

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Arquitectura de comunicações de Sistemas de
Protecção, Comando e Controlo da
EDP Distribuição**

André Levi da Cruz Costa Correia de Morais

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Professor Hélder Leite

Julho de 2009

Resumo

A evolução tecnológica verificada ao longo das últimas décadas foi um dos factores que impulsionou o desenvolvimento de novos equipamentos e até paradigmas no que diz respeito aos sistemas de protecção e controlo das subestações de energia eléctrica. Acompanhada pelo desenvolvimento das sociedades, este tipo de instalações foi-se expandindo de forma notória. Assim, surgiram requisitos relativos à concepção de sistemas de protecção cada vez mais avançados, robustos e confiáveis. Neste sentido, surge como objectivo principal desta dissertação estudar os actuais Sistemas de Protecção, Comando e Controlo instalados nas subestações de distribuição relativamente à arquitectura do seu sistema de comunicação.

A dissertação começa com estudo relativo à evolução dos relés de protecção, integração dos sistemas de protecção e automação numa subestação e principais vantagens e benefícios da norma de referência aplicável a este tipo de sistemas - a CEI61850. Para além destes pontos, também é feita uma caracterização dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição em termos das suas funcionalidades e evolução das arquitecturas da rede de comunicação. No seguimento da dissertação é feita uma apresentação dos principais protocolos e tecnologias utilizados na rede de comunicação das subestações, abordando-se, igualmente, aspectos relacionados com a sua fiabilidade e segurança. A presente dissertação contempla ainda uma referência a algumas soluções comerciais para os sistemas de comunicação da subestação propostas por fabricantes com a Moxa, Ruggedcom e Cisco, terminando com uma apresentação relativa às novas tendências tecnológicas aplicáveis a estes mesmos sistemas.

Abstract

The technological evolution observed in last decades was one of the factors that drove the development of new equipment and even paradigms with regard to protection and control systems of electric power substations. Accompanied by the development of societies, this type of plant has been expanding in a remarkable. Thus, there were requirements for the design of protection systems more advanced, robust and reliable. In this sense, is the main objective of this dissertation to study the current Protection, Command and Control System installed in distribution substations.

The dissertation begins with study of the evolution of protective relays, integration of protection and automation systems and major advantages and benefits of implementing standard IEC61850. Beyond these points, also is a characterization of Protection, Command and Control Systems of substations in terms of their features and evolution of the communication network architectures. Following the dissertation is a presentation of the main protocols used in communication network substations, also addressing issues related to their safety and security. This dissertation also includes a reference to some commercial solutions for the communications systems of substation proposed by manufacturers like Moxa, Ruggedcom and Cisco, ending with a presentation on new technology trends applicable to these systems.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao meu orientador, o Professor Helder Leite, pela confiança e motivação que em mim depositou, e pelos desafios que me lançou por considerar que tinha capacidade para os vencer.

Agradeço ao Engenheiro Mário Lemos, ao Engenheiro Filipe Vale e ao Engenheiro Miguel Santos por toda a disponibilidade e contributo que sempre deram em prol do sucesso deste trabalho.

A todos os meus amigos, que de forma mais ou menos directa, me ajudaram e motivaram a nunca duvidar das minhas capacidades e do meu valor.

Aos meus pais e à minha irmã, agradeço de forma muito especial porque sem eles nunca teria passado por esta experiência.

Índice

Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xix
Abreviaturas	xxi
Capítulo 1	
Introdução.....	1
1.1. Estrutura do documento	2
Capítulo 2	
Evolução dos sistemas de protecção	3
2.1. Relés de protecção.....	3
2.1.1. Relés electromecânicos	4
2.1.2. Relés electrostáticos	5
2.1.3. Relés numéricos.....	6
2.2. Equipamentos de medida	9
2.2.1. Transformadores de Tensão	9
2.2.2. Transformadores de Intensidade.....	10
2.3. Sistemas de protecção e automação das subestações	11
2.3.1. Interface entre automação distribuída e sistemas de protecção	12
2.3.2. Solução integrada para protecção e automação de uma subestação	12
2.3.3. Sistema de automação da subestação baseado na norma CEI61850.....	19
2.4. Sumário	23
Capítulo 3	
Norma CEI61850: Redes de comunicação e sistemas em subestações.....	25
3.1. Motivação para a criação da norma CEI61850.....	25
3.2. Requisitos do sistema de comunicação da subestação	26

3.3. Modelização dos dispositivos da subestação.....	29
3.4. Protocolos Reais: Mapeamento	31
3.5. Barramento de processo da subestação (<i>Process Bus</i>).....	33
3.6. Linguagem de Configuração da Subestação (SCL)	34
3.7. Modelo da subestação	35
3.8. Norma CEI61850: Benefícios e Desafios	36
3.8.1. Principais características	36
3.8.2. Principais vantagens	37
3.9. Sumário	38

Capítulo 4

Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição.....	39
4.1. Projecto tipo de subestações AT/MT	39
4.1.1. Armários de Comando e Controlo do edifício de comando.....	40
4.1.2. Quadros Metálicos de Média Tensão do edifício de comando	42
4.1.3. Caracterização técnica dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações.....	45
4.1.4. Aplicações e serviços dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo	47
4.1.5. Funções de protecção implementadas nas diferentes unidades de painel do edifício de comando	49
4.1.6. Funções complementares implementadas em cada unidade de painel do edifício de comando	53
4.1.7. Funções de automatismo implementadas em cada unidade de painel do edifício de comando	55
4.2. Arquitectura física da rede de comunicação do edifício de comando	58
4.2.1. Arquitectura do sistema de comunicação da Efacec utilizando o protocolo LonWorks.....	58
4.2.2. Arquitectura do sistema de comunicação da ABB utilizando o protocolo LonWorks.....	62
4.2.3. Arquitectura do sistema de comunicação utilizando o protocolo Ethernet	64
4.3. Sumário	68

Capítulo 5

Protocolos e especificação do sistema de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição	69
5.1. Redes de comunicação	69
5.1.1. Camada Física	71
5.1.2. Camada de Ligação de dados.....	71
5.1.3. Camada de Rede	72
5.1.4. Camada de Transporte	72
5.1.5. Camada de Aplicação	73
5.2. Ethernet	73
5.2.1. Ethernet: Camada Física	74
5.2.2. Ethernet: Camada de Ligação de dados	76
5.2.3. Ethernet Comutada (Switched Ethernet).....	77
5.2.4. Ethernet Rápida (IEEE802.3u)	82
5.2.5. Gigabit Ethernet (IEEE802.3z).....	83
5.3. Transmission Control Protocol e Internet Protocol (TCP/IP)	89
5.3.1. Protocolo de Internet (IP).....	90
5.4. <i>Virtual Local Area Network</i> (VLAN)	93
5.4.1. VLANs baseadas em grupos de portas.....	94

5.4.2.	VLANs baseada no endereço MAC	95
5.4.3.	VLANs baseadas no protocolo de comunicação.....	96
5.5.	Fiabilidade da rede de comunicação	96
5.5.1.	Redundância da rede de comunicação.....	97
5.5.2.	Algoritmos de árvores de abrangência (<i>spanning tree protocols</i>)	101
5.6.	Segurança da rede de comunicação.....	103
5.6.1.	Sistemas de comunicação: Requisitos de segurança e ameaças	104
5.6.2.	Redes Privadas Virtuais (VPNs)	106
5.7.	Sumário	107

Capítulo 6

Sistemas de Protecção, Comando e Controlo: Estudo e optimização das soluções actuais do sistema de comunicação.....		109
6.1.	Rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo	109
6.1.1.	Rede de comunicação: optimização da arquitectura física actual	112
6.2.	Rede de comunicação: soluções comerciais	113
6.2.1.	Rede de comunicação: solução da Moxa	114
6.2.2.	Rede de comunicação: solução da Ruggedcom.....	116
6.2.3.	Rede de comunicação: solução da Cisco	121
6.2.4.	Segurança da rede de comunicação: solução da Ruggedcom.....	122
6.3.	Sumário	123

Capítulo 7

Novas tendências tecnológicas aplicáveis aos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição.....		125
7.1.	Estudo de tecnologias de comunicação entre subestações	125
7.1.1.	Comunicação por <i>Power Line</i> (PLC)	126
7.1.2.	Comunicação por satélite	126
7.1.3.	Comunicação por fibra óptica	127
7.1.4.	Comunicação sem fios (<i>wireless</i>)	127
7.2.	Utilização da norma CEI61850 para comunicação com o exterior	128
7.3.	Utilização de um sistema de sensores <i>wireless</i> na subestação.....	129
7.4.	Implementação do barramento de processo (<i>process bus</i>) definido pela norma CEI61850	132
7.5.	Sumário	134

Capítulo 8

Conclusões e trabalho futuro		135
8.1.	Conclusões.....	135
8.2.	Propostas de trabalhos futuros	137

Apêndice A

Classificação das Protecções pela Nomenclatura ANSI/IEEE		139
--	--	-----

Lista de figuras

Figura 2.1 - Esquema simplificado de um relé electromecânico de atracção [1].	4
Figura 2.2 - Arquitectura interna de um relé estático [2].	5
Figura 2.3 - Arquitectura interna de um relé numérico [1].	7
Figura 2.4 - Circuito equivalente de um transformador de tensão [1].	9
Figura 2.5 - Circuito equivalente de um transformador de intensidade [1].	10
Figura 2.6 - Influência da componente CC de saturação na corrente do secundário do TI [1].	10
Figura 2.7 - Curva de magnetização de um TI [1].	11
Figura 2.8 - Arquitectura proposta para integração dos sistemas de automação e protecção [6].	13
Figura 2.9 - Integração do Sistema de Gestão de Dados (DMS) e do Sistema de Supervisão, Comando e Controlo (SCADA) da subestação [6].	15
Figura 2.10 - Camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) [7].	18
Figura 2.11 - Topologias de ligação de equipamentos numa rede de comunicação [7].	19
Figura 2.12 - Exemplo de uma arquitectura para o sistema de automação da subestação (SAS) [8].	22
Figura 3.1 - Requisitos associados ao sistema de comunicação [9].	27
Figura 3.2 - Camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) [11].	28
Figura 3.3 - Modelo de organização lógica dos dispositivos definido pela norma [12].	30
Figura 3.4 - Estrutura de um objecto segundo a norma [9].	31
Figura 3.5 - Serviços definidos pela CEI61850 e protocolos de comunicação associados [9]. ...	31
Figura 3.6 - Modelização do conceito de barramento de processo [9].	33
Figura 3.7 - Modelo da subestação definido pela norma [9].	35
Figura 4.1 - Organização da aparelhagem numa subestação.	39

Figura 4.2 - Armários de Comando e Controlo do edifício de comando.....	40
Figura 4.3 - Esquema unifilar do painel de linha AT [14].	41
Figura 4.4 - Esquema unifilar do painel de potencial de barras e interbarras AT [15].	41
Figura 4.5 - Esquema unifilar do painel do transformador de potência [16].	41
Figura 4.6 - Armários de Comando e Controlo do edifício de comando.....	42
Figura 4.7 - Quadro Metálico de Média Tensão do edifício de comando.	43
Figura 4.8 - Esquema unifilar do painel de linha MT [17].	43
Figura 4.9 - Esquema unifilar do painel de chegada do transformador de potência [18].	43
Figura 4.10 - Esquema unifilar do painel da bateria de condensadores [19].	44
Figura 4.11 - Esquema unifilar do painel de TSA, RN e potencial de barras MT [20].	44
Figura 4.12 - Aspectos considerados na especificação técnica dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo de uma subestação de distribuição [13].	45
Figura 4.13 - Modelo de organização dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações.	46
Figura 4.14 - Funções desempenhadas pela Unidade Central, instalada num Armário de Comando e Controlo do edifício de comando.	47
Figura 4.15 - Aplicações e serviços disponibilizados pelos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo de uma subestação de distribuição.	47
Figura 4.16 - Aplicações e serviços complementares dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo.	48
Figura 4.17 - Arquitectura para o sistema de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) utilizada pela Efacec até 2005.	59
Figura 4.18 - - Arquitectura Mestre-Escravo com topologia em anel utilizando o protocolo SPA Bus [31].	60
Figura 4.19 - Diagrama de blocos de um nó típico de uma rede LonWorks [32].	61
Figura 4.20 - Topologias possíveis para uma rede LonWorks [33].	61
Figura 4.21 - Arquitectura para o sistema de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) utilizada pela ABB até 2006.	62
Figura 4.22 - Arquitectura física de ligação das unidades de painel ao acoplador RER111 da ABB, no edifício de comando da subestação de Tondela.	63
Figura 4.23 - Exemplo de um <i>switch</i> (fabricado pela MOXA) utilizado para ligar as várias unidades de painel existentes nos armários do edifício de comando [34].	64
Figura 4.24 - Arquitectura física da rede de comunicação actual utilizada nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) do edifício de comando das subestações de distribuição.	65

