "process bus", que são mostrados na Figura 10.

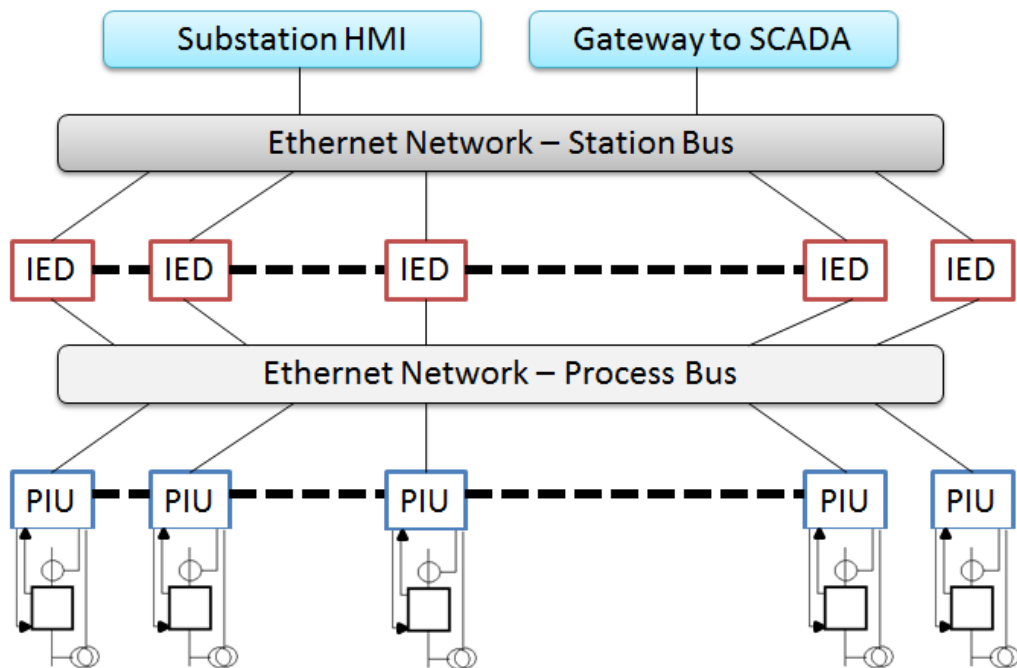


Figura 10 Barramentos da IEC 61850

O barramento de estação conecta todos os IEDs e outros dispositivos como IHMs, UTRs e UCSs que funcionam como *gateway* para um sistema SCADA e faz a troca de mensagens de eventos e informações compartilhadas entre eles. Porém, há outro barramento que é o de processo onde os IEDs são conectados aos tradicionais dispositivos de pátio (seccionadoras, disjuntores, sensores, etc.) ou *Process Interface Units* (PIU) que são unidades empregadas para processar os dados dos sensores e/ou executar ações nos dispositivos de uma subestação. Usualmente uma subestação possui apenas um barramento de estação, porém pode possuir diversos barramentos de processos.

2.3.2 A Estrutura da IEC 61850

A primeira versão da norma consistia em um pacote de documentos com mais de 1400 páginas. Esses documentos eram divididos em 10 partes como mostrado na Figura 11.

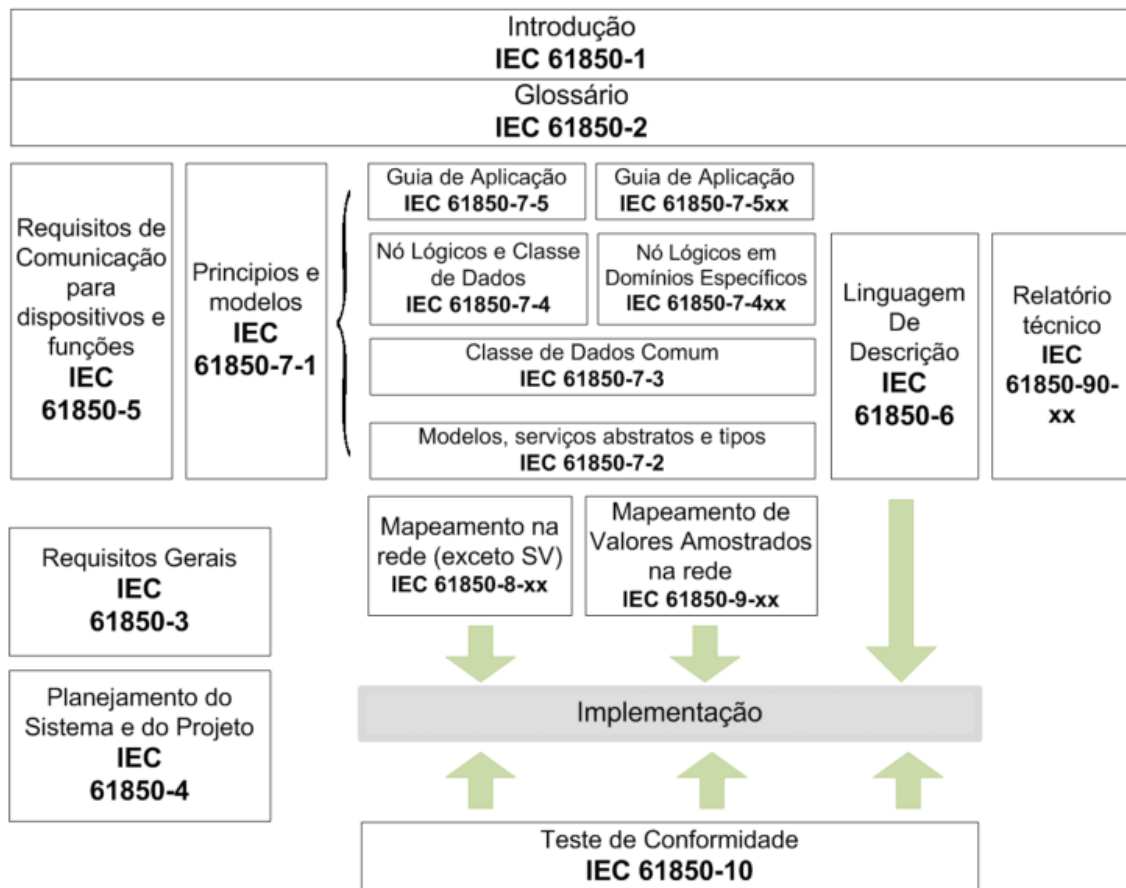


Figura 11 Relação entre a modelagem e o mapeamento das partes da norma IEC 61850 (YONA, 2012)

As partes 1 e 3 apresentam uma visão geral da norma. A parte 4 define os requisitos para gerenciamento do sistema e do projeto de uma subestação que queira se enquadrar na IEC 61850. As especificações desta parte referem-se ao processo de engenharia e suas ferramentas de apoio, o ciclo de vida de todo o sistema e por final a garantia de qualidade. Já na parte 5, são especificados os parâmetros físicos necessários para implementação. Na parte 6 é definida uma linguagem para as configurações dos IEDs baseada em XML, apresentando também uma visão na forma dos conceitos da norma. Na parte 7 são elaborados os conceitos lógicos, os quais são posteriormente divididos em subpartes onde são definidos princípios, modelos, classes, nós lógicos, serviços abstratos de comunicação e etc. Na parte 8 se detalha o mapeamento dos objetos internos da camada de apresentação para a camada de enlace

Ethernet. Já a parte 9 define os mapeamentos de valores de medição amostrados para Ethernet ponto a ponto. Na parte 10 são estabelecidos testes de conformidade para os diversos fabricantes poderem implementar seus dispositivos.

Além disso, a norma tem outras partes, visto que, após a primeira versão ela continuou em revisão e expansão, onde foram disponibilizados, por exemplo, na parte 90, relatórios técnicos que entre outras coisas visam definir novos nós lógicos. Outras expansões para a área de geração hidrelétrica e de recursos distribuídos de energia foram definidas na parte 7-420.

2.3.3 Modelagem de Dados

A modelagem dos dados na norma IEC 61850 tem uma grande importância e um papel fundamental na interoperabilidade dos dispositivos. A norma se baseia numa modelagem orientada a objetos, de forma hierárquica e com atributos e métodos definidos para cada objeto de uma classe. Tal hierarquia pode ser visualizada na Figura 12.

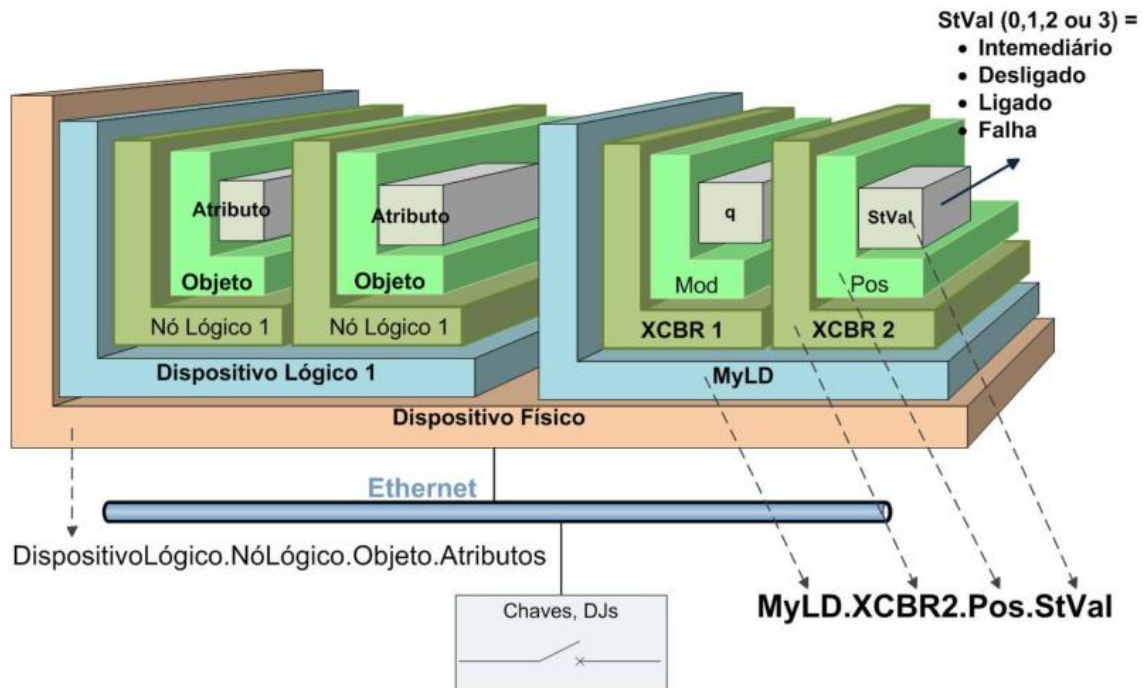


Figura 12 Hierarquia e modelo de dados (YONA; 2012)

O dispositivo físico é o componente base nessa hierarquia e é definido como um dispositivo que se conecta a uma rede. Teoricamente um IED pode possuir um ou mais dispositivos físicos. Cada dispositivo físico pode possuir um ou mais dispositivos lógicos, o qual congrega um conjunto de nós lógicos. O nó lógico é o elemento núcleo do modelo de dados e representa uma função suportada por um IED. Os nós lógicos interagem entre si trocando diversas informações necessárias para automação e proteção de uma subestação. Cada nó lógico contém um ou mais objetos, que são compostos por atributos. O objeto de um nó lógico representa um dado de uma função de automação e controle. Por exemplo, um objeto seria a posição (Pos) de uma chave seccionadora ou de um disjuntor (XCBR). O atributo é o valor de um objeto, como o estado (StVal) fechado ou aberto da posição de um disjuntor. Assim, a norma disponibiliza uma visão hierarquizada para classificar as funções exercidas por cada IED. De forma a visualizar melhor todas as informações presentes em um

Nó lógico da classe Disjuntor (XCBR) a Tabela 1 contém os dados da classe XCBR da norma.

Tabela 1 Exemplo de nó Lógico (IEC 61850-7-4, 2003)

XCBR class				
Attribute Name	Attr. Type	Explanation	T	M/O
LNName		Shall be inherited from Logical-Node Class (see IEC 61850-7-2)		
Data				
<i>Common Logical Node Information</i>				
		LN shall inherit all Mandatory Data from Common Logical Node Class		M
Loc	SPS	Local operation (local means without substation automation communication, hardwired direct control)		M
EEHealth	INS	External equipment health		O
EEName	DPL	External equipment name plate		O
OpCnt	INS	Operation counter		M
<i>Controls</i>				
Pos	DPC	Switch position		M
BlkOpn	SPC	Block opening		M
BlkCls	SPC	Block closing		M
ChaMotEna	SPC	Charger motor enabled		O
<i>Metered Values</i>				
SumSwARs	BCR	Sum of Switched Amperes, resetable		O
<i>Status Information</i>				
CBOpCap	INS	Circuit breaker operating capability		M
POWCap	INS	Point On Wave switching capability		O
MaxOpCap	INS	Circuit breaker operating capability when fully charged		O

M = mandatory, O = optional

Conforme pode ser observado na Tabela 1, os objetos possuem uma série de atributos obrigatórios (M) e alguns opcionais (O). Além disso, a segunda coluna corresponde aos tipos de dados, os quais podem variar conforme as necessidades dos atributos. No caso da classe XCBR o atributo *Pos* é do tipo DPC (*Controllabel Double Point*). Na Tabela 2 são apresentados os dados que formam esse atributo.

Tabela 2 Exemplo de Classe de Dados do tipo DPC (IEC 61850-7-3, 2003)

DPC class					
Attribute Name	Attribute Type	FC	TrgOp	Value / Value Range	M/O/C
DataName	Inherited from Data Class (see IEC 61850-7-2)				
DataAttribute					
<i>control and status</i>					
ctlVal	BOOLEAN	CO		off (FALSE) on (TRUE)	AC_CO_M
operTim	TimeStamp	CO			AC_CO_O
origin	Originator	CO, ST			AC_CO_O
ctlNum	INT8U	CO, ST		0..255	AC_CO_O
stVal	CODED ENUM	ST	dchg	intermediate-state off on bad-state	M
q	Quality	ST	qchg		M
t	TimeStamp	ST			M
stSeld	BOOLEAN	ST	dchg		AC_CO_O
<i>substitution</i>					
subEna	BOOLEAN	SV			PICS_SUBST
subVal	CODED ENUM	SV		intermediate-state off on bad-state	PICS_SUBST
subQ	Quality	SV			PICS_SUBST
subID	VISIBLE STRING64	SV			PICS_SUBST
<i>configuration, description and extension</i>					
pulseConfig	PulseConfig	CF			AC_CO_O
ctlModel	ENUMERATED	CF		status-only direct-with-normal-security sbo-with-normal-security direct-with-enhanced-security sbo-with-enhanced-security	M
sboTimeout	INT32U	CF			AC_CO_O
sboClass	ENUMERATED	CF		operate-once operate-many	AC_CO_O
d	VISIBLE STRING255	DC		Text	O
dataNs	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLN_M
cdcNs	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLND_M
tag	Tag	AX			O
Services					
As defined in Error! Reference source not found.					

M = mandatory, O = optional
 xC_... = conditional

Dados como o já citado *stVal* aparecem nessa tabela. Além disso, alguns campos dependem das condições de controle para se tornarem obrigatórios ou opcionais.

2.3.4 Princípios de Comunicação

De forma a trocar os dados modelados nos nós lógicos, uma série de protocolos que utilizam como base o protocolo Ethernet são recomendados para a comunicação entre dispositivos conforme apresentado na Figura 13.

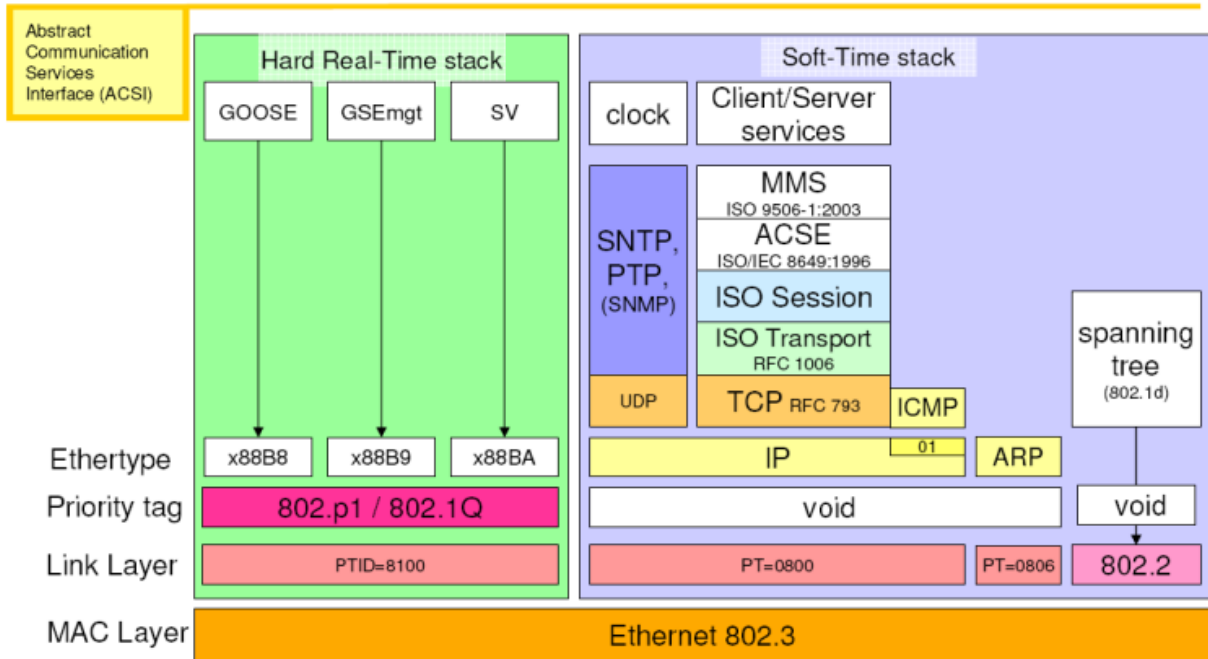


Figura 13 Protocolos da Norma IEC 61850 (BRAND; 2006).

As mensagens que possuem restrições temporais severas (*Hard Real Time stack*) são mapeadas diretamente na camada de enlace. Nesse grupo estão as mensagens *Sampled Values* (SV), *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Generic Substation Status Event* (GSSE). Já as demais mensagens, que não possuem restrições temporais (*Soft Time Stack*) acabam utilizando mais camadas do modelo OSI. Nesse modelo, encontram-se as mensagens *TimeSync* e *Manufacturing Message Specification* (MMS), além de mensagens utilizadas pelos comutadores da rede como *Address Resolution Protocol* (ARP), *Internet Control Message Protocol* (ICMP) e *Spanning Tree* (STP).

De certa forma, as mensagens mais importantes são as mensagens GOOSE, visto que elas visam substituir o cabeamento necessário entre os relés no barramento da estação. Na mensagem GOOSE, os dados (estados, valores, etc.) são agrupados em um conjunto de dados (ou *data set*) e transmitidos num mecanismo de *Publisher/Subscriber* em que todas as mensagens são enviadas no barramento em *multicast* (*Publisher*) e apenas aqueles dispositivos que necessitam daquela informação (*Subscriber*) a utilizam. Além disso, para

separar virtualmente as redes entre os dispositivos um mecanismo de *Virtual Lan* (VLAN) é utilizado. Outro mecanismo, que serve para dar maior prioridade a algumas mensagens com maiores requisitos temporais é o uso de etiquetas de prioridade (IEEE 802.1Q).

Como as mensagens GOOSE são mapeadas na camada de enlace para diminuir os atrasos, alguns requisitos de confiabilidade são prejudicados, tais como o estabelecimento de uma conexão e a confirmação de recepção dos dados. Para suprimir esse problema, um mecanismo de retransmissão é empregado. Por exemplo, em caso de um evento de mudança de estado de uma variável, a mensagem GOOSE é retransmitida com um intervalo de tempo que varia e vai crescendo até que um novo evento ocorra, reiniciando o processo, ou se alcance o limite máximo de retransmissões. Um exemplo típico empregado pelos fabricantes é o envio da primeira retransmissão 1ms após o primeiro envio, e os demais envios tem seu tempo dobrado (2ms, 4ms,...) até se chegar num valor limite de 1s, que é o tempo de envio esporádico das mensagens para que se mantenham válidos os dados entre os dispositivos.

As mensagens SV (*Sampled Values*) ou SMV (*Sampled Measure Values*) são utilizadas para envio de medições como de transformadores de potência e corrente para os relés. São, dessa forma, séries contínuas de dados sincronizados, sendo tais dados oriundos da saída de transdutores digitalizados e transformadores de instrumento. Essas mensagens devem ser transmitidas tão rápido quanto o tempo de reação necessário pelos equipamentos de acordo com sua função (proteção, controle ou medição). Nas mensagens SMV não há repetição de envio como ocorre no GOOSE.

As mensagens GSSE foram concebidas para apenas trocar estados e são semelhantes às mensagens GOOSE, apenas diferindo por utilizar uma série de bits ao invés de um conjunto de dados (*data set*) para troca de informações. Atualmente essas mensagens GSSE estão sendo suprimidas pelas mensagens GOOSE em aplicações, podendo desaparecer em futuras revisões da norma.

Já as mensagens MMS, que utilizam um mecanismo cliente-servidor, contêm as mesmas informações que as mensagens GOOSE, GSSE e SMV, porém são enviadas usando o stack TCP/IP e seguem o mapeamento definido pela *Specific Communication Service Mapping* (SCSM), definido na parte 8 da norma. Em geral, a MMS atende os sistemas de aquisição de dados de um sistema de supervisão, como, por exemplo, o sistema o SCADA ou outros sistemas que não necessitem de requisitos de tempo.

As demais mensagens, como as mensagens SNTP e PTP (IEEE 1588) são responsáveis pelos ajustes globais de tempo nos dispositivos da rede. As mensagens ARP são aplicadas para identificação do endereço de rede e a ICMP para testar a comunicação entre os dispositivos. Por fim as mensagens STP são usadas para reconfiguração dos comutadores na rede, e podem ser substituídas por outras como *Rapid Spanning Tree* (RSTP), *High Availability Seamless Redundancy* (HSR) ou *Parallel Redundancy Protocol* (PRP) que visam dar uma maior confiabilidade à rede Ethernet e diminuir a susceptibilidade a falhas de um link de dados, sendo empregadas principalmente em topologias do tipo anel.

A fim de facilitar a compreensão sobre a estruturação dos pacotes GOOSE e SMV, a Figura14 apresenta os campos utilizados em tais mensagens.

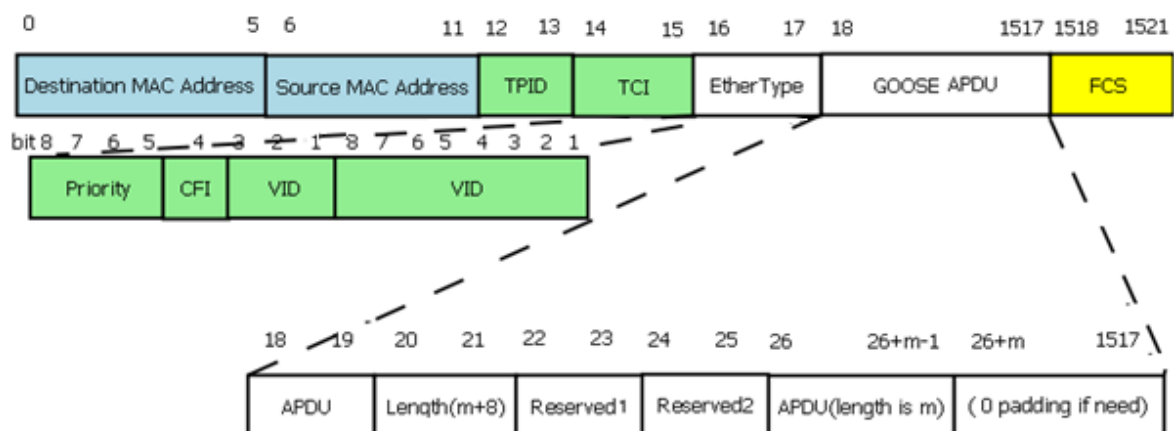


Figura 14 Pacote GOOSE

Ambos pacotes GOOSE e SMV seguem o formato descrito na Figura 14. Os *Application Protocol Data Units* (APDU) contêm a informação final de cada objeto ou grupo de objetos modelados de uma subestação, conforme previsto pela norma. O tamanho de cada APDU é variável conforme a classe e tipo do objeto da subestação, bem como a função que deve exercer. Já o tamanho do pacote GOOSE depende da configuração dos *data sets* estabelecida e da quantidade de APDUs que compõe a mensagem. Como os objetos utilizam o alfabeto alfanumérico (*strings*) para identificação, esses APDUs tem um tamanho mínimo relativamente grande de informação, da ordem de 100bytes. Outros campos que estão na figura são o *Tag Protocol Identifier* (TPID), que é colocado no mesmo local do EtherType, e tem o valor 0x8100 para identificar que o pacote é de VLAN, o *Tag Control Information* (TCI) que contém as informações sobre a prioridade do usuário, o formato canônico de indicação (CFI - *Canonical Format Indicator*) e o identificador de VLAN (VID).

Para as mensagens SMV, ainda temos os ASDUs (*Application Service Data Units*), que compõe um APDU e variam de acordo com as taxas de amostragem empregadas para os transdutores. A Figura 15 mostra como seria o formato do APDU composto de diversos ASDUs.

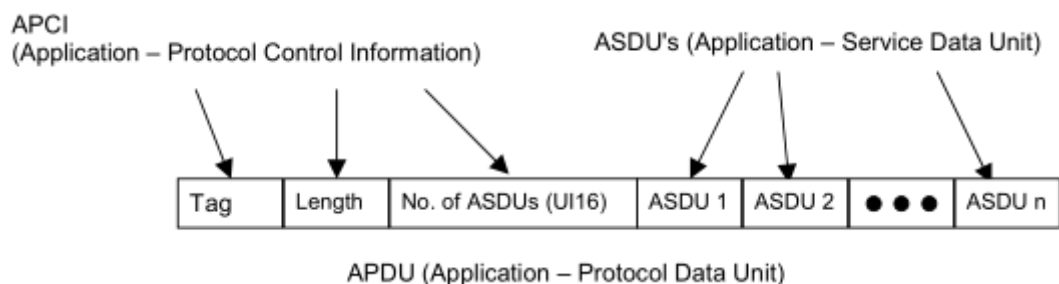


Figura 15 Concatenação de vários ASDUs em um frame (IEC 61850-9-2; 2004)

2.3.5 Requisitos Temporais

Uma das premissas da automação de subestações é o tempo crítico de comunicação entre dispositivos. Na norma IEC 61850, tais tempos variam de acordo com a aplicação e função. Para isso a Tabela 3 mostra essa divisão de tipos de mensagens.

Tabela 3 Tipos de mensagens Suportadas pela norma IEC 61850

Tipo	Classe	Exemplo	Mensagem
1A	Mensagens Rápidas	<i>Trips</i>	GOOSE
1B	Mensagens Rápidas (outras)	Comandos, Mensagens Simples	GOOSE
2	Velocidade Média	Valores de Medidas	MMS
3	Velocidade Baixa	Parâmetros	MMS
4	Rajada de Dados (<i>Raw</i>)	Saída de dados dos instrumentos (transformadores)	SV
5	Transferência de Arquivos	Arquivos grandes	MMS
6A	Sincronização de Tempo A	Sincronização de tempo (<i>station bus</i>)	TimeSync
6B	Sincronização de Tempo A	Sincronização de tempo (<i>process bus</i>)	TimeSync
7	Mensagem de Comando	Comandos da estação HMI	MMS

Além dos tipos definidos na tabela, cada mensagem é subdividida em prioridades conforme o tipo de aplicação utilizado:

- P1- Bay de distribuição. Baixas exigências
- P2- Bay de transmissão.
- P3- Bay de transmissão, com sincronismo e disjuntor diferencial.

De acordo com as informações dos tipos e das prioridades, pode-se então definir os requisitos temporais com relação à latência máxima aceita:

- Tipo 1A-Trip: 3ms para P2/P3. 10ms para P1.
- Tipo 1B-Outros: 20ms para P2/P3. 100ms para P1.
- Tipo 2: 100ms
- Tipo 3: 500ms
- Tipo 4: 3ms para P2/P3. 10ms para P1.
- Tipo 5: 1000ms

- Tipo 6A/6B: sem requisitos, somente de precisão.
- Tipo 7: 500ms(mesmo do tipo 3).

Conforme os tempos acima, em ambiente de subestação, as exigências temporais mais críticas para mensagens GOOSE são da ordem de 3 a 10ms.

Para as mensagens do Tipo 4, que são do tipo SMV, as taxas de amostragem variam conforme o tipo de aplicação. As Tabelas 4 e 5 demonstram tais taxas.

Tabela 4 Taxa de amostragem para mensagens de proteção e controle (IEC 61850-5, 2003)

Data type	Class	Transmission time (ms) defined by trip time	Resolution (Bits) Amplitude	Rate (Samples/s) Frequency
Voltage	P1	10,0	13	480
Current			13	
Voltage	P2	3,0	16	960
Current			16	
Voltage	P3	3,0	16	1 920
Current			18	

Tabela 5 Taxa de amostragem para mensagens de medição (IEC 61850-5, 2003)

Data type	Class	Accuracy classes and harmonics	Resolution (Bits) Amplitude	Rate (Samples/s) Frequency
Voltage	M1	Class 0.5 (IEC 62053-22) Class 0.2 (IEC 60044-8) Up to 5 th harmonic	12	1 500
Current			14	
Voltage	M2	Class 0.2 (IEC 62053-22) Class 0.1 (IEC 60044-8) Up to 13 th harmonic	14	4 000
Current			16	
Voltage	M3	Class 0.1 (not defined by IEC) Up to 40 th harmonic	16	12 000
Current			18	

Os tipos M1 e M2 referem-se à medição de receita, variando apenas as classes de precisão, sendo a M2 maior. Já a M3 refere-se à medição de qualidade.

Conforme aumentam as taxas de amostragem, uma banda maior é necessária para trafegar os dados. Um telegrama SMV de um *data set* universal que é definido na IEC 61850-9-1 tem o tamanho máximo de 111 bytes:

- 26 Bytes cabeçalho Ethernet
- 4 Bytes de etiqueta de prioridade
- 8 Bytes do Ethertype
- 2 Bytes do ASN.1 tag/length
- 2 Byte do número de blocos
- 46 Bytes para medidas analógicas
- 23 Bytes para indicação de estados digitais

Considerando o espaço entre frames (*Inter-frame Gap* de 96 Bits para redes Fast Ethernet) e o tamanho de 111 bytes, o total de 984 Bits é obtido. Por exemplo, uma taxa de amostragem de 480 amostras/s multiplicado por 984 Bits, teríamos teoricamente uma largura banda mínima necessária de 461,25 kbps. Vale lembrar na IEC 61850-9-2 são definidos outros tipos de *data sets* com diferentes tamanhos, porém o tamanho mínimo de um APDU encapsulado em um frame Ethernet aceito pela norma é de 46 bytes, sendo que se o tamanho definido for inferior a esse, os bytes restantes são completados com zeros (KONKA, 2011). Sendo assim o menor tamanho de um pacote SMV será de 84 bytes. Com o menor tamanho de pacote SMV, teríamos teoricamente uma largura de banda mínima necessária de 360kbps.

2.3.6 Metodologias de Configuração

A Linguagem de Configuração de Subestações (SCL) é especificada pela norma IEC 61850 com base na eXtensible Markup Language (XML). A SCL é utilizada para descrever os dispositivos da subestação, a rede de comunicações, as instâncias de nós lógicos e as suas associações aos equipamentos.

A SCL emprega uma hierarquia de arquivos de configuração que proporciona o uso de arquivos XML de forma ampla e padronizada em vários níveis do sistema. Um dos principais

objetivos do formato da SCL é a uniformização da nomenclatura utilizada através de um modelo único de descrição de dados, criando um vocabulário comum.

Os arquivos SCL, mostrados na Figura 16, incluem especificações do sistema, tais como: descrição do sistema (SSD), descrição das capacidades do IED (ICD), configuração da subestação (SCD) e configuração do IED (CID). Todos estes arquivos são construídos mediante os mesmos métodos e formatos, porém, dependendo da necessidade, possuem diferentes escopos.

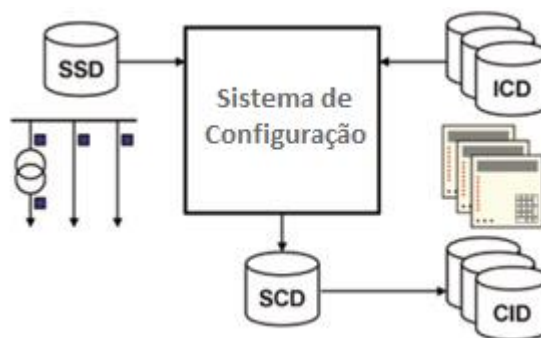


Figura 16 Utilização dos diferentes tipos de arquivo SCL (SCHOSSIG, 2010)

Nota-se que os arquivos SSD e ICD servem de base para configuração do sistema, gerando como resultado o arquivo SCD, o qual possui informação sobre todos IEDs da subestação.

2.4 O PADRÃO WH

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos fundamentais do protocolo WH com foco no trabalho a ser apresentado. É dada uma visão geral do protocolo, sem ter uma abordagem exaustiva, uma vez que o mesmo foi tema de diversos trabalhos em nível de mestrado e doutorado no Grupo de Controle, Automação e Robótica (GCAR) da UFRGS. Sendo assim, para se obter mais informações sobre o WH pode-se consultar a norma ou artigos que foram publicados pelo GCAR em congressos, jornais e periódicos.

2.4.1 Protocolo WH

O protocolo WH foi desenvolvido com o objetivo de estabelecer um padrão de comunicação sem fio para uso em aplicações industriais (SONG et al., 2008) (CHEN;NIXON;MOK, 2010). O WH foi o primeiro padrão a ser certificado para aplicações em comunicações industriais. Ele foi introduzido na versão 7 do protocolo HART e permite a compatibilidade com sistemas legados, suportando aplicações de ciclos da ordem de 250ms. Tal compatibilidade é definida pela estrutura de comandos DDL (*device description language*) para descrever os dispositivos.