Figura 4.25 - Arquitectura física da rede de comunicação actual utilizada nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) do edifício de comando das subestações de distribuição.	66
Figura 4.26 - Esquematização de um cabo de fibra óptica monomodo utilizado na rede de comunicação.	67
Figura 4.27 - Pares entrelaçados de um cabo UTP categoria 3 (4.26a) e categoria 5 (4.26b) [11].	67
Figura 5.1 - Exemplo de uma divisão hierárquica dos protocolos de uma rede de comunicação organizada em camadas [35].	70
Figura 5.2 - Exemplo de uma pilha protocolar típica num sistema de comunicação [35].	70
Figura 5.3 - Relação entre o modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) e a Ethernet [37].	74
Figura 5.4 - Representação genérica da camada Física da Ethernet.	74
Figura 5.5 - Topologias de ligação das tecnologias Ethernet 10Base5, 10Base2 e 10Base-T [11].	76
Figura 5.6 - Formato de uma trama Ethernet [11].	77
Figura 5.7 - Esquematização de um switch Ethernet com várias portas de comunicação [11].	78
Figura 5.8 - Domínios de colisão numa rede de comunicação com um <i>switch</i> [38].	79
Figura 5.9 - Estrutura interna de um switch [36].	80
Figura 5.10 - Formato da trama Ethernet definida na norma IEEE802.1q [41].	81
Figura 5.11 - Modos de transmissão <i>half duplex</i> e <i>full duplex</i> entre dois equipamentos.	84
Figura 5.12 - Arquitectura da rede de comunicação, baseada em Ethernet Gigabit, para o nível da estação do sistema de automação da subestação [42].	87
Figura 5.13 - Arquitectura de comunicação entre o nível das unidades de painel e o nível do processo, numa rede baseada em Ethernet Gigabit [42].	88
Figura 5.14 - Relação entre o modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) e o modelo TCP/IP [11].	90
Figura 5.15 - Formato da trama utilizada pelo protocolo de internet (IP) [11].	91
Figura 5.16 - Formato dos endereços do protocolo de Internet (IP), versão IPv4 [11].	92
Figura 5.17 - Interligação entre diferentes redes de comunicação [11].	92
Figura 5.18 - Parâmetros de configuração de um equipamento da rede de comunicação.	93
Figura 5.19 - Exemplo de duas Redes de Área Local Virtuais (VLANs) implementadas com base num único switch.	94
Figura 5.20 - Exemplo de duas Redes de Área Local Virtuais (VLANs) implementadas com base em dois switches.	95

Figura 5.21 - Redundância da rede de comunicação com base nas várias camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI).	97
Figura 5.22 - Arquitectura de um sistema com redundância cíclica [44].	98
Figura 5.23 - Arquitectura de um sistema com redundância estática [44].	99
Figura 5.24 - Rede de comunicação com ligações redundantes entre switches [44].	99
Figura 5.25 - Rede de comunicação com uma topologia em duplo anel [44].	100
Figura 5.26 - Rede de comunicação com duas Redes de Área Local (LANs) [44].	100
Figura 5.27 - Exemplo de uma rede de área local (LAN) com 3 bridges (switches) [46].	101
Figura 5.28 - Definições das portas dos switches constituintes de uma árvore de abrangência [47].	102
Figura 5.29 - Ameaças de segurança ao sistema de comunicação da subestação [52].	105
Figura 5.30 - Medidas contra as ameaças de segurança ao sistema de comunicação da subestação [52].	105
Figura 6.1 - Arquitectura actual das redes de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição.	111
Figura 6.2 - Arquitectura da rede de comunicação baseada em switches [41].	112
Figura 6.3 - Switch de camada 2 [54].	114
Figura 6.4 - Switch de camada 3 [54].	114
Figura 6.5 - Arquitectura para a rede de comunicação dos sistemas de protecção, comando e controlo proposta pelo fabricante Moxa [53].	115
Figura 6.6 - Arquitectura dos primeiros sistemas de comunicação utilizados nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição [55].	117
Figura 6.7- Arquitectura dos sistemas de comunicação, utilizados nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição, baseada na tecnologia Ethernet [55].	118
Figura 6.8 - Arquitectura dos sistemas de comunicação, utilizados nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição, baseada nas especificações da norma CEI61850 [55].	119
Figura 6.9 - Arquitectura para a rede de comunicação dos sistemas de protecção, comando e controlo com equipamentos da Ruggedcom.	120
Figura 6.10 - Switch Ethernet RSG2200 da Ruggedcom [56].	120
Figura 6.11 - Switch Ethernet IE3000 da Cisco [57].	122
Figura 6.12 - Perímetro de segurança para a rede de comunicação da subestação assegurado pela aplicação Gauntlet desenvolvida pela Ruggedcom [58].	122
Figura 7.1 - Modelo de comunicação proposto pela EPON para a interconexão de várias subestações [60].	129

Figura 7.2 - Exemplo de uma arquitectura da rede de comunicação da subestação baseada em tecnologia <i>wireless</i> [61].	130
Figura 7.3 - Instalação de um sensor de corrente utilizando comunicações <i>wireless</i> [61]. ...	131
Figura 7.4 - Subestação com Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) instalados no parque exterior [62].	132
Figura 7.5 - Arquitectura do barramento do processo (<i>process bus</i>) definido pela norma CEI61850 [63].	133
Figura 7.6 - Unidades de campo (bricks) utilizados no barramento do processo [63].	133
Figura 7.7 - Painéis de chegada do edifício de comando (<i>Cross-Connect Panel</i>) [63].	134

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) [7].	18
Tabela 2.2 - Descrição das funções básicas dos Sistemas de Automação das Subestações [8].	20
Tabela 3.1 - Organização da norma CEI61850 [9].	28
Tabela 3.2 - Tipos de mensagens definidos para os vários serviços e respectivas classes de desempenho [10].	33
Tabela 3.3 - Descrição dos diferentes tipos de ficheiros SCL [12].	34
Tabela 4.1 - Funções desempenhadas pelos diferentes módulos de um IED [13].	46
Tabela 4.2 - Caracterização dos serviços disponibilizados pelos SPCC [13].	48
Tabela 4.3 - Caracterização técnica dos teleserviços dos SPCC [13].	49
Tabela 4.4 - Funções complementares existentes em cada unidade de painel do edifício de comando.	54
Tabela 4.5 - Funções complementares existentes em cada unidade de painel do edifício de comando (continuação).	54
Tabela 4.6 - Funções de automatismo e respectiva localização.	55
Tabela 5.1 - Especificações técnicas de várias tecnologias Ethernet [11].	75
Tabela 5.2 - Funções críticas dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo e respectivos tempos máximos de actuação [39].	82
Tabela 5.3 - Especificações técnicas da tecnologia Fast Ethernet [11].	83
Tabela 5.4 - Especificações técnicas da tecnologia Gigabit Ethernet [11].	84
Tabela 5.5 - Definição das Redes de Área Locais Virtuais (VLANs) com base no endereço de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) dos equipamentos.	96
Tabela 5.6 - Definição das Redes de Área Locais Virtuais (VLANs) com base no endereço de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) dos equipamentos.	96
Tabela 6.1 - Características gerais dos switches Ethernet da Moxa [34].	116

Tabela A.1 - Códigos ANSI/IEEE para as funções de protecção.....	140
--	-----

Abreviaturas

Lista de abreviaturas

ACC	Armário de Comando e Controlo
ACSI	<i>Abstract Communication Substation Interface</i>
AT	Alta Tensão
CDC	<i>Common Data Class</i>
CEI	Comissão Electrotécnica Internacional
CL	<i>Connection Less</i>
CO	<i>Connection Oriented</i>
DAS	<i>Data Acquisition System</i>
DMS	<i>Data Management System</i>
DST	Descarregador de Sobre Tensão
EDP	Energias de Portugal
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSE	<i>Generic Substation Event</i>
GSSE	<i>Generic Status Substation Event</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>
MT	Média Tensão
MU	<i>Merging Unit</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PRE	Produtores em Regime Especial
QMMT	Quadro Metálico de Média Tensão
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SAS	Sistema de Automação da Subestação

SCL	<i>Substation Configuration Language</i>
SNTP	<i>Simple Network Time Protocol</i>
SPCC	Sistema de Protecção, Comando e Controlo
SV	<i>Sampled Values</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TI	Transformador de Intensidade
TT	Transformador de Tensão
UCA	<i>Utility Communication Architecture</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação resulta de uma proposta que visa a realização de um estudo, análise e caracterização da arquitectura das redes de comunicações dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição. Pretende-se, desta forma, obter uma melhor especificação e optimização no projecto destes sistemas a nível das comunicações, uma vez que já existe uma boa especificação a nível das funções de protecção, comando e controlo.

Segundo o projecto tipo de subestações AT/MT, actualmente o sistema de automação de uma subestação utiliza equipamentos digitais que devem estar interligados de forma a intercomunicarem, constituindo um sistema único, no qual se integra o Sistema de Protecção, Comando e Controlo. A ligação entre os equipamentos primários da subestação e os equipamentos do SPCC é feita por intermédio de ligações eléctricas fio a fio com cabos de alta tensão. Por sua vez, a ligação entre os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) dos SPCC e a unidade central de processamento da subestação (unidade responsável pelas funções de comando e controlo de toda a subestação) é feita através de uma rede de comunicação de dados.

As principais motivações da realização deste trabalho passam por perceber qual o impacto da utilização da norma CEI61850 nos sistemas de comunicação dos SPCC das subestações de distribuição, procedendo-se ao estudo de várias arquitecturas e fazendo análises comparativas entre as mesmas. De forma a dar o melhor seguimento à concretização destes objectivos, o desenvolvimento desta dissertação foi organizado em várias etapas e pontos de estudo. Inicialmente é feito um estudo relativo à evolução dos relés de protecção, integração entre o sistema de protecção e o sistema de automação, bem como uma descrição das principais vantagens e benefícios da aplicação da norma CEI61850. Numa fase seguinte será feita uma caracterização dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações em termos das suas funcionalidades e evolução das arquitecturas da rede de comunicação. No seguimento da dissertação, são apresentados os principais protocolos utilizados na rede de comunicação das subestações, abordando-se, igualmente, aspectos relacionados com a sua fiabilidade e segurança. Numa fase final é feita uma referência a algumas soluções comerciais para os sistemas de comunicação da subestação propostas por fabricantes com a Moxa, Ruggedcom e Cisco, terminando com uma apresentação relativa às novas tendências tecnológicas aplicáveis a estes mesmos sistemas.

1.1. Estrutura do documento

No capítulo 1 começa-se por fazer um enquadramento do trabalho que se propõe realizar no âmbito da dissertação.

No capítulo 2 é apresentado um breve estudo relativo à evolução dos relés de protecção, desde os electromecânicos até aos digitais. Seguidamente, é feita uma referência aos erros associados aos Transformadores de Intensidade e Transformadores de Tensão. As secções finais deste capítulo são dedicadas ao estudo da evolução dos sistemas de automação das subestações, encerrando-se o capítulo com uma descrição sucinta do impacto da norma CEI61850 neste tipo de sistemas.

No capítulo 3 é apresentado o contributo da norma CEI61850 nas subestações de distribuição. Começam-se por apresentar as motivações que levaram à sua criação, abordando-se, posteriormente, a sua organização e os principais aspectos que especifica. Na parte final do capítulo referem-se os principais benefícios e desafios desta norma.

No capítulo 4 é feita uma caracterização dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição. Começa-se por descrever a forma como está organizado o edifício de comando da subestação, referindo-se posteriormente quais as funções de protecção associadas a cada painel constituinte da sua instalação primária. Posteriormente, apresentam-se as principais funcionalidades asseguradas pelos SPCC, encerrando-se o capítulo com a apresentação da evolução das arquitecturas de rede de comunicação das subestações.

No capítulo 5 apresentam-se os principais protocolos e tecnologias de comunicação utilizados no sistema de comunicação dos SPCC, sendo que é dado especial destaque à Ethernet. A prossecução do capítulo é garantida com o estudo da fiabilidade da rede de comunicação, encerrando-se o capítulo com uma referência relativa à segurança da mesma.

No capítulo 6 é apresentada a arquitectura física da rede de comunicação actual dos SPCC, propondo-se alguns aspectos relativos à sua optimização. Posteriormente, apresentam-se algumas soluções comerciais desenvolvidas por fabricantes de equipamentos de comunicação como a Moxa, a Ruggedcom e a Cisco. A parte final do capítulo descreve uma solução integrada desenvolvida pela Ruggedcom para segurança da rede de comunicação da subestação.

No capítulo 7 é feita uma breve referência às novas tendências tecnológicas passíveis de serem aplicadas às subestações de distribuição. Começa-se por apresentar possíveis tecnologias a utilizar para comunicação entre subestações. Nas secções seguintes abordam-se questões relativas à utilização da norma CEI61850 para comunicação com o exterior da subestação e de redes de sensores *wireless* na instalação. O capítulo termina com uma referência às implicações da utilização do barramento do processo (*Process Bus*) definido pela norma CEI61850 nas subestações de distribuição.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Evolução dos sistemas de protecção

Neste capítulo será feita uma descrição acerca da evolução dos sistemas de protecção das subestações de energia eléctrica. Começar-se-á por descrever a evolução registada a nível dos equipamentos de protecção, nomeadamente dos relés de protecção. Posteriormente, será feita uma breve apresentação dos erros associados aos equipamentos de medida, nomeadamente Transformadores de Tensão e Transformador de Intensidade. Por último, será feita uma descrição acerca da integração entre o sistema de automação e o sistema de protecção das subestações, apresentando-se também a normalização de referência aplicável a estes mesmos sistemas.

2.1. Relés de protecção

Nesta secção será apresentado um estudo dos equipamentos, com ênfase nos relés de protecção relativamente à sua evolução desde a altura em que começaram a ser utilizados nos Sistemas Eléctricos de Energia até à actualidade. Assim, pretende-se ter uma melhor percepção sobre aspectos como a distinção entre as funcionalidades disponibilizadas pelos equipamentos mais antigos face aos que hoje são utilizados e, até mesmo, o que permitiu que comessem a ter interfaces para comunicações industriais, capazes de assegurar a interacção e troca de dados através de uma rede de comunicação.