A rede WH é uma rede que se corrige automaticamente, apresentando características como salto de canais para cada transmissão e diferentes mecanismos de roteamento, a fim de aumentar a confiabilidade. Esses recursos permitem a segurança, a confiabilidade e o determinismo, mesmo em ambientes agressivos. A Figura 17 mostra uma típica rede WH com os seus componentes fundamentais. O *Network Manager* (NM), *Security Manager* (SM) e o ponto de acesso são obrigatórios e geralmente residem em apenas um dispositivo. Os componentes WH são aqui descritos:

- Os dispositivos de campo (“field devices”) executam funções básicas de sensoriamento e atuação na planta. Cada dispositivo de campo é também um roteador, encaminhando mensagens a partir de outros dispositivos de campo em direção ao *gateway*;
- Adaptadores (“adapters”) permitem sistemas legados HART serem usados dentro de comunicações sem fio;
- Dispositivos portáteis (“handheld”) são usados para calibração, comissionamento e inspeções;
- Pontos de acesso (“access points”) que ligam os dispositivos de campo com o *gateway*;

- O gerenciador de rede (“Network Manager” ou NM) é responsável pelo escalonamento de todas as ligações entre os nós.

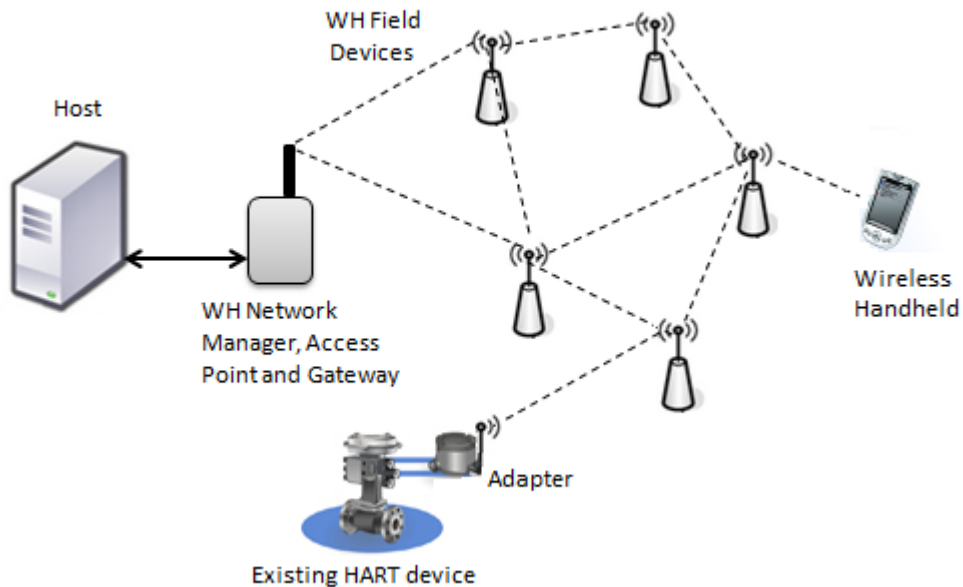


Figura 17 Típica rede WH.

2.4.2 Camadas do Protocolo

Tal como no HART o WH tem o mesmo nível de aplicação que é orientado a comandos. No nível físico o protocolo é baseado no padrão IEEE 802.15.4, operando na faixa de 2,4 GHz. Já na camada de dados, MAC e LLC, apresenta suporte a saltos de canais e TDMA. O CSMA-CA é utilizado em conexões compartilhadas (assíncronas). Por fim, nas camadas de rede e transporte apresenta topologia em malha e roteamento estático por grafos ou nas próprias mensagens. Além disso podem ser assumidas conexões em estrela com o ponto de acesso. As diferentes topologias podem ocorrer dinamicamente e são dependentes de diferentes características, tais como distâncias entre os nós, número de dispositivos, etc. As diferentes camadas do protocolo no modelo OSI podem ser visualizadas na Figura 18.

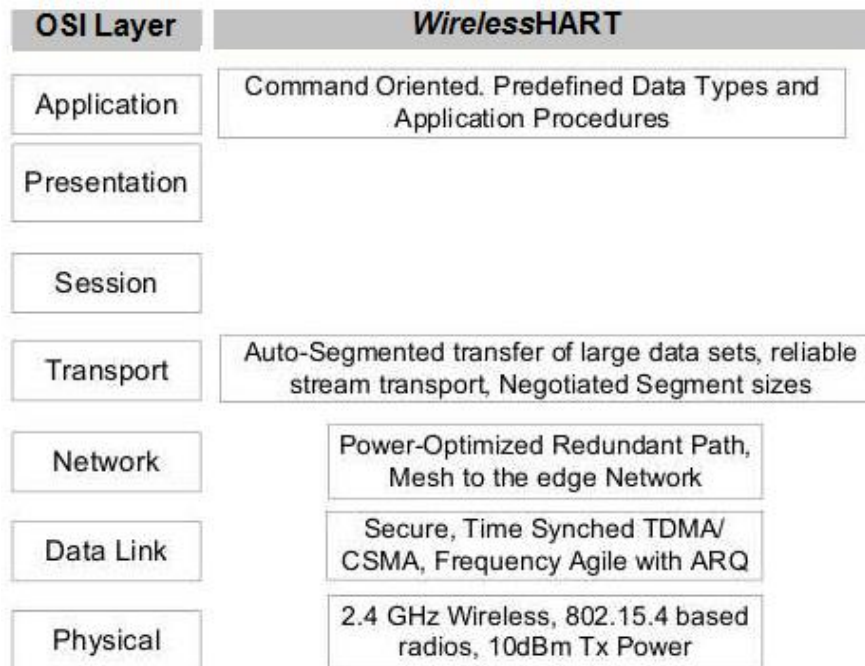


Figura 18 WH e o modelo OSI (IEC 62591, 2010).

2.4.3 Segurança

A segurança em redes WH é obtida pela encriptação das mensagens através do mecanismo de segurança AES-128, utilizando quatro chaves de criptografia simétricas. Em uma rede WH, o sistema de criptografia é obrigatório e desta forma está sempre ativo. Uma chave de acesso é utilizada para que novos nós possam agregar-se à rede e, uma vez que o novo dispositivo seja aceito pelo gerenciador da rede, as sessões de comunicação utilizarão outras chaves. Somente dispositivos conhecidos podem ingressar em uma rede WH, e para tanto, estes devem possuir a chave de entrada na rede (Join Key). Ataques de repetição também são evitados através de criptografia, com a verificação da integridade das mensagens. Estas, não são baseadas em uma chave apenas, mas em um contador único (que não se repete) e que impossibilita a replicação de mensagens reproduzidas externamente à rede (MÜLLER, 2012).

2.4.4 Roteamento

No protocolo IEEE 802.15.4, que serve de base para o WH, são definidos os tipos de dispositivo FFD (*Full Function Device*) e RFD (*reduced function devices*). Os dispositivos FFD podem ser um coordenador de rede e propiciar comunicação com outros FFDs. Já os dispositivos RFDs são sempre associados a FFDs e estão limitados à troca de dados com estes somente. Em uma rede WH todos os dispositivos são do tipo FFD, ou seja, podem formar uma rede em malha completa. Qualquer dispositivo ou nó da rede deve fornecer ou repassar pacotes a fim de realizar o roteamento das mensagens dentro da rede. A rede é por consequência formada por caminhos de comunicações múltiplos e redundantes, e devem suportar roteamento para todos os nós vizinhos. Logo, os caminhos de comunicação possíveis devem ser verificados continuamente, de modo que o estado da rede é sempre conhecido e adaptado pelo gerenciador de rede. Segundo a organização HART, a robustez de uma rede WH bem constituída é tipicamente maior que 3σ (99,73 %) (DOHERTY; TEASDALE, 2006). Cabe ressaltar que a definição de rede bem constituída é imprecisa, mas neste caso refere-se a dois parâmetros: condição de radio enlace e rotas múltiplas. Considere-se o caso em que todos os enlaces ponto a ponto são ótimos e que existe pelo menos uma rota redundante para as comunicações entre os dispositivos de campo. As transmissões são gerenciadas através de tabelas de roteamento e realizadas nos modos *broadcast*, *multicast* ou *unicast*. Cada dispositivo mantém estatísticas a respeito de seus vizinhos, tais como níveis de intensidade do sinal recebido e contagem de pacotes, sendo estas informações, constantemente encaminhadas ao gerenciador de rede. A descoberta de novos vizinhos também é reportada pelos nós da rede além de desconexões e perdas (MÜLLER, 2012).

3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

A evolução das redes sem fio em ambientes industriais, bem como a confiabilidade alcançada, desperta o interesse na possibilidade de redução ainda maior de cabeamento com o uso de uma tecnologia sem fio de comunicação entre IEDs que utilizam a norma IEC61850.

Além disso, podem-se analisar as vantagens de uma rede sem fio entre IEDs no sentido de redução de comutadores na arquitetura e na aplicação em *smart grids* nas redes de distribuição.

3.1 TRABALHOS RELACIONADOS À UTILIZAÇÃO DE REDES SEM FIO EM SUBESTAÇÕES

Alguns estudos foram feitos com diversos enfoques para a análise da viabilidade do uso de protocolos de comunicação sem fio em conjunto com a norma IEC 61850. Um dos principais trabalhos investiga o uso de *Wireless LAN* (IEEE 802.11) para subestações de distribuição (PARIKH, SIDHU, SHAMI, 2012). Em tal trabalho, foi montado um cenário de testes em laboratório, bem como testes em ambiente de subestação, onde foram feitas medições do nível de ruído e avaliado o desempenho da comunicação no que diz respeito ao atendimento dos requisitos temporais de latência entre os diversos tipos mensagens da norma IEC 61850. Como resultado foi demonstrado que nos modelos levantados para as subestações de distribuição 13,8kV e 27,6kV, com o uso de comunicação via IEEE 802.11g (54Mbps) e uma taxa de transferência de dados (*throughput*) de até 8000kbps, a latência máxima permitida de 10ms para subestações de distribuição foi alcançada.

O trabalho de (ULLO;VACCARO; VELOTTO, 2010) analisa o uso do protocolo Zigbee, sendo que 30 nós foram simulados em uma rede onde um coordenador de área e um concentrador de dados eram utilizados, sendo os 28 nós restantes representando cada um uma subestação. O concentrador de dados foi conectado a um centro de controle remoto para onde

os dados eram enviados. Foi mensurado na ferramenta QualNet a latência para nós afastados a 500m comparando diferenças na quantidade de nós, tamanho dos pacotes e períodos de transmissão. Os tempos obtidos de latência ficaram com valores entre 2s e 6s, dependendo do número de nós ativos e transmitindo dados. Além disso, um incremento de 0,6 a 1,8s foi observado, respectivamente, em casos de chuva fraca (6 mm/h) e forte (180 mm/h). Em outro trabalho envolvendo o protocolo ZigBee (FARIA, 2012), foi analisada a automação de subestações de distribuição com o uso desse protocolo para aquisição de dados não críticos. Uma arquitetura com um *gateway* e sensores com dados como posição da porta, pressão e temperatura do óleo do transformador, sensores meteorológicos foi proposta e foram testadas mensagens da norma IEC 61850 como SMV e MMS. No caso apenas as mensagens do tipo MMS atenderam os requisitos da norma IEC 61850 de tempo menor que 500ms estabelecidos. Já mensagens SMV, que requerem tempos na ordem de 10 a 100ms, não passaram nos testes.

A análise do protocolo ZigBee é uma das mais encontradas na literatura, e há análises do uso da norma IEC 61850 em conjunto com ZigBee para subestações com menos de 5 elementos no trabalho de (ELGOHARY, 2012). Os resultados obtidos mostraram que com cinco canais de comunicação com o coordenador e um tempo de desativação (tempo que o dispositivo fica desligado) inferior a 100ms é possível obter uma comunicação com latência de até 100ms conforme a norma IEC 61850.

No trabalho de (YOO; 2011) não é relacionado a comunicação sem fio, porém apresenta um estudo relacionado à conversão de dados em protocolo serial para 61850 em aplicações em *microgrids*, conforme a Figura 19.

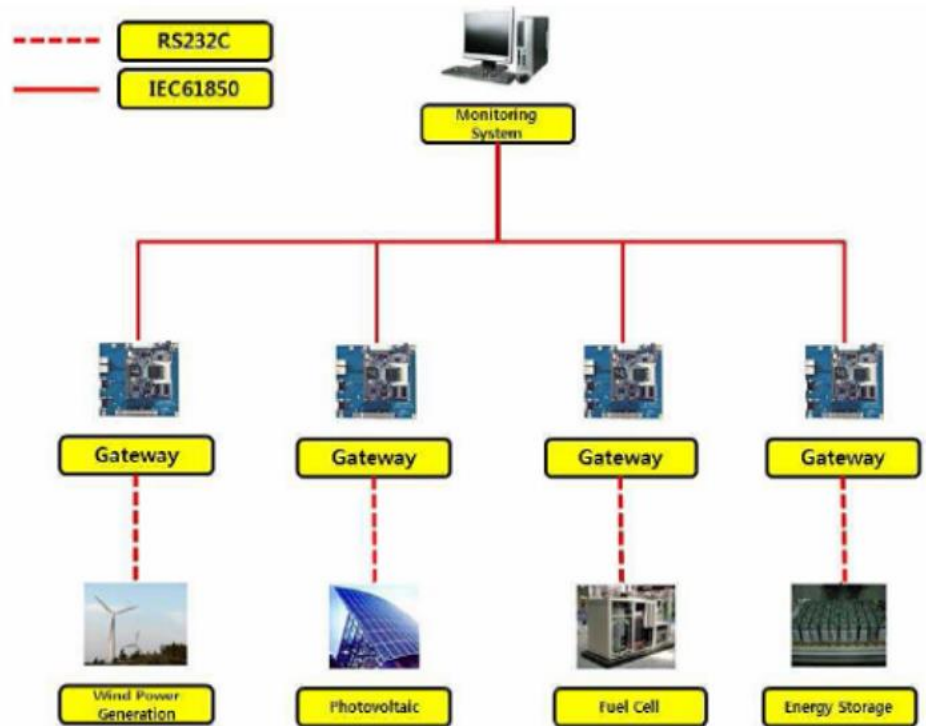


Figura 19 Conversão serial para IEC 61850 na comunicação em um microgrid (YOO, 2011).

Em tal aplicação se pode viabilizar uma substituição da comunicação via RS232 por uma comunicação sem fio, onde o *gateway* é um dispositivo que se comunica com protocolos sem fio entre o barramento 61850 e cada elemento do *microgrid* de forma a reduzir os custos de instalação.

Considerando os problemas de ruído e interferência que podem ocorrer em ambientes de subestação, algumas propostas em artigos desenvolvidos no centro de pesquisas da ABB propõe o uso de guias de onda para mitigar tais problemas (LANDERNÄS; KJELLSSON, 2009). Os resultados obtidos demonstraram que com o uso de redes com WLAN e guias de onda se obtêm valores de latência na ordem de 5ms.

Além disso, outras tecnologias também foram estudadas, tais como o uso de UWB (PASSERINI, 2008) em guias de onda, onde foram obtidos resultados que satisfaziam os requisitos temporais da norma com latência inferior a 3ms em redes com menos de 10 dispositivos conectados. Porém a tecnologia UWB foi abandonada recentemente em

detrimento de outras tecnologias sem fio. Outra tecnologia utilizada em testes é o uso das mensagens da norma 61850 sobre WiMAX, para comunicações em longa distância de forma a auxiliar a restauração e isolamento de faltas no sistema de distribuição (GORAJ; LIPES; MCGHEE, 2011). A aplicação do WiMAX é bem específica para grandes distâncias, competindo com tecnologias 4G em aplicações bem específicas e não em ambiente de subestação.

Dentre todos os trabalhos relacionados, o enfoque é no uso de mensagens da norma IEC 61850 trafegando sobre os protocolos de comunicação sem fio e não em uma integração entre protocolos ou um *gateway* convertendo protocolos. Além disso, protocolos como ZigBee e derivados do IEEE 802.11 que são os mais relacionados em artigos e trabalhos não são os recomendados para o ambiente de subestação. Nesses casos, para se conseguir os devidos níveis de confiabilidade e segurança, protocolos como o WH ou ISA100.11 devem ser empregados conforme estudos feitos pelo departamento de energia norte-americano (AKYOL; KIRKHAM; CLEMENTS; HADLEY, 2010). Ambos protocolos proveem forte segurança através de autenticação mútua de forma a impedir ataques de interceptação de dados (*Man-In-The-Middle*). Eles suportam baixa latência de comunicação e os rádios são robustos devido ao uso de saltos de frequência e modulação de sequência direta de espalhamento do espectro, as quais minimizam o impacto de interferência. Além disso, estudos empíricos sugerem taxas de confiabilidade da ordem de 99,9% ou superiores para o protocolo WH.