Um relé de protecção é um dispositivo cuja principal função passa por “monitorizar” o sinal que recebe, sendo que este corresponde a uma determinada grandeza. O relé actua no caso desta grandeza (por exemplo, amplitude) diferir dos valores que se consideram pertencer ao funcionamento normal, isto é, sem ocorrência de defeitos. Estes valores são previamente configurados, aquando da instalação e fase de testes do equipamento. Caso a amplitude do sinal de entrada atinja um valor indesejável e potencialmente prejudicial para o sistema o relé executa uma função específica, que num caso mais simples pode ser abrir os contactos eléctricos de um disjuntor. Os relés podem ser classificados quanto aos seus aspectos construtivos, sinal de entrada e função de protecção que executam [1]. De um ponto de vista do enquadramento histórico da sua evolução, olhar para a forma como começaram a ser construídos os primeiros relés e comparar com a tecnologia actualmente utilizada ajudará

a perceber quais os prós e contras relativos a cada tipo de equipamento, sendo que se dará especial ênfase aos relés electromecânicos, estáticos e digitais (numéricos).

Os primeiros relés electrónicos para aplicação na protecção dos Sistemas Eléctricos de Energia (SEE) começaram a aparecer na literatura a partir de 1928. A partir dessa data e até início dos anos 50, muitos estudos e publicações foram tornadas públicas expondo circuitos a utilizar nos diversos tipos de protecção baseada nestes equipamentos. Em todos estes documentos surgia um elemento em comum que era a utilização de válvulas eléctricas como órgão interno do relé. Contudo, as válvulas apresentavam algumas desvantagens, tais como o seu grande volume e alto consumo energético, que foram aspectos suficientes para inviabilizar a sua aplicação, juntamente com o facto de em finais dos anos 40 se assistir ao advento dos transístores e outros dispositivos electrónicos de estado sólido [2]. Note-se que se começava a assistir a uma tendência para substituir os relés electromecânicos por relés estáticos, por haver a convicção que a sua utilização traria inúmeras vantagens.

Os relés electromecânicos tinham subjacentes algumas questões que conseguiram influenciar o ritmo de desenvolvimento dos relés estáticos, das quais se destacam o facto de serem bastante robustos e fiáveis, do seu processo de manufactura estar bem normalizado, ser pouco complexo e requerer tempos para manutenção dos equipamentos reduzidos [2]. Desta forma, percebe-se o motivo pelo qual havia alguma renitência em dar o salto para os relés estáticos destronando a utilização dos relés electromecânicos para segundo plano.

2.1.1. Relés electromecânicos

Em [1] é feita uma apresentação e caracterização dos relés electromecânicos e numéricos. Os relés electromecânicos foram os primeiros que surgiram. Estes equipamentos, também conhecidos por relés electromagnéticos, são constituídos com base em componentes mecânicos, eléctricos e magnéticos, sendo reconhecidos pela sua excelente robustez e fiabilidade. Quanto aos seus aspectos construtivos são divididos em três tipos: relés de atracção, relés com bobinas móveis e relés de indução. Na Figura 2.1 apresenta-se um esquema simplificado que ilustra a constituição básica dos relés de atracção.

Quando a bobina é percorrida por uma corrente é induzido um campo magnético que atrai a armadura do relé estabelecendo a passagem da corrente eléctrica entre os contactos. Embora não se apresentem os outros tipos de relés electromecânicos, refira-se apenas que também estes se baseiam no fluxo magnético e nas forças por ele geradas [1].

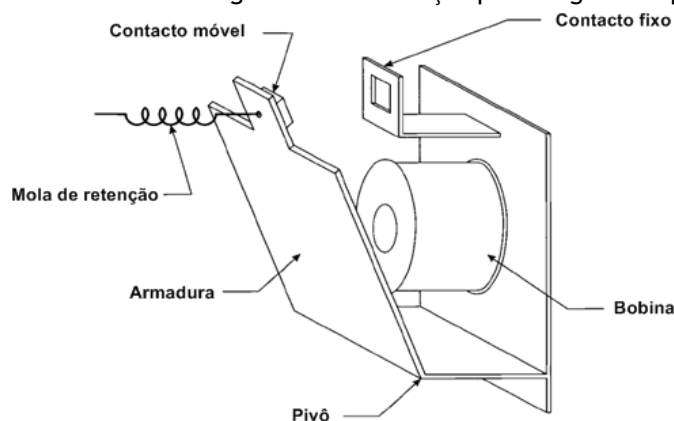


Figura 2.1 - Esquema simplificado de um relé electromecânico de atracção [1].

2.1.2. Relés electroestáticos

Os relés electroestáticos aparecem caracterizados principalmente pelo facto do hardware ser baseado em componentes de estado sólido, entre os quais se destacam os transístores, díodos, condensadores e resistências. A sua utilização permitiu que funções como as de medição e comparação começassem a ser realizadas por circuitos concebidos com estes mesmos componentes, sem que fosse necessário incluir partes mecânicas móveis, ao invés do que acontecia com os relés electromecânicos. Nos relés electromecânicos, a função de medição era baseada no equilíbrio entre forças mecânicas e magnéticas no interior do relé, sendo que os contactos eléctricos se moviam, estabelecendo ou cortando a passagem de corrente eléctrica, sempre que as condições de equilíbrio entre estas mesmas forças se deixavam de verificar [2].

Esta alteração a nível da concepção dos relés trouxe consigo diversas vantagens, entre as quais o aumento das velocidades de operação e dos ciclos de vida, diminuição da manutenção necessária devido à inexistência de partes móveis e inércia mecânica, fricção e batimentos entre contactos, maior resistência ao choque e vibrações, maior sensibilidade e diminuição das suas dimensões. Contudo, a utilização de semicondutores impõe algumas limitações relacionadas com a sua sensibilidade a alterações de temperatura e picos de tensão, bem como a possibilidade de serem provocados danos devido à ocorrência de sobrecargas. Contudo, que estes problemas podem ser superados utilizando circuitos que façam a compensação da temperatura, filtragem dos sinais e blindagem que proteja os componentes internos dos relés de interferências electromagnéticas externas [2].

Em termos funcionais os relés electroestáticos obtêm variáveis como a tensão, corrente e frequência recorrendo a operações aritméticas realizadas sobre os sinais analógicos disponibilizados à entrada da sua unidade de medida. Relativamente à sua saída, esta é sempre um sinal binário, isto é, um sinal ao qual estão associados dois estados, sendo que num o relé conduz e noutro interrompe a passagem de corrente eléctrica [2]. A Figura 2.2 apresenta a arquitectura base dos relés electroestáticos, que assegura o funcionamento descrito.

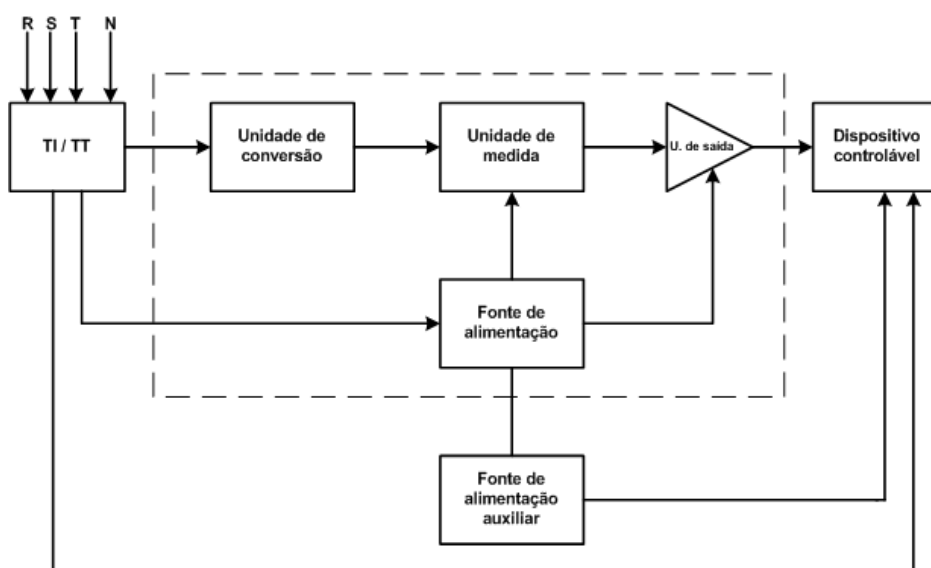


Figura 2.2 - Arquitectura interna de um relé estático [2].

Os sinais disponibilizados à saída dos Transformadores de Intensidade (TI) e Transformadores de Tensão (TT) alimentam a unidade de conversão que os converte de forma a facilitar o seu processamento na unidade de medida. A unidade de medida, por sua vez, irá operar sempre que o sinal de entrada atingir um determinado valor definido, emitindo, neste caso, um sinal de fecho à unidade de saída (U. de saída), que o amplifica com o intuito destes sinais poderem ser ligados aos dispositivos controláveis. Os dispositivos controláveis têm a missão de guiar a função final de comutação, podendo esta ser, por exemplo, a abertura de disjuntores [2].

2.1.3. Relés numéricos

Os avanços registados a nível dos microprocessadores e do processamento de sinal em conjunto com o aparecimento dos primeiros relés estáticos projectados em circuitos integrados a partir da década de 70, culminou no desenvolvimento dos primeiros relés de protecção baseados em microprocessadores programáveis. Esta inovação permitiu que passasse a ser possível associar mais do que uma função ao mesmo equipamento. A tecnologia inerente aos microprocessadores continuou a evoluir a par dos algoritmos matemáticos. Neste sentido, reuniram-se condições para que se desse a passagem dos relés estáticos para os numéricos ou digitais, que aos poucos começaram a ser cada vez mais utilizados devido ao seu carácter multifuncional, fiável e custo relativamente baixo [1].

O princípio básico de funcionamento de operação dos relés numéricos consiste numa amostragem periódica dos sinais de entrada, actuando nas saídas com o intuito de proteger e controlar o sistema no qual estes relés estão inseridos. Depois do sinal de entrada ser amostrado, são realizados cálculos que permitem converter os valores das sucessivas amostragens num valor final que corresponda às grandezas do sinal de entrada. O carácter multifuncional de grande parte destes relés levou a que fossem designados actualmente por Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs). Para que todas as funcionalidades sejam utilizadas de forma adequada e personalizada ao sistema, os IEDs disponibilizam uma plataforma de programação lógica de forma a tornar ainda mais flexível para o operador a utilização e implementação das suas funcionalidades. Assim, garante-se um maior nível de personalização das funções de protecção, tendo em vista satisfazer os requisitos do sistema que se pretende proteger. É igualmente comum encontrar nestes equipamentos Interfaces Homem-Máquina (HMI), entradas e saídas programáveis e interfaces para vários tipos de comunicação, para que seja simplificado o acesso à sua configuração e utilização [1]. Genericamente, estes relés apresentam uma arquitectura semelhante à apresentada na Figura 2.3.

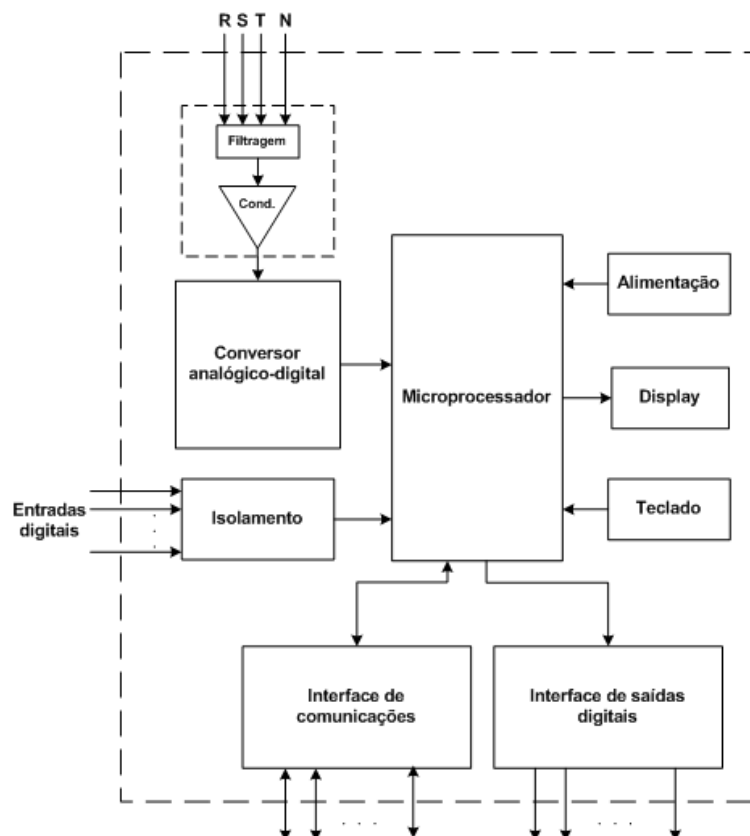


Figura 2.3 - Arquitectura interna de um relé numérico [1].

Como é possível comprovar pela análise da Figura 2.3 e segundo [1], estes relés contêm dois módulos de entradas: um para sinais analógicos e outro para sinais digitais. Relativamente aos analógicos, estes correspondem aos valores de tensão e corrente de cada uma das fases e do neutro, disponibilizados pelos Transformadores de Intensidade e Transformadores de Tensão. Estes sinais começam por passar por um filtro passa-baixo para que o ruído electromagnético, induzido nas linhas, seja eliminado. Daí seguem para uma unidade de condicionamento que converte estes sinais para um sinal em corrente contínua normalizado que, por sua vez, é digitalizado pelo conversor analógico-digital antes de ser enviado para o microprocessador. No que diz respeito às entradas digitais, estas recebem, principalmente, informação relativa ao estado dos disjuntores e de outros equipamentos existentes na subestação. Antes de serem ligados ao microprocessador, os sinais digitais passam por um circuito que garante o isolamento eléctrico entre os sinais de chegada e os circuitos internos do relé, no sentido de o proteger contra potenciais danos provocados por defeitos nestes mesmos sinais [1].

O microprocessador realiza o processamento dos algoritmos das funções de protecção e armazena na sua memória as variáveis de entrada necessárias às diversas tarefas por ele asseguradas, bem como todos os programas. A interface de saídas digitais é a unidade intermediária entre os sinais enviados pelo microprocessador como resultado das suas operações e o equipamento exterior que controla. Esse equipamento exterior pode ser, por exemplo, um disjuntor. Neste caso o microprocessador envia um sinal digital que gera um impulso, que depois de condicionado e isolado pelos circuitos existentes na interface em causa, comanda os contactos do disjuntor. Por último, a interface de comunicações permite que se possa trocar informação com o relé através de uma rede de comunicação de dados,

disponibilizando para isso vários tipos de portas, como é o caso das portas série e portas paralelas [1].

Analizadas as principais características dos relés numéricos, pode-se concluir que este tipo de relés introduziu novas funcionalidades, bem como um melhoramento daquelas que já eram funções de protecção realizadas pelos outros tipos de relés, como os electromecânicos e electrostáticos. Entre todas as características dos relés numéricos destacam-se as referidas em [1]:

- **Fiabilidade;**
- **Auto diagnóstico:** os relés digitais possuem um circuito de watchdog que faz o diagnóstico dos seus vários módulos. No caso de ocorrer uma falha nalgum destes módulos o relé deverá sair de funcionamento ou tentar recuperar, dependendo da gravidade da falha;
- **Registo de eventos e perturbações:** estes relés estão preparados para criar um registo de diversas ocorrências, tais como o disparo de uma protecção ou uma falha no seu hardware interno. Também podem ser gerados registos de ocorrência de perturbações juntamente com informação relativa ao estado de todas entradas e saídas dos relés, num determinado número de canais analógicos;
- **Integração de sistemas digitais:** estes equipamentos permitem assegurar uma série de novas funcionalidades dentro da instalação da subestação, como é o caso de estarem aptos a comunicar através de uma rede de comunicação de dados e realizarem operações de medida e controlo, ao invés do que acontecia com os antigos tipos de relés. O objectivo final é integrar todas estas funções de forma a conceber um sistema totalmente digital para que a subestação funcione de modo mais rápido e fiável;
- **Protecção adaptativa:** o facto destes equipamentos terem módulos de programação lógica e de comunicação permite que as suas configurações possam ser alteradas em tempo real, de acordo com o regime de funcionamento da subestação e os respectivos requisitos das funções de protecção neles implementados.

No que concerne às principais funções disponibilizadas pelos relés numéricos destacam-se, igualmente, as seguintes:

- Protecção;
- Medida;
- Controlo;
- Comunicações;
- Registo de eventos e alarmes.

2.2. Equipamentos de medida

Finalizada esta análise geral aos principais aspectos construtivos relacionados com os relés electromecânicos, electrostáticos e numéricos, regista-se a existência de um importante ponto comum entre si: estes relés recebem como sinais de entrada os sinais provenientes dos Transformadores de Intensidade (TI) e Transformadores de Tensão (TT). A principal finalidade dos TIs e TTs é isolar todos os dispositivos de protecção, controlo e monitorização dos equipamentos primários da subestação, sendo que, por vezes, também são utilizados para alimentar outros equipamentos. Os TIs e TTs são equipamentos muito importantes no que respeita ao correcto funcionamento dos relés, uma vez que qualquer erro registado ao nível da medição das correntes e tensões da subestação pode propagar-se para jusante e levar a que o relé funcione de forma indesejada e prejudicial para o sistema [1]. Desta forma, compreende-se que é fulcral perceber quais os erros associados aos TIs e aos TTs, tendo em vista a sua minimização e influência no que toca ao correcto funcionamento dos sistemas de protecção, atendendo a que não basta que estes sistemas estejam bem concebidos se os transformadores de medida disponibilizarem valores errados.

2.2.1. Transformadores de Tensão

Numa situação ideal, um TT, apresenta no secundário um valor proporcional à tensão que é aplicada no primário. Neste caso, não existem perdas e a tensão à saída do TT corresponde a menos de um factor (razão de transformação do transformador) ao valor da tensão de entrada. Para tal, é necessário garantir que as quedas de tensão nos enrolamentos do TT são baixas e que o fluxo magnético no seu núcleo apresenta um valor bastante abaixo do de saturação de forma a garantir que a corrente de magnetização é baixa [1].

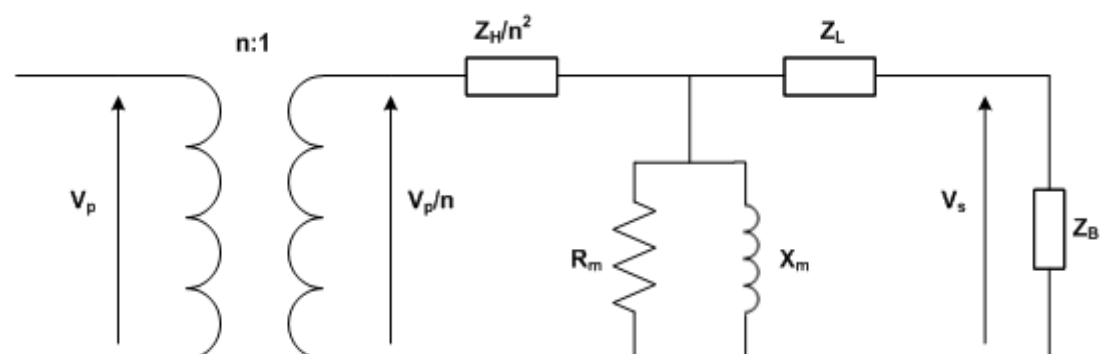


Figura 2.4 - Circuito equivalente de um transformador de tensão [1].

Os erros nos TTs devem-se a diferenças de amplitude e fase entre a tensão à saída do enrolamento secundário e nos terminais da carga. Estes erros dividem-se em erros que ocorrem em condições de circuito aberto, isto é, quando a impedância de carga, Z_B , é infinita, causando quedas de tensão devidas à circulação de corrente de magnetização no enrolamento primário e em erros devidos às quedas de tensão provocadas pela circulação da corrente da carga em ambos os enrolamentos do transformador [1].

2.2.2. Transformadores de Intensidade

Os Transformadores de Intensidade (TIs) podem saturar numa situação em que se verifiquem defeitos sucessivos na presença de elevados valores de corrente. Tendo isto em conta, torna-se um requisito garantir que o TI opere dentro da zona linear da sua curva de magnetização - Figura 2.7 - mesmo perante a ocorrência de defeitos bastante críticos para o sistema. Simultaneamente, é preciso também tentar garantir que o TI tem capacidade de fornecer sempre a corrente necessária ao correcto funcionamento do relé [1].

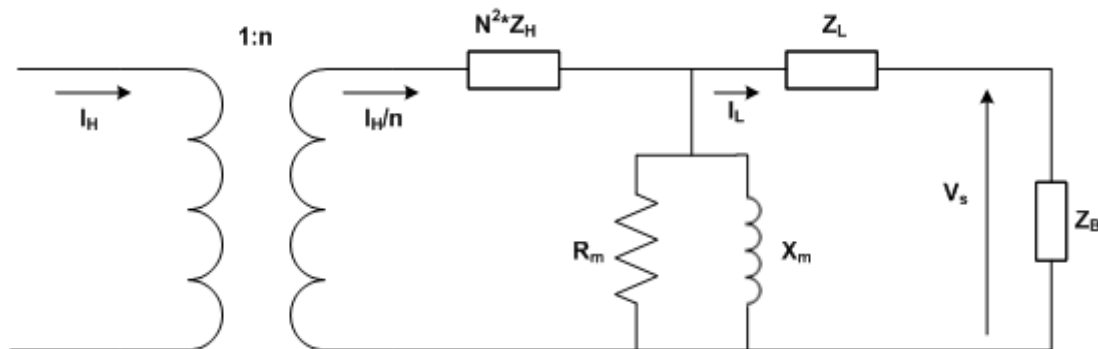


Figura 2.5 - Circuito equivalente de um transformador de intensidade [1].

Nos TIs os erros devem-se fundamentalmente à corrente que circula no ramo de magnetização, isto é, o valor do erro é igual à diferença entre a corrente I_H/n e a corrente I_L . Quando a corrente no secundário do TI começa a aumentar atinge um ponto a partir do qual o seu núcleo começa a saturar, caso em que a corrente de magnetização também começa a ficar elevada provocando erros excessivos. A saturação deve-se a uma componente de corrente alternada, considerada a única até ao momento, e outra de corrente contínua. A componente de corrente contínua tem maior influência que a de corrente alternada no que respeita à saturação do transformador, provocando uma diminuição da corrente no secundário, como se pode verificar pela análise da Figura 2.6 [1].

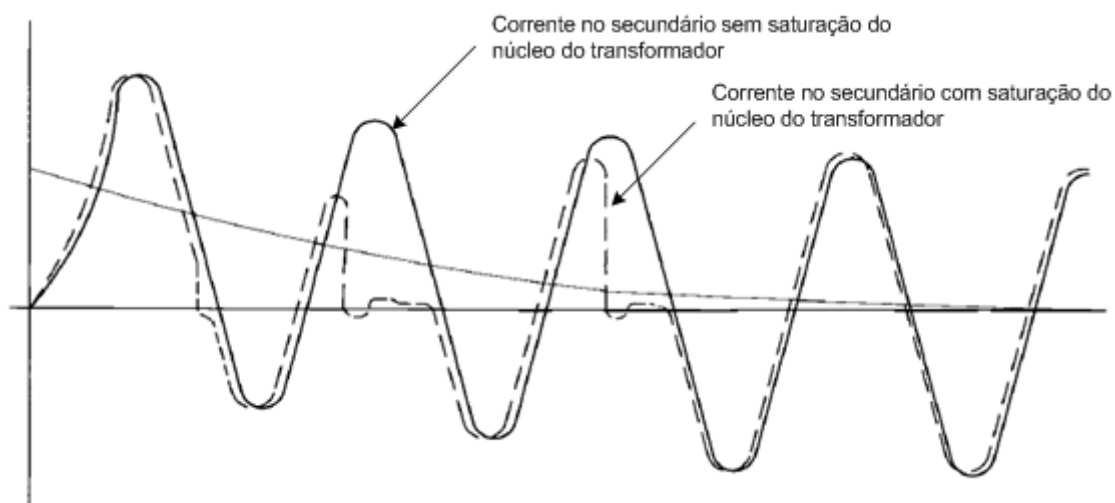


Figura 2.6 - Influência da componente CC de saturação na corrente do secundário do TI [1].

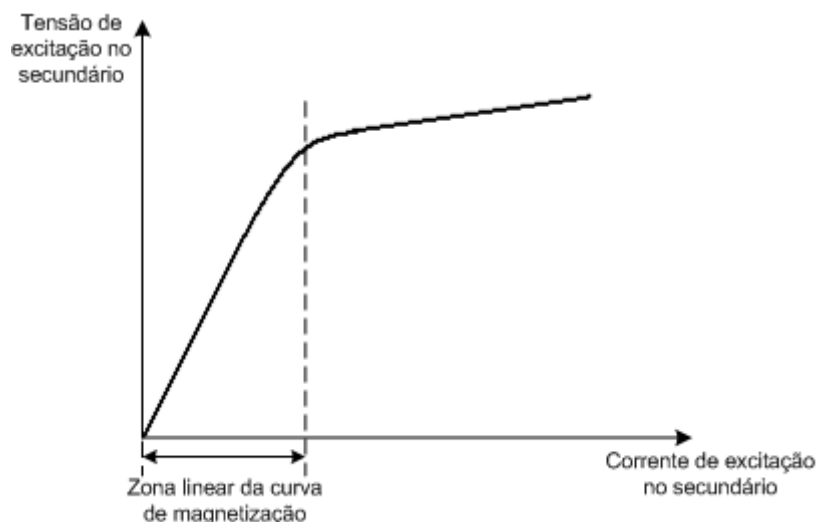


Figura 2.7 - Curva de magnetização de um TI [1].

2.3. Sistemas de protecção e automação das subestações

A partir da evolução em termos da concepção e desenvolvimento dos relés de protecção concluiu-se que se passou de um paradigma em que a cada relé estava associada uma só função específica, para outro em que com o mesmo relé se podem implementar diversas funções adaptáveis, em tempo real, ao regime de funcionamento da subestação, nos quais estão integrados. Assim, torna-se necessário perceber de que forma evoluíram os sistemas de protecção e automação das subestações no sentido de garantirem a monitorização, controlo e protecção de toda a instalação.