A Tabela 6 demonstra os resultados obtidos em diversos trabalhos que tentam utilizar redes sem fio em conjunto com a IEC 61850

Tabela 6 Latência Máxima em diversos Trabalhos

Trabalhos Relacionados	Latência Máxima
802.11a em guias de onda (LANDERNAS, KJELLSSON, 2009)	4.1ms
Ethernet via rádio na frequência de 900 MHz	15ms
802.11a em subestações de 27kV (PARIKH, 2012)	1.48ms
802.11b a 1Mbps em subestações de 27kV (PARIKH, 2012)	15.2ms
802.11b a 11Mbps em subestações de 27kV (PARIKH, 2012)	6.7ms
802.11g em subestações de 27kV (PARIKH, 2012)	3.5ms
IEEE 802.15.4 numa rede com 8 nós (MAJUMDER; BAG; KIM, 2012)	440ms
ZigBee com 4 nós transmitindo dados (ULLO, VACCARO, VELOTTO, 2010)	3703ms
ZigBee com 28 nós transmitindo dados e 10 links ativos (ULLO, VACCARO, VELOTTO, 2010)	6400ms
ZigBee com 5 Canais e período de desativação de 100ms (ELGOHARY, 2012)	100ms
ZigBee com 3 nós (FARIA, 2012)	11ms
WiMAX (GORAJ; LIPES; MCGHEE, 2011)	30ms
UWB com 9 nós (PASSERINI, 2008)	1.18ms

Como era de se esperar, os experimentos realizados com as tecnologias com maiores taxas de dados, tais como da família 802.11, WiMAX, UWB e Radios Ethernet, levam a latências menores. Já para protocolos com baixo consumo de energia, como o ZigBee, se obtém tempos na ordem de segundos, conseguindo diminuir somente com o uso de diversos canais para comunicação. O trabalho de ZigBee com 3 nós (FARIA, 2012) não fornece informações sobre como foram obtidos tais tempos e apresentam valores que não podem ser confirmados. Porém, um detalhe é que os protocolos testados não são para aplicações industriais, e como no caso do IEEE 802.15.4 numa rede com 8 nós (MAJUMDER; BAG; KIM, 2012), as taxas de sucesso na entrega de pacotes é de 82%, o que deixa a desejar no critério de confiabilidade.

3.2 APLICAÇÕES DE REDES SEM FIO EM SUBESTAÇÕES

Nessa seção é levantada uma série de possibilidades de utilização de redes sem fio em ambiente de subestação que poderiam trazer vantagens para as soluções empregadas atualmente.

Várias aplicações foram identificadas (PARIKH, SIDHU, SHAMI, 2012) de forma a justificar o uso de redes sem fio em subestações de distribuição. Tais como viabilizar economicamente um barramento de proteção para subestações de distribuição, visto que a proteção é feita somente com relés de sobrecorrente e utilizado um intervalo de coordenação em que o alimentador é desligado primeiramente e somente 400 a 500ms depois é desligado o transformador que alimenta o barramento. Porém uma falha no barramento faz com que se perca esse mesmo tempo, reduzindo assim a vida dos componentes. A Figura 20 apresenta tal aplicação.

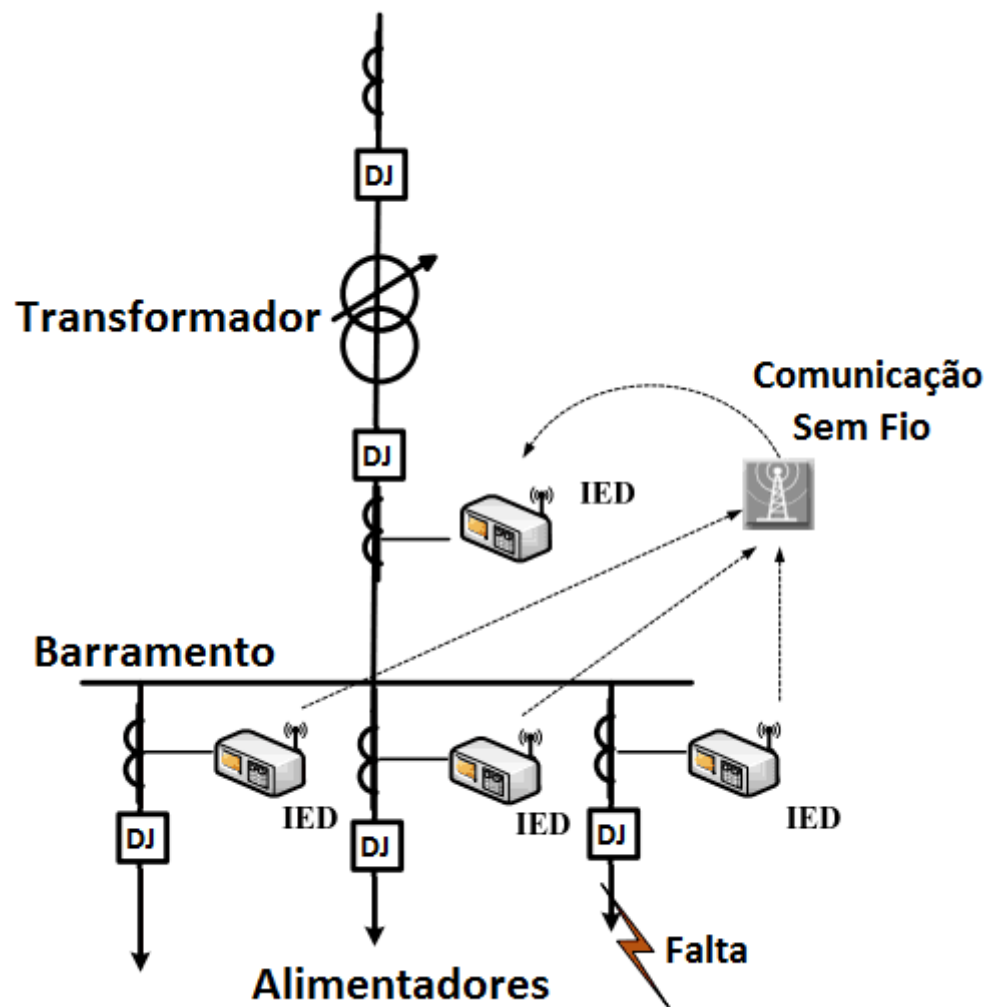


Figura 20 Comunicação Sem Fio para proteção do barramento de distribuição (Adaptado de PARIKH et al., 2012)

Outra proposta é o uso da comunicação sem fio entre o dispositivo de campo do TAP do transformador e o relé de proteção do transformador, uma vez que o mesmo requer um tempo de 0,25s (IEEE PSRC WG H5 Report, 2001) para controle. Dessa forma se poderia aumentar ou diminuir o TAP para controlar a tensão, ou utilizar a informação do mesmo para modificar a configuração utilizada pelo relé de proteção diferencial. Seguindo nas propostas, o uso de monitoramento de Potência Reativa e controle de tensão em bancos de capacitores também podem ser possibilitados, uma vez que os atrasos de comunicação aceitáveis para tanto são na ordem de 0,5 a 1s.

Já na parte de automação, pode-se utilizar a rede sem fio para agrupar os dados de oscilografia dos diversos relés que fazem parte da subestação para análise após uma falta diminuindo assim a necessidade de executar esse trabalho manualmente ou mesmo podendo se conseguir um diagnóstico de forma mais rápida, além de reduzir o cabeamento entre os diversos IEDs e se conseguir mais informação, facilitando assim o diagnóstico. Além disso, um relé pode notificar outro via mensagens IEC 61850 GOOSE para, por exemplo, realizar a aquisição de formas de onda em um determinado momento de interesse.

Nas subestações de distribuição é comum realizar-se a aquisição da tensão em cada alimentador de maneira a se calcular a potência ativa e reativa, fator de potência e etc. Porém, de maneira a reduzir os custos se utiliza apenas a medição de uma fase e se considera que as demais fases estão balanceadas. Uma proposta seria utilizar comunicação sem fio para as demais fases, de forma a facilitar o monitoramento da carga, uma vez que tais medições poderiam ser feitas a cada segundo e até mesmo perdas de dados por alguns segundos são toleráveis.

Com o crescimento na rede de distribuição de Recursos de Energia Distribuídos, que consistem em diversas fontes de energia, como solar, eólica, geração a gás ou óleo, sistemas com bateria, veículos elétricos e etc. que podem estar ou não conectados ao sistema, surgem

também mais oportunidades de utilizar redes sem fio para o monitoramento, controle e proteção desses sistemas, como, por exemplo, em zonas rurais ou em *microgrids* onde cada fonte de energia se encontra a uma distância razoável e que torne o uso de fibras ópticas para comunicação inviável.

Uma das grandes vantagens do uso de redes sem fio é a flexibilidade na arquitetura de comunicação entre os dispositivos. Nota-se que há uma diversidade de topologias e complexidade envolvida para se obter redundância com as limitações dos dispositivos, comutadores e das arquiteturas escolhidas. Com o uso de uma topologia sem fio, se pode obter uma maior diversidade de caminhos entre os dispositivos sem aumentar a quantidade de dispositivos. Além disso, a rede sem fio pode ser empregada como uma alternativa para se obter a redundância de comunicação à rede cabeada, mesclando assim as duas tecnologias.

4 GATEWAY WH IEC 61850

Este capítulo tem por objetivo apresentar a arquitetura proposta para o *gateway* IEC 61850 e WH, assim como informações sobre detalhes de desenvolvimento.

O objetivo do *gateway* IEC 61850 WH é possibilitar o uso de uma arquitetura mista de comunicação, onde dispositivos sem fio podem ser utilizados para fazer parte do monitoramento e controle do sistema de energia de uma subestação. Além disso, são avaliados os requisitos temporais exigidos pelas diversas funções utilizadas em sistema de energia e se elas atendem aos requisitos obtidos com uma rede sem fio em relação a latência máxima alcançada. A Figura 21 mostra o contexto onde pode ser aplicado o *gateway*, o qual seria capaz de interagir com os IEDs, UCSs, Sistemas SCADA ou mesmo com os equipamentos de pátio.



Figura 21 Diagram de contexto do *gateway* IEC 61850 WH

Neste caso, as mensagens de IEDs e dispositivos de pátio, por exemplo, poderiam ser convertidas do protocolo sem fio WH para mensagens do tipo GOOSE, SMV ou MMS e enviadas para outros IEDs, UCSs ou Sistemas SCADA. Além disso, outras aplicações como na comunicação entre UCSs e sistemas SCADA podem ser adotadas com o uso de uma solução sem fio.

Para que se consiga utilizar um *gateway* IEC 61850 WH em uma aplicação de sistemas de energia, é necessário avaliar os requisitos de confiabilidade do sistema de comunicação. Um dos pontos que gera dúvidas diz respeito à interferência eletromagnética dos dispositivos elétricos de alta potência nos sistemas de RF. Porém o protocolo WH foi modelado para ser utilizado em ambientes industriais, os quais são agressivos. Além disso, as interferências eletromagnéticas variam dependendo do ambiente onde são utilizados os rádios, como por exemplo, em subestações de distribuição as emissões eletromagnéticas provindas dos equipamentos do sistema de energia não geram danos à comunicação sem fio na banda de 2.4GHz (PARIKH, SIDHU, SHAMI, 2012). Através de métodos de planejamento de rede, tais como *site surveys* pode-se identificar e analisar possíveis fontes de interferência assim como alocar os canais mais adequados no espectro disponível e também a distribuição espacial dos dispositivos sem fio de forma a mitigar ou até mesmo eliminar possíveis falhas na propagação dos sinais (LINDAU, Marcos et al., 2013). Sendo assim, o objeto desse trabalho não é analisar o espectro de frequência em ambientes de subestação, mas sim avaliar a possibilidade e compatibilidade dos protocolos WH e IEC 61850 através do desenvolvimento de um *gateway*.

Para desenvolvimento do *gateway* WH IEC 61850 se utilizou a linguagem de programação C em ambiente de compilação *Linux*, através da escrita de arquivos de compilação do tipo *Makefiles*. Tal abordagem foi utilizada para facilitar a migração do código para plataformas embarcadas.

4.1 MAPEAMENTO DAS MENSAGENS

De forma a tornar compatíveis os protocolos WH e da norma IEC 61850, as mensagens WH são mapeadas para os APDUs dos pacotes SMV/GOOSE, os quais contêm os dados modelados de cada objeto. Como os mapeamentos entre SMV/GOOSE e MMS são estabelecidos na norma (IEC 61850-8, 2004) e as mensagens de tempo crítico são as mensagens SMV/GOOSE, a abordagem de desenvolvimento do *gateway* e dos testes se dá na compatibilização do SMV/GOOSE com o WH. Deste modo, o *gateway* mapeia os dados dos sensores WH nos atributos correspondentes dos pacotes SMV/GOOSE. Além disso, ele acaba sendo responsável pelo preenchimento de todas as outras informações das mensagens, tais como tamanho, estampa de tempo, comprimento e outros campos necessários pelos protocolos. Somente as medições e informações de controle recebidas dos dispositivos WH são de interesse, uma vez que o *gateway* WH é associado ao gerenciador da rede WH.

Para as mensagens GOOSE, a estrutura do pacote APDU é formada por um conjunto de informações (“dataset”) dos nós lógicos e seus atributos de dados de interesse para um dispositivo. Esses dados são modelados na norma e possuem tamanhos e tipos de dados definidos. Por exemplo, um APDU com as informações de um disjuntor terá o nó lógico com o nome XCBR. Um dos atributos do Disjuntor (XCBR) é a posição (*Pos*), a qual tem o valor de estado (*stVal*), a qualidade dessa informação (*q*), a estampa de tempo (*t*), informações de controle (*ctVal*) e outros atributos.

O próximo passo necessário é montar o pacote HART sobre UDP, o qual deve conter informação relativa ao identificador do dispositivo e os dados requisitados. A Figura 22 mostra o formato do pacote.

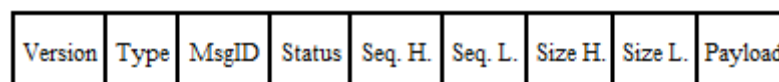


Figura 22 Pacote Hart Sobre UDP

Os campos são:

- *Version*: Versão do protocolo;
- *Type*: Para identificar a direção da mensagem;
- *MsgID*: Mostra se é um procedimento de conexão ou uma troca de dados;
- *Status*: Indica o estado da comunicação (requisição ou resposta);
- *Sequence (High and Low)*: Contém o número de sequência da mensagem;
- *Size (High and Low)*: O tamanho total da mensagem;
- *Payload*: A mensagem em si (número do comando HART e dados).

Dessa forma, o *gateway* envia um comando HART UDP de leitura para o dispositivo WH, que contém, por exemplo, um estado de disjuntor, e o resultado do comando é mapeado no atributo de dados *stVal*, que por conseguinte é compartilhado com os dispositivos presentes na rede IEC 61850. No caso de se utilizar, por exemplo, o comando HART de número 3 se obtém como resposta no campo *Payload* a corrente do circuito e as variáveis dinâmicas (até quatro variáveis) em ponto flutuante, as quais podem estar mapeadas em algum campo da norma IEC 61850.

4.2 CONFIGURAÇÃO DO GATEWAY

De forma a tornar o *gateway* desenvolvido compatível com os dispositivos que implementam os protocolos da IEC 61850 e importar as configurações de arquivos de IEDs se tentou utilizar uma geração automática da base de dados a partir dos arquivos XML (arquivos com extensão SSD, SCD, ICD ou CID) padronizados pela norma IEC 61850 que descrevem o modelo, a topologia elétrica, a rede de comunicação e os recursos de supervisão, proteção e controle do sistema de automação da subestação.

Para entender melhor a complexidade da configuração, a Figura 23 ilustra uma pequena parcela da seção de comunicação de um arquivo SCD de um IED, onde o *ConnectedAP* corresponde as configurações do endereço de comunicação de um IED, sendo que numa subestação diversos IEDs compõe o sistema.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<SCL xmlns:commonSA="commonSA.abb.com" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" >
  <Communication>
    <SubNetwork name="Subnetwork" desc="Subnetwork" type="8-MMS">
      <ConnectedAP iedName="D_21_PMONSSC" apName="S1">
        <Address>
          <P type="SA">0</P>
          <P type="IP">192.168.100.8</P>
          <P type="OSI-TSEL">0001</P>
          <P type="OSI-PSEL">00000001</P>
          <P type="OSI-SSEL">0001</P>
          <P type="OSI-AP-Qualifier">23</P>
          <P type="OSI-AE-Title">1,3,9999,23</P>
        </Address>
        <GSE desc="Regra para o Goose" ldInst="LD0" cbName="gcb_A">
          <Address>
            <P type="MAC-Address">01-0C-CD-01-00-05</P>
            <P type="APPID">0005</P>
            <P type="VLAN-PRIORITY">4</P>
            <P type="VLAN-ID">000</P>
          </Address>
          <MinTime unit="s">4</MinTime>
          <MaxTime unit="s">1000</MaxTime>
        </GSE>
      </ConnectedAP>
      <ConnectedAP iedName="D_P2_51P2" apName="S1">
        <Address>

```

Figura 23 Seção de Comunicação de um arquivo SCD

Cada IED deve possuir um único endereço de rede. Este endereço é configurado no campo *<Address>* do arquivo SCD para indicar uma comunicação com tal IED. Além do endereço de rede, a configuração do *<ConnectedAP>* deve possuir informações relativas a um endereço de aplicação OSI, o qual é composto de um seletor de transporte (TSEL), um seletor de apresentação (PSEL), um seletor de sessão (SSEL), um qualificador do processo de aplicação (*AP-Qualifier*) e um título da entidade de aplicação (*AE-Title*). Os Seletores (TSEL, PSEL e SSEL) são uma série de octetos os quais são definidos durante a configuração, já o título e qualificador da aplicação (*AE-Title* e *AP-Qualifier*) são necessários para estabelecer uma associação de aplicação (MMS) entre IEDs. Na parte relativa ao

<GSE> são definidos os parâmetros de comunicação GOOSE, tais como endereço *Multicast*, prioridade e endereço de VLAN e APPID (*Application ID*), os quais são utilizados para diferenciar a origem dos dados. Além da parte de comunicação entre IEDs, outras seções fazem parte dos arquivos de configuração. Na Figura 24, se encontra a seção do IED de um arquivo ICD, onde estão presentes as descrições de todos os nós lógicos utilizados pelo IED bem como dados e atributos de cada nó.