Desde meados da década de 70, equipas de engenheiros especializados começaram a procurar formas de utilizar os microprocessadores para aumentar e melhorar o controlo, protecção e monitorização das subestações de energia eléctrica. Assim, começou-se a estabelecer uma ligação entre os Sistemas de Aquisição, Comando e Controlo (SCADA) e os sistemas baseados em microprocessadores e outras tecnologias digitais associadas [3]. Em finais dos anos 70, começaram a ser realizados trabalhos de pesquisa e investigação relativos à concepção de sistemas integrados que conseguissem desempenhar todas as funções de controlo e protecção da subestação. O resultado deste trabalho culminou numa reconfiguração no que toca à interligação dos relés de protecção e dispositivos de controlo, dado que esta passou a ser feita com base em canais de comunicação de dados digitais, implementados sobre um suporte físico em fibra óptica. O objectivo final era conseguir uma redução substancial a nível de custo e tempo, bem como uma optimização da performance das funções implementadas e introdução de novas funcionalidades na subestação [4]. Refira-se que os relés de protecção são englobados na família dos Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs), pelo que se poderá utilizar esta designação para fazer referência aos relés de protecção.

2.3.1. Interface entre automação distribuída e sistemas de protecção

Em [5] são discutidas questões relativas à interface entre os equipamentos de automação distribuída e os equipamentos do sistema de protecção normalmente disposto na subestação, visando melhorar o seu funcionamento nomeadamente a nível de rapidez de operação, daí resultando uma diminuição dos danos provocados pelos defeitos que ocorrem dado que a subestação está menos tempo sujeita a eles.

A aplicação de um sistema de automação distribuído permite que as tarefas relativas ao funcionamento da subestação sejam executadas com o mínimo de intervenção humana, uma vez que a partir do momento em que são instalados ao longo da subestação equipamentos electrónicos baseados em microprocessadores é possível programá-los no sentido de tomarem decisões que antes estavam à responsabilidade de operadores humanos. Esta simbiose entre automação distribuída e sistemas de protecção teve um impacto notável a nível da implementação e instalação destes sistemas nas subestações. Este foi o caminho seguido em prol do melhoramento da fiabilidade dos sistemas de protecção, bem como da segurança de pessoas e equipamentos. Assim, começaram a surgir sistemas de Supervisão, Controlo e Aquisição de Dados (SCADA) mais sofisticados, com capacidade para detectar e identificar, com maior eficácia, defeitos ocorridos ao longo da instalação com base na informação enviada por dispositivos baseados em microprocessadores [5].

Com a introdução de dispositivos baseados em microprocessadores conseguiu-se garantir novas funcionalidades que até então estavam ainda muito incipientes, sendo que algumas nem sequer existiam. Com a introdução de dispositivos baseados em microprocessadores conseguiu-se maior controlo sobre os circuitos de religação automática, evitando-se, por exemplo, religações intempestivas. Para além disso, tinha-se maior monitorização das diversas variáveis relativas aos transformadores, entre as quais se destacam a temperatura e nível de óleo, temperatura dos enrolamentos e mudanças repentinas na pressão dos tanques. Por último, também estava garantido um maior grau de supervisão sobre todos os serviços da subestação como é o caso do fornecimento de energia eléctrica e das baterias, que suportam a continuidade de funcionamento dos sistemas de protecção em caso de falha da alimentação principal [5].

Pode-se concluir desta forma que a introdução de sistemas de automação distribuídos visa englobar todos os equipamentos, funções de protecção e automatismos relativos ao que é o funcionamento pretendido de uma subestação, sem que sejam descurados cuidados no que concerne à concepção de sistemas fiáveis e tolerantes a falhas. Neste sentido, comprova-se que a tendência é passar de um paradigma em que protecção e automação eram aspectos incorporados em sistemas independentes, para um outro paradigma em que o objectivo é integrar automação e protecção, constituindo um sistema único.

2.3.2. Solução integrada para protecção e automação de uma subestação

Finalizada uma primeira abordagem aos sistemas de automação e protecção na secção 2.3.1, torna-se agora necessário perceber de que forma é que estes sistemas podem ser arquitectados e implementados com o objectivo de constituir uma solução integrada numa subestação. Em [6] é apresentada e analisada uma solução relativa à integração de

automação e protecção numa subestação. Do ponto de vista da automação da subestação é estudada a associação dos Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) com o sistema de telecontrolo da subestação, efectuado com base num Sistema de Supervisão, Controlo e Aquisição de Dados (SCADA), sendo apresentada também uma solução que visa a integração entre o SCADA e o sistema de gestão de dados (DMS). Na solução apresentada, os IEDs são ligados ao computador central da subestação através de uma rede de comunicação local em fibra óptica. Este computador, por sua vez, funciona como uma unidade terminal remota (RTU) do sistema de telecontrolo da subestação, que assegura a comunicação com um centro de controlo remoto [6].

Nos sistemas convencionais, o software de SCADA da instalação estava centralizado e a capacidade de processamento de dados das RTUs era muito limitada. A introdução dos IEDs nas subestações permitiu que se comesçassem a conceber os sistemas segundo uma abordagem distribuída e garantiu uma maior capacidade de computação. Neste sentido, propõe-se uma arquitectura como a apresentada na Figura 2.8:

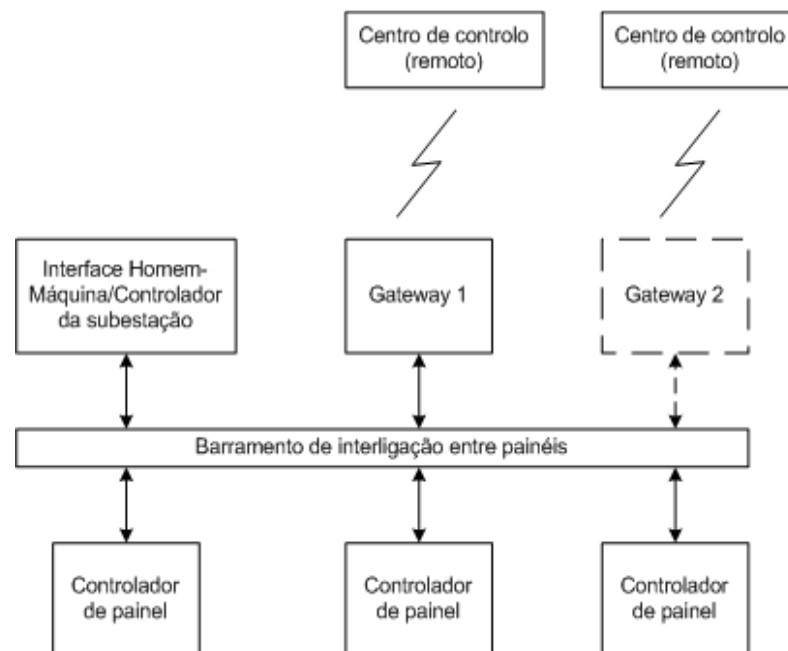


Figura 2.8 - Arquitectura proposta para integração dos sistemas de automação e protecção [6].

O facto de ser utilizada uma topologia em estrela para ligar todos os equipamentos significa que existe um único recurso, no caso o barramento de interligação entre painéis, por onde circula toda a informação trocada entre os mesmos, impondo que só um dos equipamentos possa usá-lo em cada instante de tempo. Assim, é necessário utilizar um protocolo que organize a forma como os dispositivos compartilham este canal para que não haja colisões provocadas pela tentativa de acesso simultâneo ao barramento por parte de dois equipamentos distintos. Com vista a ultrapassar este potencial problema, propõe-se a utilização do Carrier Sense Multiple Access/Colision Detection (CSMA/CD), que organiza a forma como os diferentes equipamentos partilham o canal de comunicação, detectando a ocorrência de colisões no mesmo [6].

A utilização da arquitectura apresentada na Figura 2.8 permite a transferência em tempo real de dados relativos à ocorrência de eventos nas unidades de painel (IEDs) para a unidade de controlo da subestação. Para além disto esta arquitectura assegura a comunicação horizontal entre equipamentos que permite, por exemplo, otimizar o funcionamento de algumas funções como encravamentos ou deslastre de cargas, bem como a possibilidade de introduzir outra unidade de controlo da subestação, para além da existente [6].

O sistema de automação da subestação pode estar implementado na unidade onde corre o controlador da subestação. A Interface Homem-Máquina (HMI) e as funcionalidades do controlador da subestação são as mesmas que estão disponíveis para os operadores do centro de comando, situado num local remoto ao da subestação. Aliás, o software de SCADA existente no computador do centro de controlo é directamente aplicável ao computador do controlador da subestação, verificando-se também o contrário [6].

Os dados transmitidos para o centro de controlo através dos gateways¹ incluem toda a informação processada no SCADA, sendo que este foi uma das inovações que permitiu a introdução de novas aplicações e funcionalidades nas subestações. Entre estas destacam-se a configuração remota dos parâmetros dos IEDs e monitorização da operação dos disjuntores. As funções residentes ao nível das unidades de painel incluem protecção com relés, automatismos de religação, leitura remota do estado, leitura de medidas e controlo dos disjuntores e outros equipamentos [6].

A integração entre o Sistema de Gestão de Dados (DMS) e o SCADA da subestação é apresentada na Figura 2.9. A troca de informação entre o DMS e o SCADA é bidireccional, sendo que o fluxo principal de dados verifica-se do SCADA para o DMS. A tarefa principal do SCADA é disponibilizar uma interface em tempo real que permita monitorizar os pontos mais importantes da subestação. Porém, devido aos requisitos dos tempos de resposta, o tamanho dos ficheiros e o número de variáveis tem de ser limitado. Tendo em conta estes factores, normalmente opta-se por arquitectar as bases de dados do SCADA de acordo com as necessidades da subestação onde será implementado. No que concerne ao DMS, o seu papel é assegurar um banco de armazenamento de dados de suporte às funções do sistema de automação, operação e protecção da subestação. Todavia, uma vez que a informação armazenada é muito vasta, torna-se necessário utilizar ferramentas que optimizem a manipulação dos dados e, consequentemente, a sua disponibilização, atendendo a que, em termos temporais, a operação de uma base de dados é relativamente lenta [6].

¹ Um gateway é um equipamento utilizado para fazer a interligação entre redes de comunicação. Neste caso, é o equipamento que garante a interligação entre a subestação e o centro de controlo remoto.

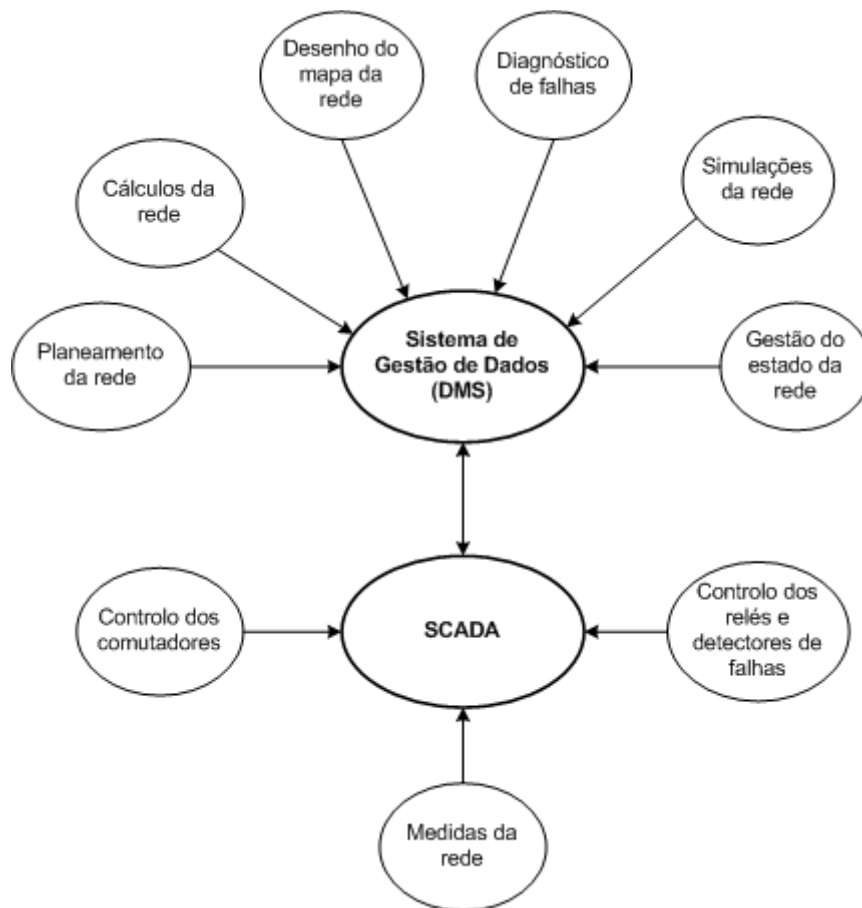


Figura 2.9 - Integração do Sistema de Gestão de Dados (DMS) e do Sistema de Supervisão, Comando e Controlo (SCADA) da subestação [6].

Em suma, um sistema de gestão eficiente de defeitos ocorridos durante o funcionamento da subestação pode ser baseado na integração de IEDs, de um software de SCADA e de um DMS. Esta integração permite que funcionalidades como a localização de defeitos, o isolamento automático das zonas que estão sob defeito e respectiva religação aquando da sua normalização, isto é, ausência de defeito, sejam realizadas de forma mais eficaz, rápida e fiável [6].

Segundo [7] a integração dos IEDs nos sistemas de protecção das subestações foi abrangida pelo facto de cada fabricante destes equipamentos usar protocolos de comunicação e softwares de Interface Homem-Máquina (HMI) proprietários. A evolução registada a nível dos computadores e redes de comunicação permitiu que se comesçassem a introduzir novas funcionalidades e otimizar as já existentes numa subestação, daí advindo um maior fluxo de informação proveniente dos vários equipamentos. Desta forma, tornou-se necessário desenvolver software com capacidade para converter todos os dados que recebe por parte dos IEDs em informação útil, utilizada nas tarefas de engenharia, manutenção ou qualquer operação pontual que seja necessário efectuar na subestação [7].

O tipo de dados tipicamente disponibilizados por um IED inclui valores de medições, ficheiros de configuração, registo de eventos, localização de defeitos, informações de manutenção e controlo dos disjuntores. Assim, a interoperabilidade entre IEDs tornou-se um requisito tendo em vista garantir funções de encravamento, protecção e controlo, bem como um aumento da eficiência das aplicações realizadas por estes mesmos equipamentos [7].

A introdução de um sistema de automação numa subestação tornou-se uma das ferramentas que contribuiu para uma redução de custos associados à instalação, manutenção e operação da subestação. Um dos principais obstáculos à integração dos Sistemas de Automação das Subestações (SAS) foi o facto dos IEDs de fabricantes distintos utilizarem diferentes protocolos de comunicação e diferentes interfaces para aquisição e armazenamento de dados, controlo e registo de ocorrência de defeitos nestas instalações. Estes obstáculos reduziam os benefícios trazidos pela integração do SAS devido à necessidade de instalar hardware adicional como conversores de protocolos de comunicação. Para além disso, também advinham custos relativos à necessidade de utilizar diferentes softwares e do tempo dispendido com a formação dos utilizadores para que aprendessem a operar com estes mesmos softwares [7].

A indústria entrou num processo de desenvolvimento de normalização que permitisse substituir os protocolos proprietários utilizados pelos vários fabricantes nos seus equipamentos por protocolos de comunicação normalizados. O objectivo principal passava por garantir que a interligação entre os equipamentos do SAS fosse possível, mesmo que estes equipamentos fossem de fabricantes diferentes. Esta tarefa de normalização não foi fácil e exigiu uma compreensão profunda da tecnologia existente e da tecnologia em desenvolvimento para a integração entre o sistema eléctrico e o SAS. Um dos principais pontos de estudo e análise passou pelos fundamentos relativos a uma rede de comunicação de dados e das possíveis arquitecturas a adoptar para o SAS [7].

Os protocolos de comunicação definem as regras e procedimentos a utilizar na rede de dados da subestação para assegurar a comunicação entre os IEDs e entre estes e a unidade central de processamento da subestação. Geralmente os protocolos de comunicação aparecem divididos em dois grupos: protocolos de alto nível, que definem o fluxo de dados (velocidade de transmissão e detecção de erros) e protocolos de baixo nível, que definem como é que os sinais são transmitidos através do meio físico (tipo de meio físico e características eléctricas do sinal). Os dados são transmitidos em conjuntos de bits ou Bytes [7]. Existem três modos de transmissão que tipicamente se utilizam em sistemas de comunicação:

- **Simplex:** a transmissão é feita apenas num sentido. Neste caso se um IED receber informação proveniente de outro IED não é necessário que envie uma mensagem de resposta;
- **Half-Duplex:** a transmissão dos dados é feita nos dois sentidos. Contudo, só um IED pode comunicar com o outro em cada instante de tempo;
- **Full-Duplex:** a comunicação entre dois IEDs pode ser feita nos dois sentidos de forma simultânea, isto é, no mesmo instante de tempo um IED pode enviar e receber dados.

Relativamente aos métodos de transmissão dos dados, são usados dois: o síncrono e o assíncrono. No síncrono os dados são transferidos em blocos de bits cujo envio é sincronizado com um sinal de relógio. Na comunicação síncrona, o equipamento transmissor e receptor antes de iniciarem a troca de dados trocam algumas mensagens de configuração. Estas mensagens de configuração servem para sincronizar os seus relógios e acordarem parâmetros relativos à transferência dos dados, incluindo o período com que os bits de dados serão

enviados. Por outro lado, numa comunicação assíncrona os relógios entre os dois equipamentos operam de forma independente. Mesmo que estejam configurados para funcionarem com sinais de relógios aproximados não há garantia que continuem sincronizados ao fim de um certo período de tempo. Assim, não há garantia que quando o equipamento transmissor começar a comunicar o equipamento receptor comece a receber. Neste sentido, a comunicação assíncrona necessita da utilização de bits adicionais juntamente com os bits de dados para manter a indicação de onde se iniciam e o terminam as tramas com os dados [7].

Os IEDs comunicam através de um meio de transmissão que suporta a propagação de sinais eléctricos ou ópticos para a transmissão dos dados. O tipo de meio físico escolhido para a transmissão dos dados influencia a velocidade máxima da comunicação da rede. O novo meio de transmissão utilizado em redes de comunicação para operação em sistemas de energia é a fibra óptica. Entre as suas vantagens destacam-se a sua elevada imunidade ao ruído electromagnético, não emitir radiação capaz de induzir ruído noutra cablagem e garantir uma melhoria da velocidade de comunicação a longas distâncias sem perda da qualidade do sinal [7].

As comunicações com relés de protecção e outros tipos de IEDs numa subestação exige certas medidas de segurança que garantam que não ocorrerão operações indesejadas relativas a problemas de comunicação e acesso remoto a partir do centro de controlo. Para o caso dos dados corromperem durante a transmissão um dos métodos mais utilizados para solucionar este problema é a Verificação de Redundância Cíclica (*Cyclic Redundancy Check*). Este método utiliza um código detector de erros para verificar se ocorrem erros durante a transmissão dos dados. Relativamente a problemas relativos ao acesso indevido e não autorizado à rede de comunicação da subestação utilizam-se soluções como a de implementação de múltiplos níveis de protecção por palavra-chave [7].

A interoperabilidade é o conceito chave que visa assegurar a integração dos IEDs e outros equipamentos no SAS, mesmo que sejam de fabricantes distintos. A interoperabilidade pode ser definida como a capacidade de comunicar, executar programas ou transferir dados através de todos os equipamentos da rede de comunicação sem necessidade de haver um conhecimento profundo acerca dos mesmo equipamentos e processos envolvidos [7].

A Organização Internacional de Normalização (ISO) é responsável pelo desenvolvimento e promoção do modelo de referência para Interconexão de Sistemas Abertos (Open System Interconnection). O modelo OSI promove um ambiente aberto para partilha de informação e serviços que permite que equipamentos de fabricantes distintos comuniquem utilizando protocolos aceites pelos membros da ISO. O modelo OSI - Figura 2.10 - foi construído com base numa arquitectura com várias camadas, especificando as diferentes funções e serviços de cada uma. Os componentes de hardware relacionados com a rede de comunicação são especificados nas camadas mais baixas, nomeadamente na camada Física. As camadas acima especificam os procedimentos a nível do software, formato dos dados e outros aspectos relativos às comunicações. O modelo OSI apresenta uma arquitectura com sete camadas. Na Tabela 2.1 apresenta-se a relação entre cada camada do modelo OSI e as respectivas funções que lhe estão associadas.

7	Aplicação
6	Apresentação
5	Sessão
4	Transporte
3	Rede
2	Ligação de dados
1	Física

Figura 2.10 - Camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) [7].

Tabela 2.1 - Camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) [7].

Camada		Função
7	Aplicação	Seleccionar o serviço apropriado para a aplicação
6	Apresentação	Assegurar a conversão do código e formatação dos dados
5	Sessão	Coordenar a interacção entre os processos da aplicação em equipamentos terminais da rede
4	Transporte	Assegurar a integridade dos dados e qualidade de serviço entre equipamentos terminais da rede
3	Rede	Assegura o endereçamento dos dados para que cheguem correctamente ao equipamento de destino
2	Ligação de dados	Transfere os dados para outro equipamento da rede, através do meio físico
1	Física	Responsável pelo envio dos dados para o meio físico

As redes de comunicação são definidas como grupos de nós ou estações interconectados através de canais de comunicação. Um nó é um ponto de interface onde um ou mais IEDs são ligados à rede de comunicação. Os relés de protecção e outros IEDs de uma subestação estão ligados através de uma Rede de Área Local (LAN). A topologia de ligação física dos

equipamentos constituintes da rede de comunicação pode ser em estrela, anel ou linear (barramento) - Figura 2.11.

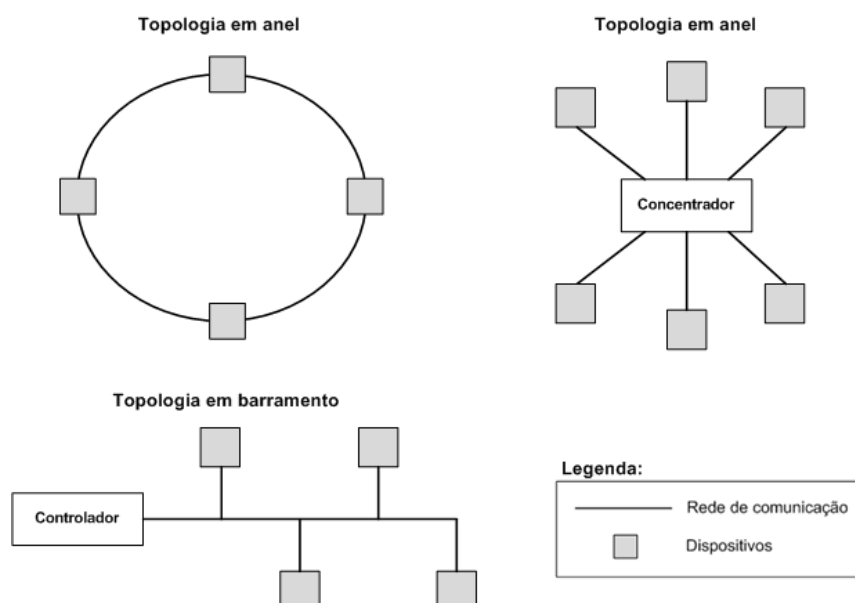


Figura 2.11 - Topologias de ligação de equipamentos numa rede de comunicação [7].

A topologia em barramento utiliza um único cabo para fazer a ligação dos IEDs em cadeia. O principal problema desta topologia é o facto de qualquer problema no cabo inibir o funcionamento de toda a rede, uma vez que o meio físico é partilhado por todos os equipamentos. Numa topologia em anel o cabo, utilizado como meio físico, fecha-se sobre si mesmo. A principal desvantagem é que cada dispositivo apenas está ligado directamente a outros dois pelo que se algum dos equipamentos falhar o correcto funcionamento da rede está comprometido. Por último, tem-se a topologia em estrela que é a mais comum. Segundo esta topologia cada IED está ligado individualmente ao respectivo switch. Desta forma, se o cabo de ligação tiver algum problema o resultado é apenas a saída de serviço de um IED, ao contrário do que acontecia com as outras topologias, em que qualquer problema no cabo podia comprometer o funcionamento de toda a rede.

2.3.3. Sistema de automação da subestação baseado na norma CEI61850

O Sistema de automação da Subestação (SAS) é largamente utilizado para o controlo, protecção, monitorização e comunicação nas subestações com o intuito de melhorar a fiabilidade e desempenho do sistema eléctrico de energia. O SAS adoptou soluções baseadas nas Tecnologias de Informação (TIs), como é o caso das Redes de Área Local (LAN), utilizando o protocolo de comunicação Ethernet, apesar das funções de controlo aplicadas nas primeiras versões do SAS já utilizassem tecnologias de comunicação simples. Para além disso, a norma CEI61850 tornou-se um novo standard para as redes de comunicação e sistemas em subestações. Esta norma está dividida em dez partes, publicadas entre 2003 e 2005.

Consequentemente, a norma CEI61850 começou a ser largamente aplicado nos SAS de subestações de todo o mundo [8].

A aplicação do SAS visa cumprir com os requisitos de mercado que apontam para a diminuição do custo total da subestação. Neste custo incluem-se custos relativos aos ciclos de vida e manutenção dos equipamentos. A utilização do SAS começou na década de 80. Durante a década de 90, estes sistemas eram caracterizados principalmente pelo facto utilizarem redes de comunicação implementadas com base em standards internacionais como a Ethernet e o TCP/IP, para além de protocolos proprietários desenvolvidos por diferentes fabricantes. Uma das principais mais-valias que a norma CEI61850 trouxe foi assegurar a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos. Com a sua aplicação era expectável que o SAS se tornasse mais simples de configurar em resposta aos requisitos de mercado. Estes requisitos apontavam no sentido de tornar a configuração do SAS cada vez mais flexível e menos morosa [8].

2.3.3.1. Funções básicas do Sistema de Automação da Subestação

As funções básicas do Sistema de Automação da Subestação (SAS) são organizadas em quatro categorias: monitorização, controlo, registo e protecção. A maior parte dos SAS têm as funções descritas na Tabela 2.2, apesar de se poderem registar variações de projecto para projecto [8].

Tabela 2.2 - Descrição das funções básicas dos Sistemas de Automação das Subestações [8].

Funções básicas	Exemplos típicos das funções
Monitorização	Monitorização do estado dos disjuntores e seccionadores, estado e posição das tomadas do transformador, estado do equipamento de controlo e protecção; Monitorização das grandezas eléctricas, como a corrente, tensão, frequência, potência activa e reactiva.
Controlo	Controlo dos disjuntores, seccionadores e tomadas do transformador; Verificação do sincronismo e encravamentos entre painéis; Controlo da regulação de tensão e da potência reactiva.
Registo	Registo dos dados monitorizados; Registo de falhas e avarias nos equipamentos.
Protecção	Protecção das linhas de transmissão, barramentos, transformador, etc.