```
<IED name="UCD16FX" type="Siprotec-6MD66x" manufacturer="SIEMENS" configVersion="1.0">
  <Services>
    <!--DynReportControl max="10"/-->
    <!-- present in FDIS, removed in IS, commented by SIEMENS -->
    <DynAssociation/>
    <GetDirectory/>
    <GetDataObjectDefinition/>
    <DataObjectDirectory/>
    <GetDataSetValue/>
    <DataSetDirectory/>
    <ConfDataSet max="15" maxAttributes="60"/>
    <DynDataSet max="15" maxAttributes="60"/>
    <ReadWrite/>
    <ConfReportControl max="10"/>
    <GetCBValues/>
    <ReportSettings cbName="Fix" datSet="Dyn" rptID="Dyn" optFields="Dyn" bufTime="Dyn" trgOps="Dyn" intgPd="Dyn"/>
    <GOOSE max="16"/>
    <FileHandling/>
    <ConfLNs fixPrefix="true" fixLnInst="true"/>
  </Services>
  <AccessPoint name="P1">
    <Server>
      <Authentication none="true"/>
      <LDevice inst="MEAS" desc="Measurement">
        <LN0 inst="" desc="General" lnClass="LLN0" lnType="UCD16FX/MEAS/LLN0">
          <ReportControl name="urcbA" rptID="urcbA01" bufTime="100" buffered="false">
            <TrgOps dchg="true" qchg="true" dupd="true" period="true"/>
            <OptFields seqNum="true" timeStamp="true" dataSet="true" reasonCode="true" dataRef="false" configRef="true"/>
            <RptEnabled max="1"/>
          </ReportControl>
          <ReportControl name="urcbB" rptID="urcbB01" bufTime="100" buffered="false">
            <TrgOps dchg="true" qchg="true" dupd="true" period="true"/>
            <OptFields seqNum="true" timeStamp="true" dataSet="true" reasonCode="true" dataRef="false" configRef="true"/>
            <RptEnabled max="1"/>
          </ReportControl>
          <ReportControl name="urcbC" rptID="urcbC01" bufTime="100" buffered="false">
            <TrgOps dchg="true" qchg="true" dupd="true" period="true"/>
            <OptFields seqNum="true" timeStamp="true" dataSet="true" reasonCode="true" dataRef="false" configRef="true"/>
            <RptEnabled max="1"/>
          </ReportControl>
          <ReportControl name="urcbD" rptID="urcbD01" bufTime="100" buffered="false">
            <TrgOps dchg="true" qchg="true" dupd="true" period="true"/>
          </ReportControl>
        </LN0>
      </LDevice>
    </Server>
  </AccessPoint>
</IED>
```

Figura 24 Seção do IED de um arquivo ICD

Cada IED possui uma representação virtual de uma interface de dados que é chamada de ponto de acesso (*AccessPoint*), onde os IEDs trocam dados e serviços entre os diversos nós lógicos (no exemplo com o LN0) ou com outros dispositivos.

Além disso, os tipos dos dados são especificados para cada tipo de nó lógico utilizado (LNNodeType), como mostra a Figura 25.

```

<DataTypeTemplates>
  <LNNodeType id="UCD16FX/MEAS/LLN0" lnClass="LLN0">
    <DO name="Mod" type="myMod_0"/>
    <DO name="Beh" type="myBeh_1"/>
    <DO name="Health" type="myHealth_2"/>
    <DO name="NamPlt" type="myNamPlt_3"/>
  </LNNodeType>
  <LNNodeType id="UCD16FX/MEAS/MMXU1" lnClass="MMXU">
    <DO name="Mod" type="myMod_0"/>
    <DO name="Beh" type="myBeh_1"/>
    <DO name="Health" type="myHealth_2"/>
    <DO name="NamPlt" type="myNamPlt_7"/>
    <DO name="TotW" type="myTotW_8"/>
    <DO name="TotVAr" type="myTotW_8"/>
    <DO name="TotVA" type="myTotW_8"/>
    <DO name="TotPF" type="myTotW_8"/>
    <DO name="Hz" type="myTotW_8"/>
    <DO name="PPV" type="myPPV_28"/>
    <DO name="PhV" type="myPhV_47"/>
    <DO name="A" type="myPhV_47"/>
  </LNNodeType>
  <LNNodeType id="UCD16FX/MEAS/MMTR1" lnClass="MMTR">
    <DO name="Mod" type="myMod_0"/>

```

Figura 25 Tipos de dados definidos num Arquivo ICD.

Sendo assim, iniciou-se o desenvolvimento de um analisador (“parser”) de arquivos XML para leitura destes arquivos SCD, visando à compatibilização dos dados. Todavia, devido à grande complexidade da norma no quesito modelagem e diversos tipos de dados e ao tempo necessário para o seu desenvolvimento, o analisador acabou ficando em segundo plano em relação às outras metas do trabalho. Os resultados que seriam obtidos com tal funcionalidade não agregariam informações na análise de compatibilidade e integração dos protocolos WH e IEC 61850 e apenas serviriam para fins de configuração da rede IEC 61850.

4.3 PRÉ-REQUISITOS TEMPORAIS

Como já visto na Tabela I, existem diferentes classificações de mensagens na IEC 61850, as quais possuem diferentes formatos, de acordo com a sua modelagem de dados, e também possuem requisitos temporais diferenciados, conforme as aplicações em que são utilizados. Como os trabalhos e aplicações relacionados na literatura ao uso de redes sem fio em conjunto com a IEC 61850 são focados em sistemas de distribuição, os quais apresentam os menores requisitos temporais, definiu-se o atendimento aos requisitos de 10ms ou 100ms

para mensagens de tempo crítico como um dos objetivos a serem alcançados com o uso do *Gateway WH IEC 61850*.

No protocolo WH, informações estratégicas, tais como variáveis de monitoramento (tensão, corrente, temperatura e etc.), podem ser atribuídas nas variáveis primária, secundária, terciária e quaternária (PV, SV, TV e QV respectivamente). Essas variáveis podem ser ajustadas para serem periodicamente publicadas e disponibilizadas para o gateway com o último dado medido, de forma a se ter uma resposta periódica na aquisição de tais informações pelo sistema da subestação. Este tipo de publicação cíclica é denominado modo de *Burst* do ponto de vista do Protocolo WH, e é configurada de acordo com os requisitos do sistema. Outros dados podem ser solicitados para os dispositivos de campo a qualquer momento, além de ser possível se definir comandos especiais para diferentes propósitos.

O método de arbitragem de acesso ao meio no WH é o TDMA, o qual implica em um tempo específico para cada *slot* de comunicação, que no caso do WH tem duração de 10ms. Sendo assim, não é possível se conseguir troca de dados em um período inferior a 10ms. Os dispositivos comerciais WH atuais permitem atualização dos dados em períodos não inferiores a 250ms.

Além disso, pode-se concluir a priori que o protocolo WH, não atenderia algumas mensagens, devido a duração mínima do timeslot. Porém diversas mensagens da norma são com tempo superior a esse valor, o que não inviabiliza essa análise. Para mensagens como, por exemplo, SMV classe M1 (definida na seção 2.3.5), se tem uma taxa de amostragem específica de por exemplo 480 amostras por segundo. Essa taxa de amostragem leva a pensar que não seria viável, pois seria possível enviar apenas uma mensagem a cada 10ms. Esse raciocínio é incorreto uma vez que é definido na norma o tempo de atraso para essas mensagens de até 10ms, e uma mensagem SMV pode conglomerar diversas amostras. Por

outro lado, mensagens do tipo GOOSE e MMS não possuem requisitos de taxa de amostragem, pois são enviadas somente em transições de estado.

4.4 ARQUITETURA DO SOFTWARE

Como o *gateway* é responsável pela configuração da base de dados e também pela conversão dos comandos WH em mensagens da norma IEC 61850 torna-se necessário desenvolver um gerenciador de banco de dados, o qual mantém as configurações de rede de todos dispositivos conectados ao *gateway* e controla os dados que são trocados entre eles. A Figura 26 descreve a arquitetura empregada e mostra no retângulo maior o sistema desenvolvido para os testes.

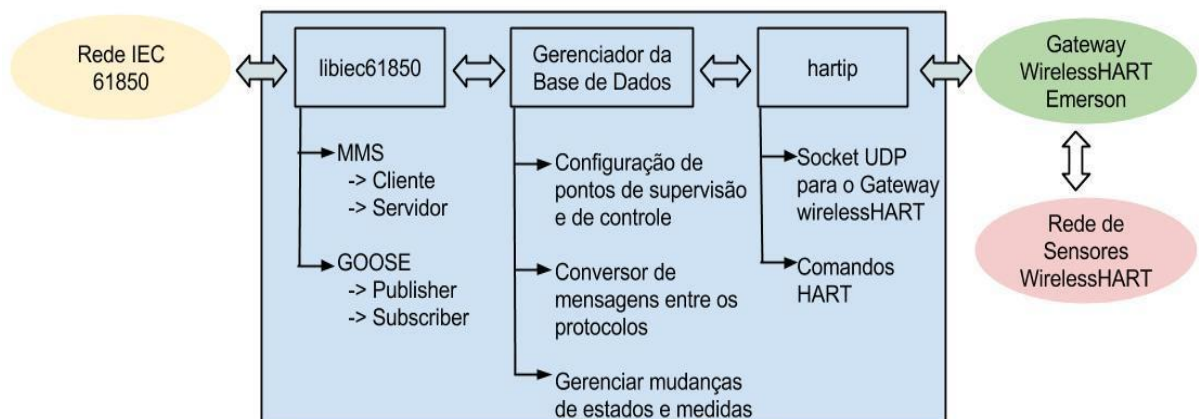


Figura 26 Arquitetura simplificada de comunicação do *gateway*

Nos experimentos propostos foi utilizado o *gateway* WH do fabricante Emerson modelo 1420 (EMERSON, 2013) mostrado na Figura 27. As configurações da rede WH ficam todas por parte do *gateway* WH de forma a facilitar a implementação do *gateway* WH IEC 61850.



Figura 27 Gateway WH do fabricante Emerson

Além de manter as configurações dos dispositivos e converter as mensagens entre protocolos, o gerenciador da base de dados gerencia mudanças de estados ou medidas, de forma a reduzir o tráfego de dados em ambas as redes. Além da necessidade de implementar mecanismos de repetição no envio de mensagens GOOSE semelhantes aos empregados em dispositivos comerciais. Tal mecanismo pode ser visto na Figura 28.

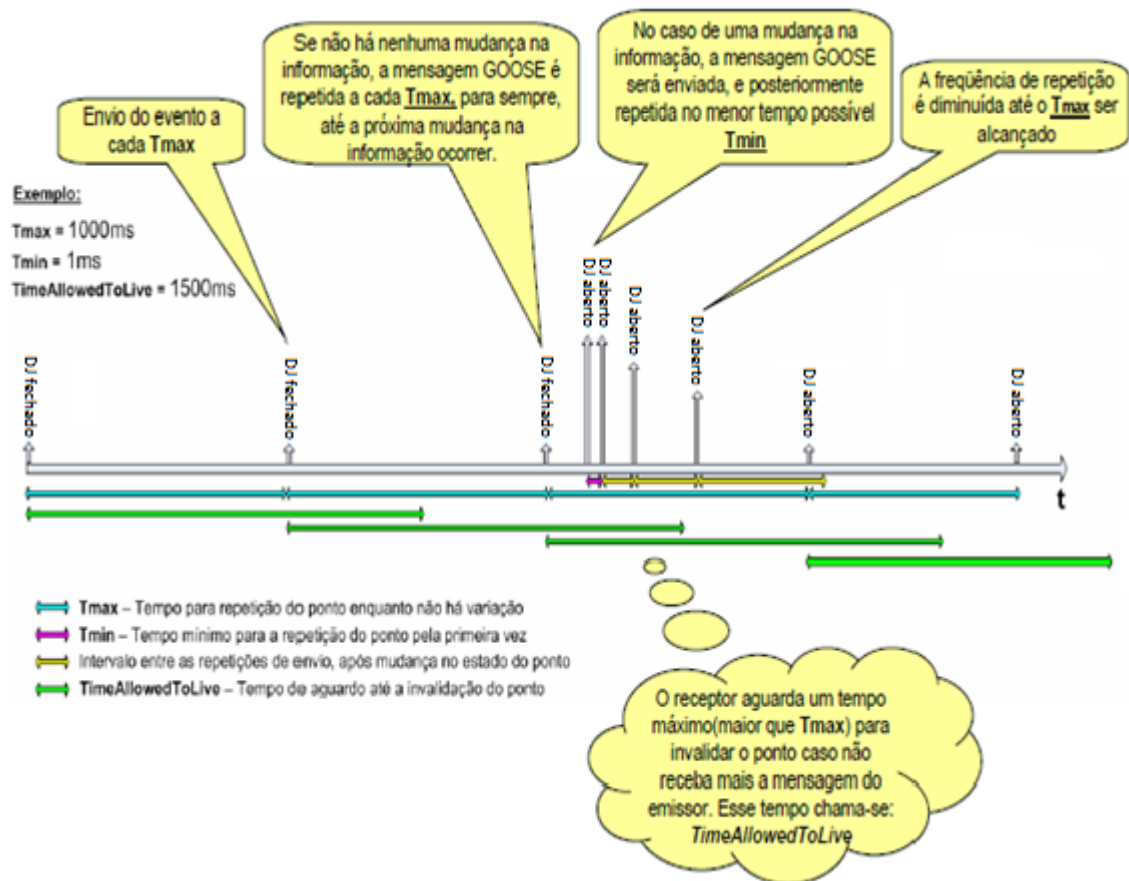


Figura 28 Mecanismo para envio de mensagens GOOSE

Nesse mecanismo (conhecido como “Enhanced Retransmission Mechanism”), a mensagem é transmitida em um tempo máximo (T_{max}), que varia de acordo com o fabricante do equipamento, mas normalmente é 1 segundo. Na ocorrência de uma mudança na informação a mensagem é enviada com um tempo mínimo (T_{min}), que normalmente é 1 milissegundo. Após a mudança de estado, se diminui a frequência de repetição de forma gradual até que o tempo de envio seja aumentado de T_{min} até T_{max} . O objetivo desse mecanismo é aumentar a probabilidade da entrega da mensagem aos dispositivos da rede que possam interesse.

4.5 DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO

Para fazer a troca de informações o código fonte do projeto do *gateway* foi desenvolvido com o uso de duas bibliotecas, uma implementando a comunicação com o sistema WH trocando mensagens UDP com um *gateway* WH comercial, sendo ela baseada no trabalho de (WINTER, 2010) e chamada de *hartip*. E outra se comunicando com a rede IEC 61850 para envio de mensagens tanto GOOSE como MMS, sendo chamada *libiec61850*, a qual é composta pela API IEC 61850, Cliente/Servidor MMS, o modelo de Dados e o Publisher/Subscriber GOOSE. Tais bibliotecas podem ser vistas no modelo simplificado do software na Figura 29.

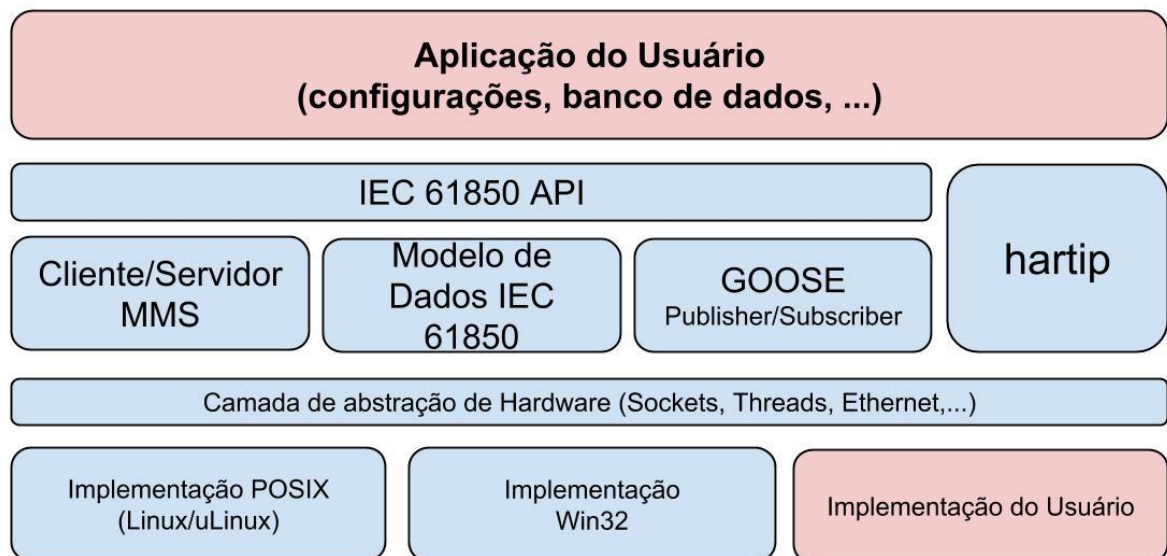


Figura 29 Visão geral do sistema

A API IEC 61850 fornece diversos serviços, entre eles um cliente/servidor MMS genérico que pode ser utilizado para outras aplicações, uma modelagem de dados IEC 61850 que pode ser utilizado em conjunto com o MMS ou com o serviço de Publisher/Subscriber GOOSE. Além disso, o gateway fornece uma camada de abstração de hardware para esconder as dependências da plataforma subjacente. Atualmente esta camada consiste em sockets, threads e para o GOOSE o suporte a abstração ao acesso direto a interface de rede Ethernet. Além disso, essa camada de abstração está implementada para sistemas Linux e

Windows (32 bits) e pode ser portada para outras plataformas desde que o usuário implemente as funções da camada de abstração.

De forma a exemplificar o funcionamento do software a Figura 30, demonstra o funcionamento do sistema.

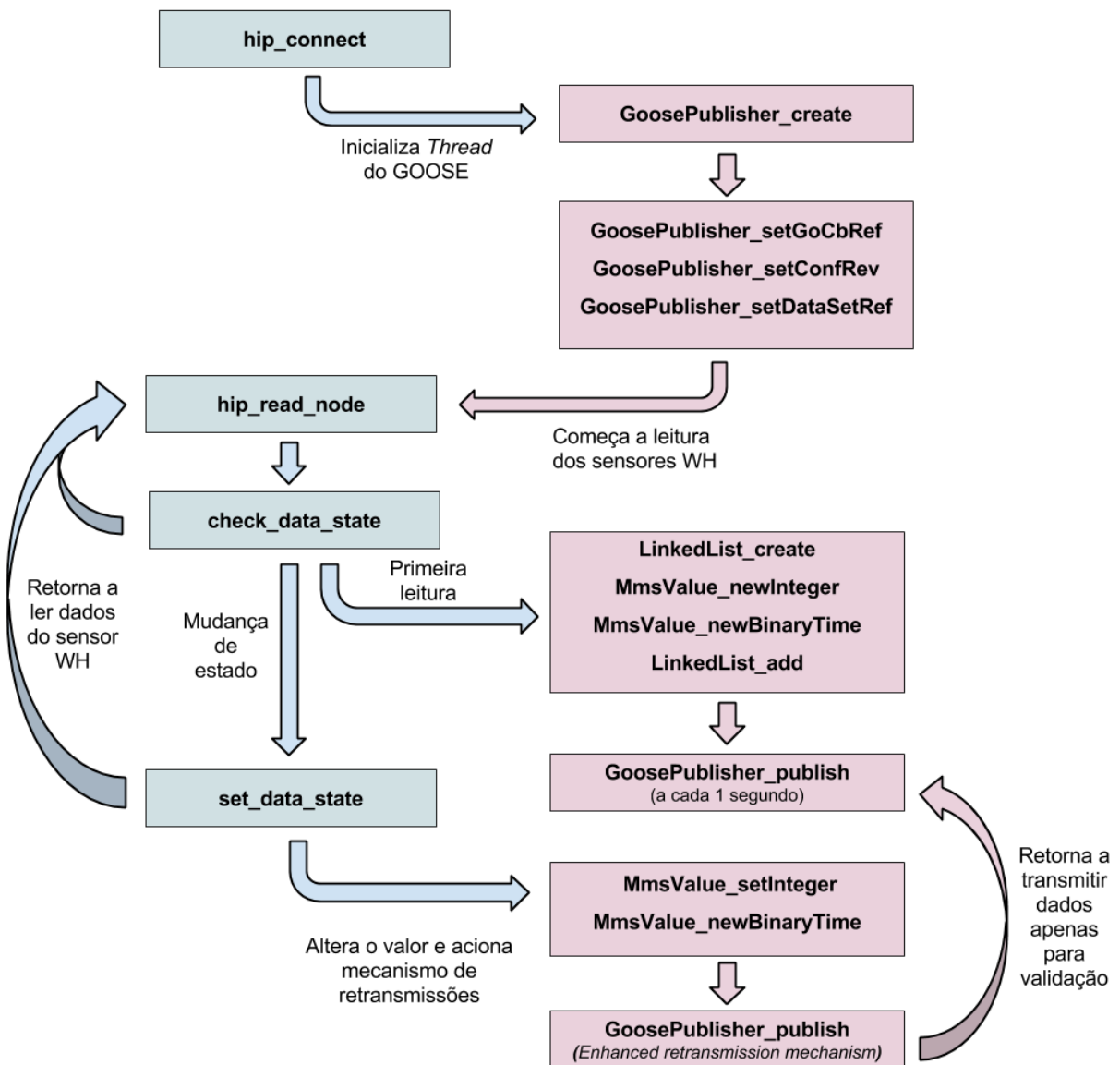


Figura 30 Fluxograma Simplificado de funcionamento

Parte do código WH pode ser visto nas funções `hip_connect` e `hip_read_node`. A primeira serve para iniciar a comunicação UDP com o *gwname* abrindo um *socket* na porta *gwport*, as implementações nos níveis abaixo utilizam bibliotecas do sistema operacional

para tratamento de conexões. Já a segunda função apresenta uma complexidade maior, uma vez que ela lê os dados de um nó especificado pelo *NODE_ADDR*, e armazena esses dados na estrutura chamada de *data*. A complexidade se dá em virtude desta função programar toda a parte de envio e recebimento de mensagens, bem como formatação de dados para os dados de comandos HART. Foram implementadas a função de leitura via comandos periódicos (que estão programados no superframe para serem enviados periodicamente e se encontram na cache do Gateway da Emerson) e via comandos aperiódicos (os quais são escalonados para serem enviados em time slots que estiverem vagos). Além disso, outras funções de identificação de vizinhos, tais como enumeração e listagem de vizinhos, estatísticas dos dispositivos e análise da rede também estão presentes no código, porém não foram utilizadas na aplicação.

Por outro lado, no desenvolvimento dos protocolos da norma IEC 61850, uma série de funções é utilizada para criação das mensagens GOOSE. Um exemplo das funções para montagem de um dataset em um formato qualquer é mostrado abaixo:

```

LinkedList dataSetValues = LinkedList_create();

MmsValue * value1 = MmsValue_newIntegerFromInt32(123);

MmsValue * value2 = MmsValue_newIntegerFromInt32(456);

MmsValue * time_value = MmsValue_newBinaryTime(false);

//Creating list with values

LinkedList_add(dataSetValues, value1 );

LinkedList_add(dataSetValues, time_value);

LinkedList_add(dataSetValues, value2);

```

No caso do exemplo, foi criada uma lista encadeada com 3 variáveis, duas do tipo inteiro de 32 bits e uma do tipo estampa de tempo.

Já para o envio das mensagens acima, é feito o envio diretamente para a interface de rede do sistema operacional, através dos métodos abaixo:

```
GoosePublisher publisher = GoosePublisher_create(NULL, "wlan0");  
GoosePublisher_setGoCbRef(publisher, "Test1/LLN0.gocb1");  
GoosePublisher_setConfRev(publisher, 1);  
GoosePublisher_setDataSetRef(publisher, "Test1/LLN0$dataset1");  
GoosePublisher_publish(publisher, dataSetValues);  
GoosePublisher_destroy(publisher);
```

A função `GoosePublisher_create` cria um canal de comunicação direto com a interface de rede. Nas funções `GoosePublisher_setGoCbRef`, `GoosePublisher_setConfRev` e `GoosePublisher_setDataSetRef` se faz a configuração do formato da mensagem GOOSE, colocando os nomes dos objetos e atributos do dataset, os quais devem ser modelados conforme a norma. Por final, a mensagem é enviada com o formato proposto e com os dados (`dataSetValues`) criados através da função `GoosePublisher_publish`. Por fim, para fechar as conexões com as interfaces e liberar a memória utilizada é chamada a função de finalização `GoosePublisher_destroy`.

Como resultado da mensagem GOOSE de teste acima se obteve a seguinte mensagem na Figura 31:


```

+ Frame 2: 115 bytes on wire (920 bits), 115 bytes captured (920 bits) on interface 0
+ Ethernet II, Src: HonHaiPr_76:96:c2 (c0:18:85:76:96:c2), Dst: Iec-Tc57_01:00:01 (01:0c:cd:01:00:01)
+ 802.1Q Virtual LAN, PRI: 4, CFI: 0, ID: 0
- GOOSE
  APPID: 0x1000 (4096)
  Length: 97
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  - goosePdu
    gocbRef: Test1/LLN0.gocb1
    timeAllowedtoLive: 0
    datSet: Test1/LLN0$dataset1
    t: Jan 14, 2014 00:58:38.599999964 UTC
    stNum: 1
    sqNum: 7
    test: False
    confRev: 1
    ndsCom: False
    numDatSetEntries: 3
    - allData: 3 items
      - Data: integer (5)
        integer: 123
      - Data: binary-time (12)
        binary-time: 000000000000
      - Data: integer (5)
        integer: 456
0000  01 0c cd 01 00 01 c0 18 85 76 96 c2 81 00 80 00  .....v.....
0010  88 b8 10 00 00 61 00 00 00 00 61 57 80 10 54 65  .....a..aW..Te
0020  73 74 31 2f 4c 4c 4e 30 2e 67 6f 63 62 31 81 01  st1/LLN0 .gocb1..
0030  00 82 13 54 65 73 74 31 2f 4c 4c 4e 30 24 64 61  ...Test1 /LLN0$da
0040  74 61 73 65 74 31 84 08 52 d4 8b be 99 99 99 0a  taset1.. R.....
File: "/tmp/wireshark_wlan0_2014011322584...  Packets: 6 Displayed: 6 Ma...  Profile: Default

```

Figura 31 Mensagem GOOSE verificada com a ferramenta analisadora de protocolos Wireshark

Onde se verifica que a mensagem é do Tipo GOOSE, que é composta de um quadro Ethernet com VLAN. Nos campos relativos ao GOOSE, se nota que tem-se um dataset (*datSet*) de nome “Test1/LLN0\$dataset1”, com 3 atributos, sendo 2 valores inteiros e um valor de tempo binário. Este dataset faz parte do Bloco de Controle GOOSE (*gocbRef*) de nome “Test1/LLN0.gocb1” que deve possuir um nome único para cada nó lógico (no caso o LLN0). Sendo assim, outro IED que queira as informações do dataset desse bloco de controle, consegue identificar através do *gocbRef* que aquela mensagem é de interesse.

4.6 PLATAFORMA EMBARCADA

O software desenvolvido também foi migrado para uma plataforma embarcada de desenvolvimento *Raspberry Pi – Model B*. A qual se caracteriza por possuir pequenas dimensões (8,6cm x 5,4cm) e utilizar um processador da família ARM 11 com 700MHz, 512MB de memória RAM, disco de armazenamento SD (*slot* para cartão SD), saída de vídeo HDMI, e alimentação via USB 5 Volts e até 700mA de consumo dependendo das funcionalidades utilizadas, entre outras características. O hardware do sistema pode ser visualizado na Figura 32.



Figura 32 Raspberry Pi - modelo B utilizado para rodar o software.

O sistema operacional que foi utilizado na placa Raspberry Pi, para compilar o código do *gateway* WH IEC 61850 foi o Linux Raspbian que é uma variante do Linux Debian otimizada para o Raspberry pi. O kernel utilizado foi na versão 3.8.13, o qual foi modificado e compilado para ter suporte ao RTDM (*Real-Time Driver Model*) de forma a se prover em suporte a Interface de Programação de Aplicativos Xenomai versão 2.6.

O Xenomai é um *Framework* para suporte a aplicativos de tempo real no espaço do usuário do sistema operacional Linux o qual é muito semelhante ao RTAI, porém difere no sentido de ter o objetivo de alcançar uma maior portabilidade e facilidade de manutenção, enquanto o RTAI foca em obter as menores latências possíveis, através do desenvolvimento de aplicações que trabalhem no espaço do kernel do sistema.

A latência média do sistema operacional obtida em um teste disponibilizado pelo próprio Xenomai pode ser visualizada na Figura 33.

```

root@machinoid-rpi:~/rtnet-code# /usr/xenomai/bin/xeno latency
== Sampling period: 1000 us
== Test mode: periodic user-mode task
== All results in microseconds
warming up...
RTT| 00:00:01 (periodic user-mode task, 1000 us period, priority 99)
RTH|----lat min|----lat avg|----lat max|-overrun|---msw|---lat best|--lat worst
RTD|   -7.000|   -2.000|   13.000|      0|    0|   -7.000|   13.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   15.000|      0|    0|   -7.000|   15.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   14.000|      0|    0|   -7.000|   15.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   14.000|      0|    0|   -7.000|   15.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   16.000|      0|    0|   -7.000|   16.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   17.000|      0|    0|   -7.000|   17.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   16.000|      0|    0|   -7.000|   17.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   18.000|      0|    0|   -7.000|   18.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   16.000|      0|    0|   -7.000|   18.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   17.000|      0|    0|   -7.000|   18.000
RTD|   -7.000|   -2.000|   15.000|      0|    0|   -7.000|   18.000

```

Figura 33 Tempos de Latência do Sistema Operacional Utilizando o Xenomai na Raspberry Pi

Os valores médios obtidos para latência são inferiores a 10 microssegundos, tendo como máximo 18 microssegundos, os quais são bem inferiores aos valores de latência das mensagens tanto no ambiente WH, como na norma IEC 61850 define como sendo mais críticos (3 milissegundos).

Embora o sistema operacional seja de tempo real, os controladores Ethernet usados no hardware da Raspberry Pi são conectados ao System-on-a-Chip (SoC) via USB. Dessa forma a tentativa de instalação do RTnet, que é uma pilha de protocolo a ser adicionada ao Xenomai de forma a se obter uma rede Ethernet de tempo real não teve êxito. O RTnet controla o acesso ao meio de forma a evitar colisões e congestionamentos imprevisíveis. Para

isso é necessário que os drivers dos dispositivos de rede estejam adaptados ao RTnet e Xenomai. Porém, não existe hoje uma solução pronta para Drivers de Rede que utilizam a controladora USB no RTnet, sendo que apenas uma série de placas PCI são suportadas. Sendo assim, as mensagens destinadas à interface de rede acabam tendo o tratamento pelo sistema operacional como se não fossem mensagens de tempo crítico, logo, sem ter grande prioridade de escalonamento, o que pode aumentar as incertezas com relação ao atendimento dos requisitos temporais.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo tem por objetivo demonstrar quais foram os sistemas e como foram obtidos os resultados dos testes do *Gateway* WH IEC 61850, além de fazer uma análise, comparando com resultados obtidos em outros trabalhos.

5.1 CENÁRIO DE TESTES

Para os testes do *Gateway* WH IEC 61850, foram feitos dois cenários, onde se testou tanto a parte do protocolo WH como do protocolo IEC 61850.

5.1.1 IEC 61850

Para se testar o funcionamento do software desenvolvido, se utilizou o sistema SCADA SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia) que é desenvolvido pelo Centro de Pesquisas do Grupo Eletrobras (CEPEL). O SAGE é um sistema amplamente utilizado no setor elétrico nacional e é compatível com equipamentos de diversos fornecedores.

Para tanto foi configurado o sistema SAGE como *Subscriber*, para fazer a aquisição de dados GOOSE, os quais foram distribuídos pelo *Gateway* WH IEC 61850 que estava configurado como *Publisher*.

5.1.2 WH

Para testes da comunicação do *Gateway* WH IEC 61850 com equipamentos WH, foi utilizado uma comunicação entre o *Gateway* desenvolvido e um *Gateway* comercial da Emerson que se comunica via HART UDP. No cenário utilizado, o *Gateway* WH se comunicava com 28 rádios no momento da execução dos testes. Tais rádios estavam dispostos no laboratório de Automação e Controle do Departamento de Engenharia Elétrica

da UFRGS, e foram dispostos com distâncias máximas não superiores a 3 metros entre todos dispositivos. Tanto o hardware como o software utilizado pelos dispositivos sensores WH foi desenvolvido em trabalhos anteriores (MULLER et al., 2010).

5.2 RESULTADOS

De forma a estimar a latência na comunicação entre os dispositivos, foi necessário dividir em três partes conforme a Figura 34. Tais partes são:

- D1: Latência intrínseca a rede IEC 61850;
- D2: Latência na comunicação entre o *gateway* desenvolvido no trabalho e o *gateway* WH;
- D3: Latência na rede WH.

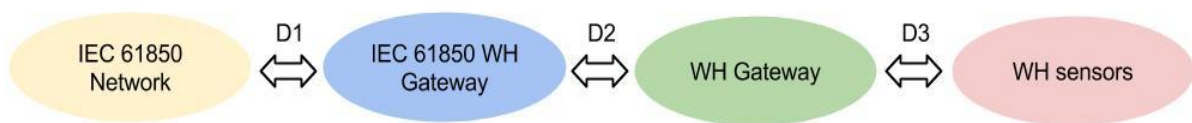


Figura 34 Latência das mensagens nas diferentes redes

Ainda existem atrasos de processamento do *gateway*, os quais podem ser mitigados com melhorias de implementação e não serão objetos de estudo desse trabalho.

As Latências D1 e D3 foram já bem estudados em outros trabalhos (SIDHU; YUJIE, 2007), (KANABAR, 2009), (GEORG, 2013). Por exemplo, a latência D1 (rede IEC 61850) pode ser obtida utilizando a ferramenta de modelagem e simulação OPNET. Nos trabalhos estudados, assim como nos resultados obtidos em testes de comunicação com o SAGE em redes utilizando LANs de 100MB/s, são apresentadas latências da ordem de 0.1 ms para D1.

Para a rede WH em cenários com dois saltos até a mensagem chegar ao destino final, uma latência de 1297ms para D3 pode ser obtido (WINTER et al., 2013).

Finalmente, foi testada a comunicação entre os *gateways* para se obter a latência D2 em 2 trabalhos que renderam artigos (COVATTI et al., 2013) e (COVATTI et al., 2014) . A topologia utilizada da rede WH continha 30 dispositivos WH associados a um *gateway*. Tal teste foi feito enviando o comando Hart de número 3 via mensagens UDP, o qual lê as variáveis dinâmicas do sensor WH. Foram feitos testes com 1000 amostras e uma latência média de 2.73 ms foi encontrado, com um *jitter* médio de 0.73ms o qual é ilustrado na Figura 35.

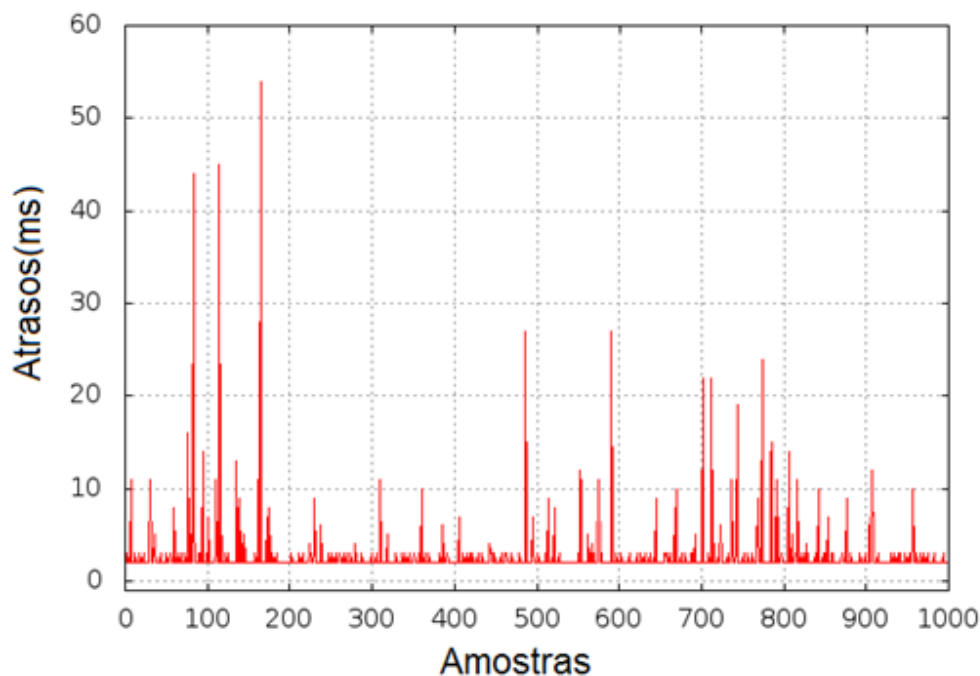


Figura 35 Latência D2 do comando HART periódico

Neste caso, o comando HART periódico estava configurado em modo de *Burst* com um período de 1s (latência D3). Somando D1, D2 e D3, uma latência total de 1002.83ms é obtido para essa topologia. Os valores espúrios na Figura 35 se dão devido aos testes terem sido executados em um sistema operacional que não era em tempo real e não se tem garantias no manual do fabricante do *Gateway* Emerson, que a porta de comunicação HART UDP funciona na pilha de processamento de tempo real.

Outro teste para medir o atraso entre as mensagens foi feito, neste caso utilizando o comando aperiódico, o qual é enviado diretamente para um dispositivo da rede WH pelo *gateway*. Sendo assim, a latência obtida é uma soma das latências D1, D2 e D3 como pode ser visto no diagrama de iteração da Figura 36.

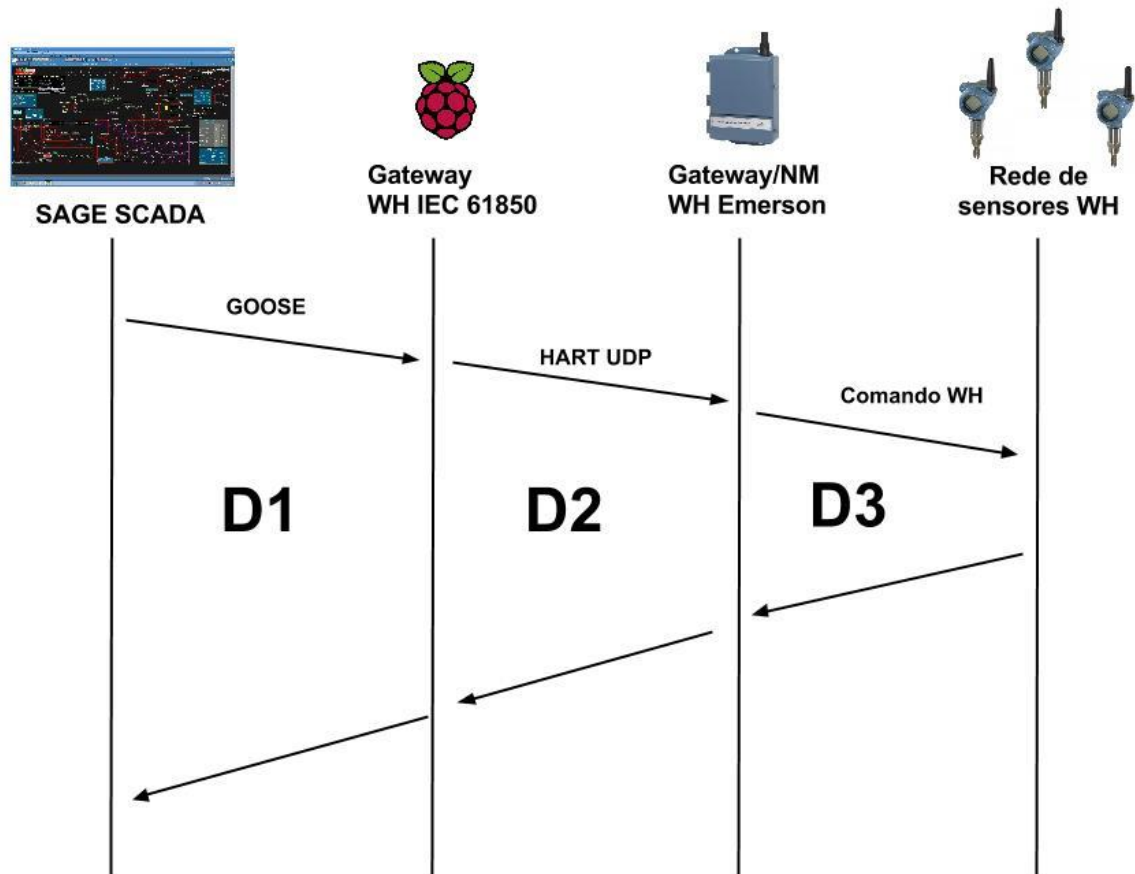


Figura 36 Diagrama de Iteração entre os componentes envolvidos na medição

Nesse caso a mesma topologia de rede foi empregada e os mesmos números de amostras foram obtidos (1000). A latência média obtida foi de 4466.95 ms. A Figura 37 ilustra os resultados obtidos.

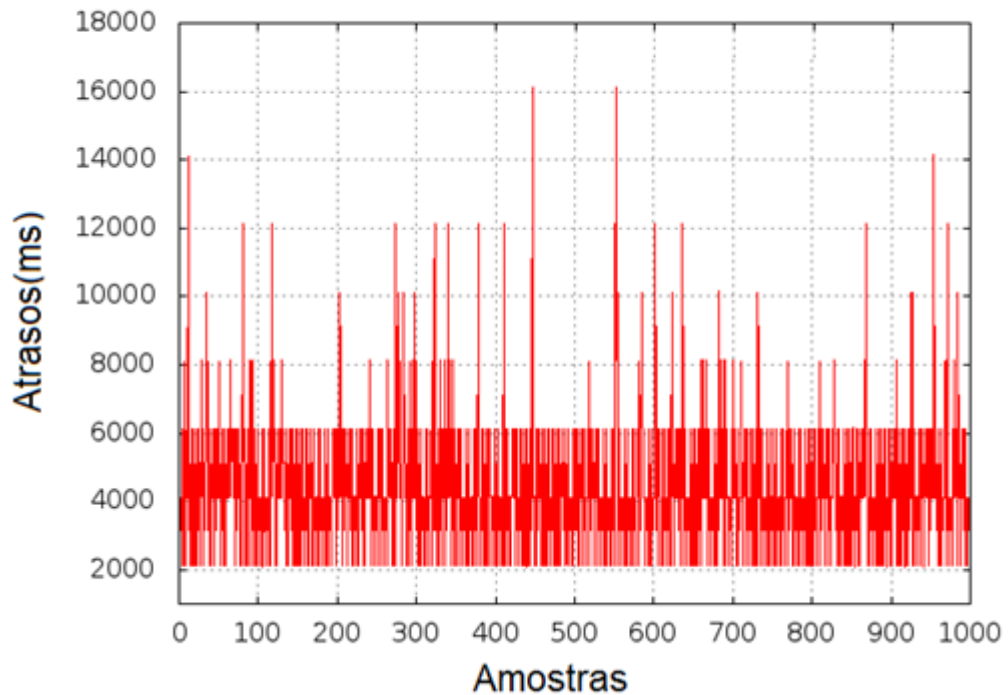


Figura 37 Latências D1, D2 e D3 para o comando HART aperiódico

Pela magnitude das variações dos resultados de cada amostra nesse teste, tendo valores máximos de latência na ordem de 16 segundos, se deduz que são devido à rede de sensores WH e não ao sistema operacional do *gateway*, visto que as variações devido ao sistema operacional são da ordem de ms, como mostrado na figura do teste anterior, e no caso da Figura 37 são da ordem de segundos. As variações na latência que são em alguns casos 2 segundos e em extremos de 16 segundos se deve ao fato que o Gerenciador da Rede WH, envia aloca os comandos em espaços de tempo disponíveis, que dependendo do estado atual da rede (seja próximo ou distante do envio de um comando por algum dos dispositivos) pode variar. No caso de uma aplicação específica, quando é necessário enviar um comando periodicamente e com determinismo é recomendado configurar para que o dispositivo solicite ao gerenciador da rede uma requisição para envio de tal mensagem.

De forma a tentar reduzir as variações e testar o sistema em uma plataforma embarcada, se fizeram alguns testes utilizando o *hardware* Raspberry Pi em conjunto com o sistema Xenomai. As Figuras 38 e 39 demonstram tais resultados.

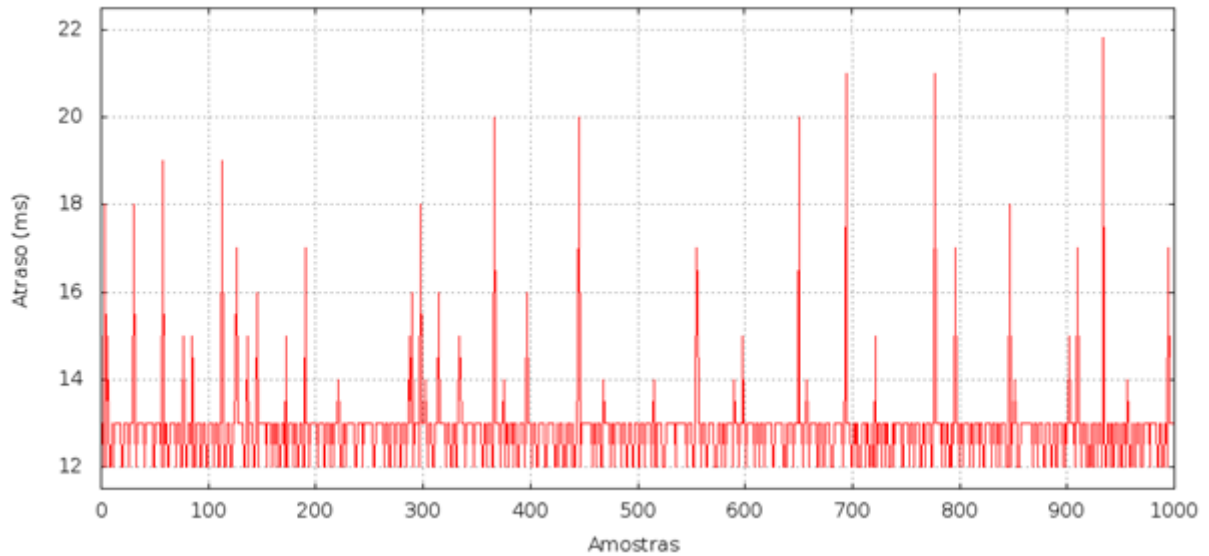


Figura 38 Latência D2 para o comando HART periódico (Raspberry Pi).

Como resultados, na Figura 38, existe uma menor variação das mensagens, além de menores valores máximos. Porém, como não se tem uma garantia de que o Gateway WH Emerson possua requisitos e sistema operacional de tempo real, ainda acontecem algumas variações nas mensagens.

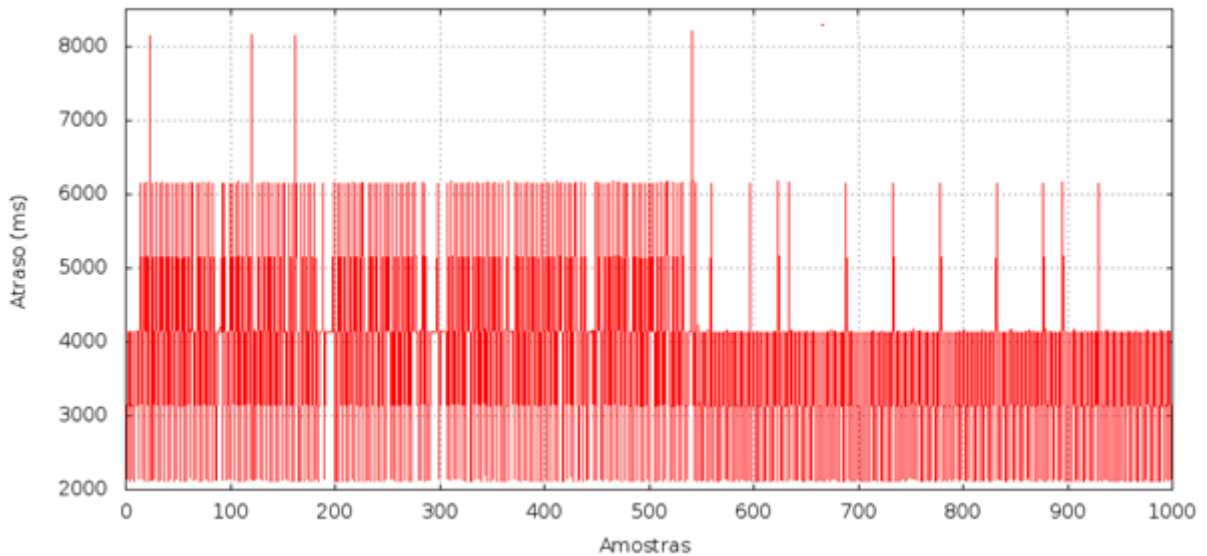


Figura 39 Latências D1, D2 e D3 para o comando HART aperiódico (Raspberry Pi).

Do ponto de vista do comando enviado diretamente para o Sensor, nesse teste da Figura 39, foram utilizados menos rádios (3 rádios) se comparados com o teste com um sistema operacional convencional. Porém como os efeitos da latências se dão mais em função da rede WH, foi possível verificar, devido ao menor número de dispositivos na rede WH menores variações. Com isso as latências máximas que antes eram na ordem dos 16 segundos foram reduzidas para ordem de 8 segundos, uma vez que a rede possuía menos comandos trafegando até o gerenciador da rede.

5.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS

Comparando os dados obtidos com outros trabalhos mostrados na Tabela 6, se pode observar que estão condizentes com as aplicações que visam um baixo consumo e baixas taxas de transmissão tais como o ZigBee. No trabalho onde foi testado o ZigBee em conjunto com a norma IEC 61850, e foram variados os números de nós e *links* ativos (ULLO, VACCARO, VELOTTO, 2010), os valores obtidos para latência foram na ordem de 3 a 6

segundos. Nos testes feitos com o *gateway* WH IEC 61850, tais valores ficaram na ordem 1 a 4 segundos. Ainda assim, os valores estão muito distantes dos resultados obtidos com taxas de transmissão maiores como no 802.11a. Porém no WH se tem uma confiabilidade maior por ter sido desenvolvido especialmente para a indústria e não utilizar acesso ao meio CSMA-CA.

6 TRABALHOS FUTUROS

Implementar um gerenciador de rede com as funcionalidades do *gateway* WH IEC 61850 e fazer modificações ou melhorias no protocolo WH, de forma a reduzir os tempos de comunicação entre o Gerenciador da rede e os nós sensores. Até mesmo algumas funcionalidades do protocolo podem ser suprimidas a fim de se obter menores taxas de latência, porém sem deixar o protocolo robusto e confiável. Tal conceito é apresentado na Figura 40.



Figura 40 Proposta de *gateway* Futuro

Assim, nessa proposta de arquitetura, o papel do *gateway* WH da Emerson é suprimido e se pode aperfeiçoar a comunicação da rede WH, além de reduzir os atrasos entre as mensagens por eliminar um elemento da rede.

Outro trabalho importante que pode ser feito é a finalização da funcionalidade de analisador de arquivos XML, de forma com que o *Gateway* suporte todas as configurações normatizadas pela IEC 61850 e se obtenha uma configuração dos IEDs mais rápida e padronizada, visando a interoperabilidade com os diversos dispositivos.

Além disso, medir o impacto da interferência eletromagnética em laboratório e em cenários reais de subestação com os dispositivos sem fio WH pode ser tema de uma abordagem em futuros trabalhos.

Para os testes realizados, os comandos WH utilizados foram para obtenção das variáveis de processo, uma vez que o objetivo do trabalho era de testar o desempenho das redes e foi uma forma de simplificar a implementação. Sendo assim, um trabalho que é

necessário para se obter uma solução completa seria criar comandos WH específicos para as mensagens da norma IEC 61850.

Do ponto de vista do sistema de tempo real, com a implementação de um gerenciador de Rede de acordo com a Figura 36, podem ser feitos os testes na plataforma de tempo real para qual o sistema foi portado, além de testes em outras plataformas que possam possuir melhores tempos de latência ou com um *hardware* com maior poder de processamento, bem como com outros sistemas de tempo real tais como o RTAI, RT Linux e etc. Além disso, podem ser feitos comparativos do hardware da Raspberry Pi em conjunto com o sistema operacional Xenomai com outras soluções.

Por fim, uma análise econômico-financeira pode ser realizada de forma a estimar em quais casos o custo e retorno de investimento na utilização de um dispositivo sem fio para comunicação em vez de uma rede cabeada tornam a aplicação economicamente viável.

7 CONCLUSÕES

Uma das principais vantagens que podem ser obtidas com a integração entre uma rede IEC 61850 e uma rede WH com dispositivos sem fio é a redução dos custos com cabearmentos e de instalação de sensores e atuadores necessários para os sistemas das subestações.

Além disso, a norma está expandindo seus horizontes para ser utilizada em setores como de recursos distribuídos de energia e também para integração com sistemas supervisórios de outras áreas como gás e água, que podem ter futuramente necessidades do uso de dispositivos sem fio para controle e monitoramento. Com essa crescente expansão e com o fato de hoje a norma não contemplar o uso de redes sem fio, um estudo sobre a utilização da norma IEC 61850 com uma solução sem fio foi o alvo desse trabalho.

Assim, investigar outra tecnologia sem fio (WH), em uso com a norma IEC 61850, que ainda não havia sido estudada em outros trabalhos da literatura, uma vez que as abordagens encontradas tinham como foco em especial a análise de redes WLAN e ZigBee foi um dos tópicos abordados nesse trabalho. Além disso, foi proposta uma abordagem de utilização de um Gateway para conversão dos protocolos, a qual também era distinta dos outros trabalhos, uma vez que a tentativa era de trafegar mensagens da norma IEC 61850 sobre os protocolos de rede sem fio.

Com o desenvolvimento de um Gateway para obter os experimentos abordados nesse trabalho foi dado um primeiro passo rumo a uma solução sem fio para subestações utilizando WH em conjunto com a IEC 61850.

O uso de redes sem fio em subestações de energia pode trazer outras vantagens para o sistema, tais como uma rápida implantação, além de poder ser utilizada se não como o meio primário de comunicação, como uma alternativa à comunicação cabeada de forma a se obter redundância de enlace. Devido à grande complexidade envolvida nas topologias de rede e

número de comutadores utilizados em uma topologia de rede de subestação, uma rede sem fio pode se tornar interessante para alcançar o mesmo dispositivo por diversos caminhos. Além disso, com a aplicação da IEC 61850 em dispositivos de pátio de subestação, bem como em recursos de energia distribuída que podem estar a uma distância considerável, o uso de uma tecnologia sem fio pode ser ainda mais valorizado.

Este estudo abordou o mapeamento da informação entre ambos protocolos no quesito compatibilidade de funcionalidades e troca de dados. Entretanto, devido aos limites entre mensagens dos *gateways* WH comerciais que são utilizados para servir o sistema supervisão, não é possível alcançar os tempos críticos previstos na IEC 61850. Porém, a dinâmica de troca de mensagens WH é bem conhecida e com um gerenciador de rede apropriado, pode-se tornar possível o atendimento dos requisitos temporais para alguns casos previstos na IEC 61850.