2.3.3.2. Projecto do sistema de automação da subestação

O projecto do Sistema de Automação da Subestação (SAS) normalmente requer quatro etapas: definição, planta do sistema, teste do sistema e operação e manutenção. A definição dos requisitos do SAS é feita numa primeira etapa. Os detalhes do tipo da subestação devem

ser definidos porque providenciam a informação essencial que permite determinar quais as funções e configurações necessárias para o SAS. O tipo de subestação deve ser caracterizado com informação relativa a se a subestação é de transporte ou distribuição, se é grande ou pequena e qual o seu impacto no sistema eléctrico de energia. Para além disso, a disposição dos barramentos, o número de painéis e os requisitos funcionais também devem estar definidos detalhadamente [8].

A etapa seguinte passa por decidir que tipo de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) irão ser utilizados e qual a arquitectura do sistema, sendo que esta deve dar especial atenção aos critérios de redundância. A utilização de uma arquitectura redundante deve ser considerada na implementação do SAS para assegurar a fiabilidade do sistema em caso de falha. Quando o SAS é implementado com base nas especificações da norma CEI61850 devem ser tomados em linha de conta dois aspectos:

- Evitar que o sistema fique indisponível devido à ocorrência de uma única falha;
- Assegurar a integração de equipamentos que não estejam desenvolvidos segundo as especificações da norma CEI61850;

A configuração do SAS apresenta uma arquitectura que é tipicamente semelhante à apresentada na Figura 2.12. Esta arquitectura assegura uma flexibilidade suficiente para o sistema em termos de manutenção e futuras expansões através de uma configuração dos equipamentos distribuída por painéis e da utilização uma Rede de Área Local (LAN), com uma topologia em anel. A configuração do sistema apresentada na Figura 2.12 é bastante aplicada actualmente. A estação de trabalho do operador consiste num equipamento com uma Interface Homem-Máquina (HMI) que desempenha as operações de controlo e monitorização de toda a subestação. Tarefas de engenharia tais como a manutenção das bases de dados e configurações dos IEDs também podem ser incluídas na estação de trabalho. Por sua vez, o computador da estação providencia funções de controlo e monitorização, acesso remoto a partir do centro de controlo e registo de dados e ocorrências. Este computador é um dos equipamentos mais importantes do SAS, pelo que este hardware deverá estar preparado para funcionar em ambientes industriais e ser fiável. O barramento da estação (*Station Bus*) consiste numa LAN implementada dentro do edifício de comando da subestação de acordo com a norma CEI61850. A principal finalidade da LAN é estabelecer a ligação entre os vários IEDs constituintes do sistema. A arquitectura apresentada na Figura 2.12 apresenta as seguintes características:

- Comprimento total dos cabos de comunicação reduzido;
- Canais de comunicação redundantes;
- Prevenção contra a formação de caminhos fechados (*loops*) para difusão correcta dos dados utilizando o protocolo RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol - IEEE802.1w).

A configuração da LAN segundo uma topologia em anel com a aplicação do protocolo RSTP é a solução mais comum para a rede de comunicação da subestação. O RSTP é um protocolo através do qual os canais de comunicação são logicamente formados com uma topologia em estrela. Desta forma, perante a ocorrência de uma falha num dos canais de comunicação, o RSTP providencia uma função de reconfiguração da rede a alta velocidade. Mesmo que a falha ocorra em qualquer um dos canais de comunicação, o RSTP procede à sua reconfiguração

assegurando, assim, a continuidade da transmissão dos dados no barramento da estação e a operabilidade de todo o sistema [8].

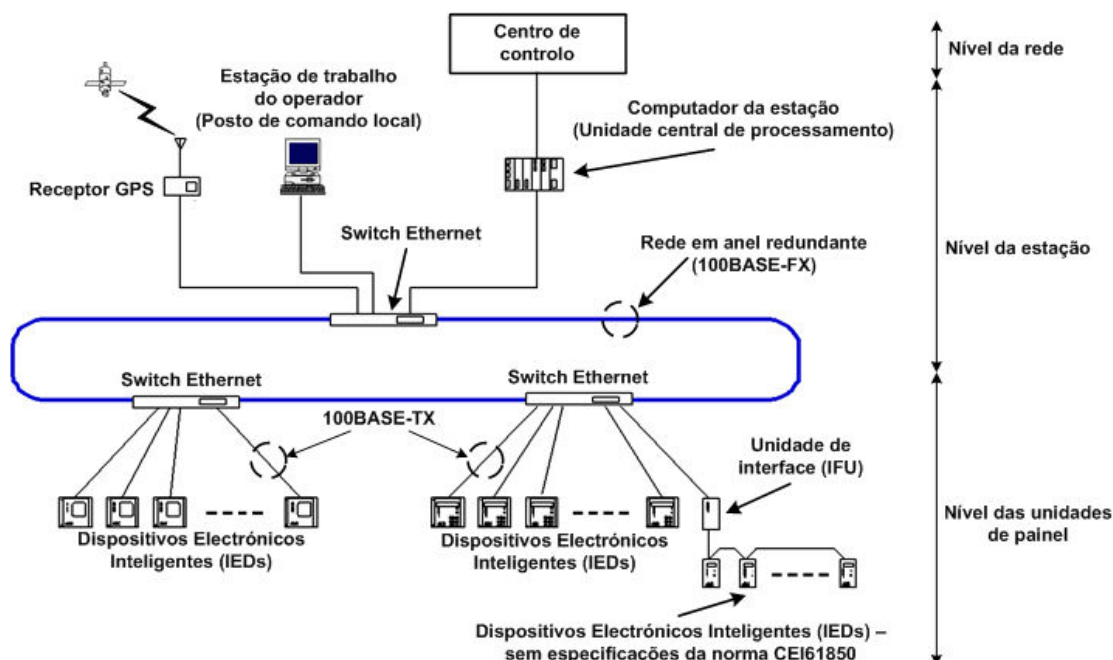


Figura 2.12 - Exemplo de uma arquitectura para o sistema de automação da subestação (SAS) [8].

A arquitectura apresentadas na Figura 2.12 está organizada em três níveis: o nível das unidades de painel, o nível da estação e o nível da rede. O nível das unidades de painel é constituído pelos IEDs. O nível da estação é constituído principalmente pela estação de trabalho do operador (posto de comando local da subestação) e pelo computador da estação (unidade central de processamento da subestação). Por sua vez, o nível da rede representa o centro de controlo remoto da subestação.

A interligação entre os IEDs e os equipamentos do nível da estação é intermediada pelo barramento da estação. O barramento da estação utiliza a Ethernet como protocolo de comunicação, sendo o meio físico de comunicação a fibra óptica e a velocidade de comunicação 100 Mbps, resultando daí a designação 100BASE-FX. Por sua vez, a ligação entre os switches Ethernet do barramento da estação e os IEDs é feita por intermédio do cabo de par entrelaçado (UTP), com uma velocidade de comunicação de 100 Mbps. Destaque-se a utilização das Unidades de Interface (IFUs) no nível das unidades de painel. As IFUs são utilizadas quando é necessário integrar informação proveniente de equipamentos não desenvolvidos de acordo com as especificações da norma CEI61850 com outros equipamentos desenvolvidos segundo esta mesma norma [8].

De um ponto de vista geral, com a utilização da norma CEI61850 é possível garantir alguns benefícios como é o caso da interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos, elevada velocidade de comunicação entre IEDs, baixos custos de instalação, expansão e engenharia do sistema e flexibilidade a nível do melhoramento e implementação de novas funções nos equipamentos [8].

2.4. Sumário

A evolução dos relés de protecção foi um dos factores impulsionadores que motivou uma mudança de paradigma relativamente às funções e sistemas de protecção dos sistemas eléctricos de energia. Enquanto que a cada relé electromecânico estava apenas associada uma função de protecção específica, no caso dos relés digitais (numéricos), estes equipamentos assumiam um carácter multifuncional, atendendo ao facto de realizarem mais que uma função de protecção. Com o contínuo desenvolvimento da tecnologia digital e dos sistemas baseados em microprocessadores, os relés numéricos foram-se tornando em equipamentos cada vez mais robustos, confiáveis e versáteis. Aliás, actualmente é comum utilizar-se a designação de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) quando se pretende fazer referência aos relés de protecção. Genericamente, os IEDs são dispositivos programáveis com elevada capacidade de processamento, portas de comunicação de dados e interface gráfica para interacção com o operador. Os IEDs são a base dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de energia eléctrica.

Os SPCC resultaram da evolução dos sistemas de protecção e automação das subestações. A partir da década de 70, equipas de engenharia começaram a trabalhar no sentido de desenvolverem sistemas baseados em microprocessadores para automatizar as subestações. Paralelamente, também decorriam estudos que procuravam encontrar soluções para integrar o sistema de automação e o sistema de protecção num sistema único. Desta forma, surgiu o conceito de Sistema de Automação da Subestação (SAS) que já começava a englobar funções de controlo, monitorização, protecção e registo de eventos. O SAS utiliza um Sistema de Supervisão, Controlo e Aquisição de Dados (SCADA) que abrange toda a subestação. Os primeiros sistemas de automação utilizavam um Sistema de Gestão de Dados (DMS) e um SCADA que trocavam informação entre si. Contudo, devido aos requisitos dos tempos de resposta, o tamanho dos ficheiros gerados com registos de ocorrências e o número de variáveis tinha de ser limitado. Para além disso, a manipulação dos dados existentes nas bases de dados é relativamente lenta. Assim, os sistemas de SCADA e DMS evoluíram no sentido de constituírem um sistema único com maior capacidade de processamento e mais funcionalidades, bem como ferramentas para gestão optimizada dos dados.

A falta de normalização que se verificava quando começaram a ser implementados os primeiros sistemas de automação nas subestações levou a que os fabricantes de equipamentos, nomeadamente de IEDs, utilizassem protocolos proprietários nos seus equipamentos. Desta forma, quando se tentavam ligar IEDs de fabricantes diferentes surgiam custos acrescidos relativos à utilização de conversores de protocolos de comunicação, para além do esforço dispendido para fazer a sua configuração. Este foi um dos principais motivos que levaram à criação da norma IEC 61850. Esta norma impôs uma mudança na concepção e desenvolvimento dos sistemas de automação da automação, trazendo vantagens a nível da configuração dos equipamentos, aumento da flexibilidade e fiabilidade do sistema, interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos, entre outras.

Capítulo 3

Norma CEI61850: Redes de comunicação e sistemas em subestações

Neste capítulo é feita uma breve descrição acerca das motivações da criação da norma CEI61850, sendo dada ênfase às suas principais características e vantagens, tomando-se como base bibliográfica [9].

3.1. Motivação para a criação da norma CEI61850

Durante a década de 90, registou-se uma grande evolução dos Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) utilizados para realizar as funções de protecção, comando e monitorização da subestação. Neste sentido, muitos fabricantes começaram a lançar no mercado IEDs com capacidade para poderem ser interligados numa rede de comunicação de dados. Estes equipamentos são, actualmente, uma característica comum das subestações de distribuição, sendo que a interoperabilidade entre IEDs de fabricantes distintos é vista como um importante benefício [9].

Numa fase inicial, os IEDs vinham equipados com suporte para protocolos de comunicação de dados proprietários, isto é, cada fabricante desenvolvia os seus próprios módulos e protocolos de comunicação, não existindo qualquer tipo de normalização. Assim, sempre que se tentava integrar equipamentos de fabricantes distintos numa mesma subestação, tendo em vista a optimização e expansão dos seus sistemas de automação e protecção, encontravam-se diversos problemas de incompatibilidade. Registavam-se incompatibilidades a nível das interfaces físicas e dos protocolos de comunicação utilizados e da forma como a informação era endereçada e apresentada pelos vários IEDs [9].

Os clientes mostravam desgosto por estarem limitados a um leque bastante restrito de equipamentos sempre que pretendiam efectuar expansões ou melhoramentos no Sistema de Automação da Subestação (SAS). Nos casos em que se acabava por utilizar equipamentos de fabricantes diferentes no sistema de automação duma subestação, os custos associados aumentavam uma vez que era necessário utilizar conversores de protocolos de comunicação e softwares de interface com o utilizador diferentes, para além do acréscimo de tempo necessário para formação dos operadores das subestações. Neste sentido, os fabricantes

começaram a ser pressionados para normalizarem os protocolos de comunicação que utilizavam e fazerem uma descrição formal das funcionalidades disponibilizadas pelos seus equipamentos. O objectivo principal era garantir a interoperabilidade entre IEDs de marcas e modelos diferentes [9].

No início dos anos 90 começaram a ter lugar na Europa e Estados Unidos da América iniciativas com vista à criação de um standard que permitisse facilitar a integração de sistemas de automação e protecção desenvolvidos por fabricantes distintos. Por um lado, a Comissão Electrotécnica Internacional (CEI) reconheceu que era necessário criar uma interface normalizada para os novos IEDs, que vinham a ser desenvolvidos pelos vários fabricantes. Neste sentido, foram criadas equipas de trabalho cujo resultado das suas actividades culminou com o desenvolvimento de uma norma para a “Interface de informação para equipamentos de protecção” - CEI60870-5-103. Paralelamente, nos EUA, o Instituto de Investigação da Electrónica de Potência (EPRI), começaram a analisar os primeiros projectos piloto da *Utility Communication Architecture* (UCA), que era tida como a base das arquitecturas de comunicação da próxima geração. A EPRI reconheceu que a UCA necessitava de ser desenvolvida, passando este desenvolvimento por serem adicionadas especificações detalhadas dos modelos de objectos dos equipamentos da subestação e definições relativas ao funcionamento das comunicações [9].