Se comparado com outros estudos, a latência obtida teve ordens de grandeza similares aos apresentados nos protocolos com baixa taxa de dados (ZigBee e 802.15.4) e inferiores aos com protocolos com uma maior taxa de dados (UWB e 802.11), porém, o fato de utilizar um protocolo recomendado por órgãos internacionais, tais como o IEEE, para aplicações industriais era algo que ainda não tinha sido abordado em outros trabalhos e o principal foco se dava em protocolos para comunicação tais como ZigBee e 802.11, os quais pecam na confiabilidade necessária para uma aplicação de tempo real em ambiente industrial. O WH utiliza repetições e redundância de forma a garantir a entrega das mensagens, o que não necessariamente ocorre nos outros protocolos sem fio.

Os resultados obtidos demonstram que mensagens que não são de tempo crítico (MMS) que são utilizadas para aplicação de usuário, tais como sistemas SCADA possuem tempos próximos das faixas aceitas pela norma. Os tempos estão um pouco abaixo dos recomendados pela IEC 61850 (500ms), porém em ambiente real de operação, uma diferença

no caso de 500ms para 2 segundos no recebimento de uma mensagem pode passar imperceptível para a operação de uma subestação, desde que a estampa de tempo da mensagem esteja correta e que se tenha uma garantia na entrega da mensagem. Mesmo assim, melhoras no *Gateway*, podem fazer com que se alcance os limites propostos pela norma. Já para mensagens de tempo crítico para sistemas de transmissão, os quais exigem 3ms de latência máxima, a utilização do WH acaba ficando impossibilitada devido ao tempo mínimo para cada ciclo de mensagens, que é de 10ms. Deste modo, mesmo sem considerar-se os atrasos envolvidos nos sistemas, tem-se um tempo superior ao máximo permitido. O emprego do WH em conjunto com a IEC 61850 para mensagens de tempo crítico pode ser viabilizado para mensagens de sistemas de distribuição devido aos menores requisitos temporais associados. Como, por exemplo, mensagens do tipo 1B, que podem tolerar até latência de 100ms entre dispositivos.

Sendo assim, com o desenvolvimento futuro de um gerenciador de rede apropriado é possível reduzir a latência da rede WH utilizada, abrindo assim possibilidades para aplicações com requisitos de tempo real em sistemas de distribuição.

REFERÊNCIAS

- BRAND K.P.. ABB, IEC 61850 Communication Principles. In: INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS (CIGRE), 2006, Paris. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2006. p. 106-110.
- CHEN, D.; NIXON, M.; MOK, A.. **Why WirelessHART**. New York: Springer, 2010.
- CHEN, M. et al. Mobile agent based wireless sensor networks. **Journal of Computing**, Vancouver, v.1, n.1, p. 14-21, Apr. 2006.
- COVATTI, F. et al. A WirelessHART and IEC 61850 Gateway Proposal. In: COMPUTING SYSTEM ENGINEERING BRAZILLIAN SYMPOSIUM (SBESC), 2013, Niterói. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2013. p. 1-2.
- COVATTI, F. et al. Wireless Communication for IEC61850: A WirelessHART Gateway Proposal. In: INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2014, Busan. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2014. p. 1-6.
- DI BISCEGLIE, M.; ULLO, S. L.; VACCARO, A.. The role of cooperative information spreading paradigms for smart grid monitoring. In: ELECTROTECHNICAL CONFERENCE (MELECON), 2012, Yasmine, Hammamet. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2012. p. 814-817.
- DOHERTY, L.; TEASDALE, D. A. Towards 100% Reliability in Wireless Monitoring Networks. In: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON PERFORMANCE EVALUATION OF WIRELESS AD HOC, SENSOR AND UBIQUITOUS NETWORKS, 2006, Torremolinos. **Proceedings...** [S.l.]: ACM, 2006. p.132–135.
- ELGOHARY, H. S. K. et al. D1 substation automation based on IEC61850 and Zigbee. In: ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ICET), 2012, Cairo. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1-5.
- EMERSON. **Reference Manual**. 00809-0200-4420, Rev GA. Title Page. April 2013 iii. Smart Wireless Gateway. Disponível em <<http://www2.emersonprocess.com>>. Acesso em: 17 de jan. de 2014.
- FARIA, R. A. P.. Wireless sensor network for electrical secondary substations. In: EUROPEAN RADAR CONFERENCE (EuRAD), 2012. Tallinn. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2012. p. 602-605.
- GEORG, H. et al. Performance evaluation of time-critical communication networks for smart grids based on IEC 61850. In: COMPUTER COMMUNICATIONS WORKSHOPS (INFOCOM WKSHP), 2013. Turin. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2013. p. 43-48.

GORAJ M.; LIPES L.; MCGHEEE J.. IEC 61850 GOOSE over WiMAX for Fast Isolation and Restoration of Faults in Distribution Networks, In: IINTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), 2011, Dublin. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2011, p. 4.

GUNGOR, V. C.; LU, B.; HANCKE, G. P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. In: INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2010. New York. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2010, p. 3557-3564.

HEWITSON, L.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical power system protection**. Oxford: Elsevier, 2004.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-1**: Communication Networks and Systems in Substations: Introduction and Overview. Ed 1.0. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-5**: Communication Networks and Systems in Substations: Communication requirements for functions and device. Ed 1.0. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-7-2**: Communication Networks and Systems in Substations: Abstract Communication Service Interface (ACSI. Ed 1.0). Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-7-3**: Communication Networks and Systems in Substations: Common Data Classes. Ed 1.0. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-7-4**: Communication Networks and Systems in Substations: Basic Communication Structure for substation and feeder equipment – Compatible logical node classes and data classes. Ed 1.0. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-8-1**: Communication Networks and Systems in Substations: Mappings to MMS ((ISO/IEC9506-1 and ISO/IEC 9506-2. Ed 1.0. Geneva, 2004.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-9-1**: Communication Networks and Systems in Substations: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sample Values over serial unidirectional multidrop point to point link. Ed 1.0. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-9-2**: Communication Networks and Systems in Substations: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sample Values over ISO/IEC 8802-3. Ed 1.0. Geneva, 2004.

INTERNATIONAL ELETROMECHANICAL COMISSION. **IEC 61850-SER**: Communication networks and systems in substations. Ed 1.0. Geneva, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROMECHANICAL COMMISSION. **IEC 62601**: Industrial communication networks – Fieldbus specifications – WIA-PA communication network and communication profile,. Ed 1.0. Geneva, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROMECHANICAL COMMISSION. **IEC 62734**: Industrial communication networks – Wireless communication network and communication profiles – ISA 100.11a. Ed 1.0. Geneva, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-62951**: Industrial communication networks - Wireless communication network and communication profile – *WirelessHART*. Ed 1.0. Geneva, 2010.

INSITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.15.4**: Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Ed 1.0. New York, 2006.

INSITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.1D**: Standard for local and metropolitan area networks-common specifications – Media access control (MAC) Bridges. Ed 1.0. Geneva, 1998.

INSITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.1W**: Standard for local and metropolitan area networks-common specifications – Media access control (MAC) Bridges. Amendment 2: Rapid Reconfiguration. Ed 1.0. Geneva, 2001.

INTERNACIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ISA 100**. Disponível em: <<http://www.isa.org/isa100>>. Acesso em: 25 Nov. de 2013.

JONSSON, M.; KUNERT, K. Towards Reliable Wireless Industrial Communication with Real-Time Guarantees. **Industrial Informatics Journal**, New York, v. 5, n. 4, p. 429-442, 2009.

KANABAR, P. M. et al. Evaluation of communication technologies for IEC 61850 based distribution automation system with distributed energy resources. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING (PES), 2009. Calgary. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1-8.

KHEDKAR, M. K.; DHOLE, G. M.. **A Textbook of Electric Power Distribution Automation**. New Delhi: Laxmi Publications Limited, 2010.

KONKA, J. W. et al. Traffic generation of IEC 61850 sampled values. In: SMART GRID MODELLING AND SIMULATION WORKSHOP (SGMS), 2011. Brussels. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2011. p. 43-48.

LANDERNAS, K.; KJELLSSON, J.. Evaluation of a waveguide systems for IEC61850 communication. , In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), 2009, Nice. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1-4.

LINDAU, M. et al. Low cost wireless site survey system for WirelessHart network deployment. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI), 11., 2013, Recife. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2013a. p. 1-6.

MAJUMDER, R.; BAG, G.; KIM, K.. Power sharing and control in distributed generation with wireless sensor networks. **Journal of Smart Grid**, Rowland Height, v. 3, n. 2, p. 618-634, 2012.

MONTIGNIES, P.; ANGAYS, P.; GUISE, L.. IEC 61850 in the Oil and Gas Industries. **Industry Applications Magazine**, Elkton, v. 17, n. 1, p. 36-46, 2011.

MÜLLER, I. et al. Development of *WirelessHART* Compatible Field Devices. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (I2MCT), 2010, Austin. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1430-1434.

MÜLLER, I., NETTO, J.C., PEREIRA, C.E. *WirelessHART* Field Devices. **Instrumentation & Measurement Magazine**, New York, v. 14, p. 20-25, 2011.

MÜLLER, I. **Gerenciamento Descentralizado de redes sem fio industriais segundo padrão *WirelessHART***. 2012. 104 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Procedimentos de rede: Submódulo 2.7 - Requisitos de telessupervisão para a operação**. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/agentes>> Acesso em: 20 nov. 2013.

PASSERINI, M.. **Design of an ECMA368 simulator for evaluating network performance for electrical substation applications based on IEC618510**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia elétrica) - KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2008.

PARIKH, P. P.; SIDHU, T. S.; SHAMI, A. A Comprehensive Investigation of Wireless LAN for IEC 61850–Based Smart Distribution Substation Applications. **Industrial Informatics Journal**, New York, v. 9, n. 3, p. 1466-1476, 2013.

SCHOSSIG T. **IEC 61850: The Impact On Protection Testing**. Disponível em: <<http://www.powerandwater-me.com/2010/06/iec-61850-the-impact-on-protection-testing/>>. Acesso em: 23 dez. 2013.

SIDHU, T. S.; YIN, Y.. IED modelling for IEC61850 based substation automation system performance simulation. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006, Quebec. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2006. p. 7-9.

SIDHU, T. S.; YIN, Y.. Modelling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems. **Power Delivery Journal**, Edmonton, v. 22, n. 3, p. 1482-1489, 2007.

SONG, J. et al. *WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control*. In: REAL-TIME AND EMBEDDED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS SYMPOSIUM (RTAS), 2008. Saint Louis. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2008. p. 377-386.

WINTER, J. M. et al. WirelessHART Routing Analysis Software. In: COMPUTING SYSTEM ENGINEERING BRAZILLIAN SYMPOSIUM (SBESC), 2011, Florianópolis. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2011. p. 96-98.

WINTER, J. M. et al. Study of routing mechanisms in a *WirelessHART* network. In: INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2013. Cape Town. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2013. p. 1540-1545.

YOO, B. et al. Communication Architecture of IEC 61850 based Micro Grid System. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, Seoul, v. 6, n. 5, p. 605-612, 2011.

YONA L. et al. Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (SBrT), 2012, Brasília, **Anais...** Salvador, [s. n.], 2012. p1-44.

ANEXO: CRITÉRIOS DE SUPERVISÃO DE ACORDO COM O ONS PARA UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

As informações disponibilizadas para o operador nacional do sistema (ONS) variam de acordo com cada módulo de uma subestação, bem como a classe e importância no sistema. Por exemplo, abaixo são listadas todas as informações necessárias para uma linha de transmissão de 230 kV:

- Uma medição do módulo de tensão fase-fase em kV nos terminais em que a ela se conectam;
- Uma medição do módulo de tensão fase-fase em kV no ponto de conexão entre a Linha de Transmissão (LT) e a(s) compensação(ões) série, caso a instalação contemple compensação série na(s) linha(s);
- Potência trifásica ativa em MW e reativa em MVar nos terminais;
- Corrente em uma das fases em ampere;
- Sinalização de estado referente a todos os disjuntores e chaves utilizados nas conexões de equipamentos da rede de operação, também incluídas as chaves de *bypass*. Além disso, as seguintes informações de sequenciamento de eventos:
 - Disparo por sobretensão;
 - Atuação da lógica de bloqueio por oscilação de potência;
 - Disparo da proteção para perda de sincronismo;
 - Atuação do relé de bloqueio de recepção permanente de transferência de disparo;
 - Disparo do relé de bloqueio de linha subterrânea.
 - Agrupamento dos eventos abaixo relacionados para gerar uma única mensagem “Atuação da proteção da linha de transmissão – Outras funções”:
 - Disparo da proteção principal de fase;
 - Disparo da proteção alternada de fase;
 - Disparo da proteção principal de neutro;
 - Disparo da proteção alternada de neutro;
 - Transmissão de sinal de desbloqueio/bloqueio ou sinal permissivo da teleproteção;
 - Transmissão de sinal de transferência de disparo da teleproteção;
 - Recepção de sinal de desbloqueio/bloqueio ou sinal permissivo da teleproteção;
 - Disparo por recepção de sinal de transferência de disparo da teleproteção;
 - Atuação da lógica de bloqueio por perda de potencial;
 - Disparo da 2ª zona da proteção de distância;

- Disparo da 3ª zona da proteção de distância;
- Disparo da 4ª zona da proteção de distancia;
- Disparo da proteção de sobrecorrente direcional de neutro temporizada;
- Disparo da proteção de sobrecorrente direcional de neutro instantânea.

Também é especificado que as seguintes informações de sequenciamento de eventos podem ser solicitadas para envio em até 24 horas:

- Partida da proteção principal de fase (por fase), nos casos em que o disparo da proteção de fase não indique a(s) fase(s) defeituosa(s);
- Partida da proteção alternada de fase (por fase), nos casos em que o disparo da proteção de fase não indique a(s) fase(s) defeituosa(s);
- Partida da proteção principal de neutro (por fase), nos casos em que o disparo da proteção não indique a fase defeituosa;
- Partida da proteção alternada de neutro (por fase), nos casos em que o disparo da proteção não indique a fase defeituosa;
- Partida do religamento automático.