Em 1995, a CEI percebeu que era necessário desenvolver um standard que englobasse as redes de comunicação e os sistemas nas subestações. Neste sentido, juntaram-se equipas de trabalho que partilharam a experiência que tinham da norma CEI60870 e da UCA. Todavia, enquanto estas equipas trabalhavam no desenvolvimento da norma CEI61850, a EPRI estava a desenvolver e preparar a segunda versão da UCA - UCA.2. Este facto representou um problema imediato dado que havia a probabilidade de serem criados dois standards e, consequentemente, verificarem-se conflitos entre fabricantes uma vez que não existia um standard único. Com o intuito de tentar resolver este problema, os membros da CEI, IEEE e EPRI reuniram-se e decidiram que a norma CEI61850 teria como base os serviços e modelos de dados definidos na UCA.2 [10].

3.2. Requisitos do sistema de comunicação da subestação

As comunicações sempre tiveram um papel crítico no que toca às operações de tempo-real dentro de uma subestação. De salientar que tempo-real não está unicamente relacionado com rapidez mas sim com a resposta do sistema em tempo útil para os processos da subestação, sobre os quais se realiza controlo e monitorização. Por exemplo, caso seja detectado um defeito num ponto da instalação da subestação, pretende-se que a ordem de actuação da protecção seja enviada num tempo que garanta eliminação rápida do defeito e, consequentemente, minimize dos danos provocados pelo mesmo. Se esta ordem não for enviada a tempo há o risco de o defeito não poder ser eliminado [9].

No início, o telefone era utilizado como meio de comunicação entre o centro de controlo e a subestação, sendo que os operadores locais recebiam, por exemplo, as ordens de comutação dos dispositivos por esta via. As primeiras funções de controlo remoto eram baseadas em ordens de comutação por telefone, conseguindo-se também alguma monitorização e controlo sobre o estado da instalação. Com o advento das comunicações

digitais começaram a ser instalados Sistemas de Aquisição de Dados (DAS) que permitiram que a recolha de informação medida na subestação passasse a ser automática. No entanto, a largura de banda nos canais de comunicação ainda era bastante limitada, pelo que havia a necessidade de se otimizar a operação sobre estes canais a nível de configuração, mapeamento e documentação da localização dos bits de dados recebidos [9].

Com os constantes avanços verificados no mundo digital a largura de banda das comunicações deixou de ser um factor limitativo. Aliando à superação deste factor limitativo a introdução dos IEDs, foi possível aumentar o número de variáveis analógicas e digitais medidas e processadas, melhorando-se significativamente o funcionamento dos sistemas de protecção, controlo e monitorização. Neste seguimento de ideias surgem alguns requisitos chave associados aos sistemas de comunicação numa subestação, entre os quais se destacam os apresentados no diagrama da Figura 3.1:

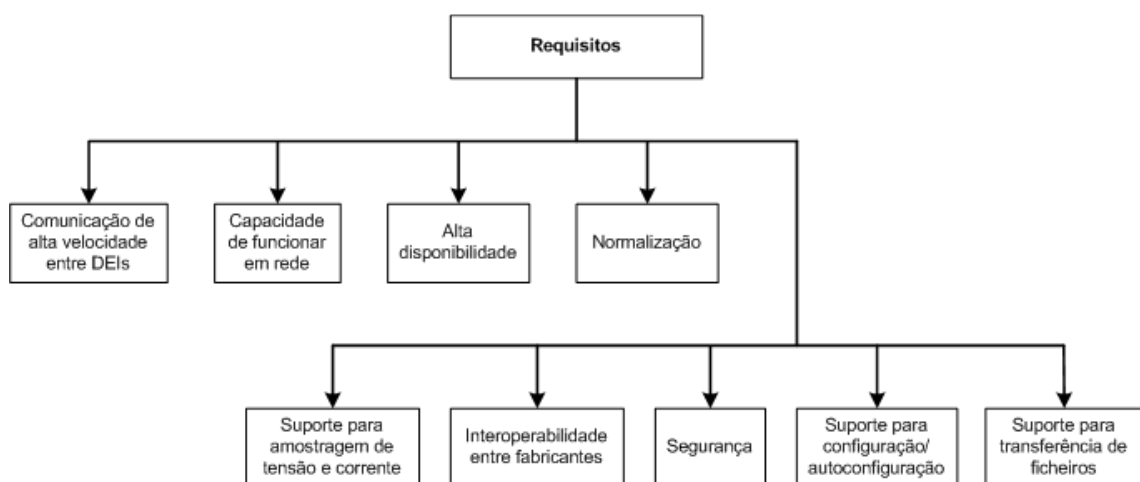


Figura 3.1 - Requisitos associados ao sistema de comunicação [9].

Os requisitos apresentados na Figura 3.1, foram tomados em conta quando se começou a pensar em desenvolver a arquitectura de comunicações da próxima geração. O primeiro passo dado nesse sentido foi a criação da *Utility Communication Architecture* (UCA), em finais da década de 80. A UCA definia um perfil de protocolos recomendados para as várias camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI), que é um modelo para o sistema de comunicação - Figura 3.2.



Figura 3.2 - Camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) [11].

Tal como foi referido na secção 3.1, a norma CEI61850 foi desenvolvida por equipas de trabalho que estiveram ligadas à criação da UCA e da norma CEI60870. O resultado do trabalho desempenhado por estas equipas culminou com o lançamento da norma CEI61850 - Redes de comunicação e sistemas em subestações, em 2003. Esta norma encontra-se dividida em 10 partes principais, apresentadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Organização da norma CEI61850 [9].

Parte	Título
1	Introdução e visão geral
2	Glossário
3	Requisitos gerais
4	Gestão do projecto e sistema
5	Requisitos de comunicação para funções e modelos de dispositivos
6	Linguagem descritiva da configuração para comunicação entre IEDs em subestações
7	Estrutura de base de comunicação para equipamento de subestação e de painel
7.1	Princípios e modelos
7.2	Interface abstracta de serviços de comunicação
7.3	Classe de Dados Comuns
7.4	Classes de nós lógicos e classes de dados compatíveis
8	Mapeamento específico dos serviços de comunicação
8.1	Mapeamento para MMS (ISO9506-1 e ISO9506-2) e para ISO/CEI8802-3
9	Mapeamento específico dos serviços de comunicação
9.1	Valores amostrados sobre ligações série multiponto unidireccionais
9.2	Valores amostrados sobre ISO/CEI8802-3
10	Testes de conformidade

Da perspectiva do sistema da subestação, há uma quantidade significativa de configurações necessárias para interligar todos os seus elementos e colocá-los em funcionamento. Com o objectivo de facilitar este processo e diminuir o erro humano, é definida na norma uma Linguagem de Configuração da Subestação (SCL) em *eXtensible Markup Language* (XML), conseguindo-se, assim, uma descrição formal entre o sistema de automação da subestação (SAS) e os equipamentos dispostos ao longo do parque exterior. Na camada de aplicação, a topologia da disposição dos equipamentos e a relação entre a sua estrutura e as funções do SAS configuradas nos IEDs podem ser descritas. Cada dispositivo deverá providenciar um ficheiro SCL com a sua própria configuração [9].

3.3. Modelização dos dispositivos da subestação

Os primeiros protocolos de comunicação tipicamente só definiam a forma como a informação, organizada em tramas de bits, era transmitida através dos canais de comunicação. Porém, não especificavam como é que os dados deviam ser organizados do ponto de vista do sistema de protecção e controlo da subestação. Desta forma, era necessário que na fase de instalação destes sistemas, as configurações dos objectos e o seu mapeamento nas variáveis da subestação e módulos de entrada e saída fossem feitas de forma manual, perdendo-se muito tempo e havendo grande probabilidade de se cometerem erros. A norma CEI61850 providencia, assim, um modelo compreensivo de como os equipamentos da subestação deverão organizar os dados, para que sejam consistentes e compatíveis entre si, mesmo que os fabricantes difiram. Desta forma, garante-se uma optimização a nível do esforço necessário para configurar o sistema porque os dispositivos podem-se autoconfigurar. A título de exemplo, se se ligar um Transformador de Tensão (TT) ou um Transformador de Intensidade (TI) a um relé desenvolvido segundo a norma CEI61850, o relé deverá ser capaz de detectar o TT ou TI, associando-o a uma unidade de medida sem que haja qualquer intervenção do utilizador. Alguns dispositivos utilizam um ficheiro SCL para configurar os objectos, sendo que, neste caso, o engenheiro responsável pela sua configuração apenas necessita de importar o ficheiro para o dispositivo [9].

O modelo de dispositivo criado pela norma CEI61850 começa por um dispositivo físico, que geralmente é um gateway para múltiplos equipamentos (dispositivos lógicos). É este dispositivo que será ligado à rede de comunicação, sendo tipicamente definido pelo seu endereço de rede. Segundo o modelo definido pela norma, o dispositivo físico fornece uma representação normalizada de um concentrador dos dados que chegam dos diferentes dispositivos lógicos que a ele estão ligados. Dentro de cada dispositivo físico pode haver um ou mais dispositivos lógicos. Cada dispositivo lógico pode conter um ou mais nós lógicos. Considera-se um nó lógico um grupo de dados com um nome identificativo e serviços associados que estão logicamente relacionados com uma função da subestação. Segundo a norma, a primeira letra do nome do nó lógico identifica o tipo de função por ele desempenhado. Por exemplo, no caso da função ser o controlo automático, o nome do nó começa por “A”. Por outro lado, se a função desempenhada for a de protecção, o nome do nó lógico deverá começar por “P”, sendo este procedimento utilizado para que o nome de todos os nós lógicos sejam identificativos das funções que executam. Para além disso, cada nó lógico poderá conter um ou mais elementos de dados, tendo cada um deles um nome único.

Estes nomes são determinados pela norma e estão funcionalmente relacionados com os equipamentos da subestação. Para ajudar a compreender este conceito, considere-se o caso de um disjuntor, modelizado por um nó lógico XCBR. A ele atribuído está uma diversidade de dados referentes aos seus aspectos funcionais - Figura 3.3. Na figura 3.3 apresentam-se como dados ligados ao nó lógico XBR1, o Pos e o OpCnt. O Pos é utilizado para indicar a posição do disjuntor, enquanto que o OpCnt se utiliza para contar o número de operações realizadas pelo mesmo [9].

Cada elemento de dados dentro do nó lógico está em conformidade com uma Classe de Dados Comuns (CDC). Cada uma destas classes define o tipo e estrutura de dados dentro destes nós. Assim, estão definidos CDC para informações de estado, de medidas e de controlo, entre outras [9].

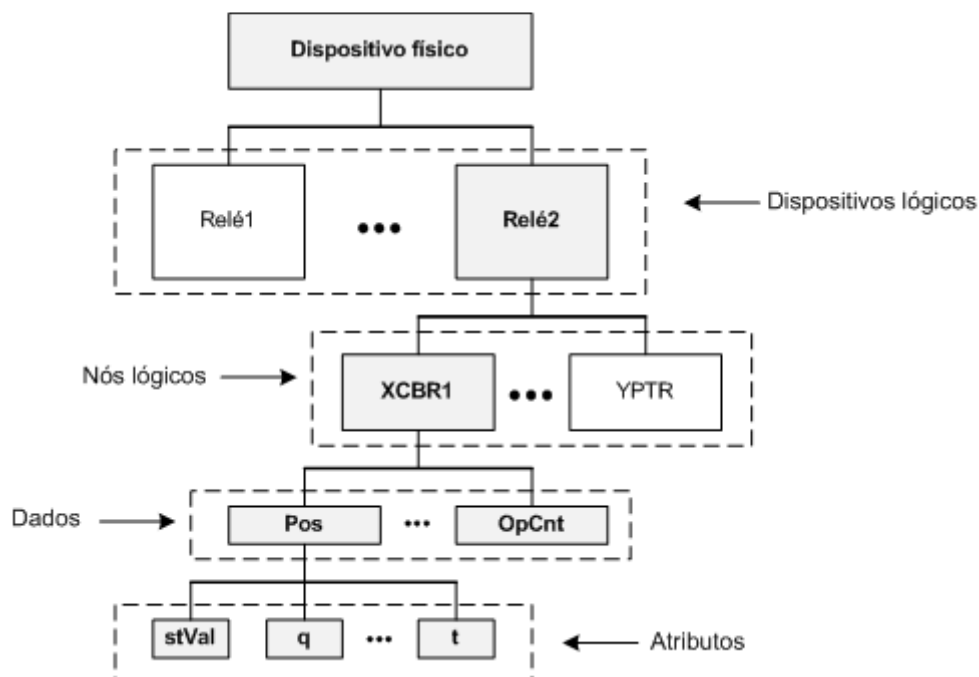


Figura 3.3 - Modelo de organização lógica dos dispositivos definido pela norma [12].

O modelo de dispositivo apresentado na Figura 3.3 é apenas um modelo virtual, dando uma visão abstracta dos dispositivos e respectivos objectos no contexto da subestação. Este modelo está definido na parte 7 da norma. Posteriormente, este modelo é mapeado para um protocolo específico na parte 8.1 da norma, com base na Especificação das Mensagens dos Fabricantes (MMS - ISO9506), TCP/IP e Ethernet (ver secção 5.2 e 5.3 do capítulo 5). Na fase de mapeamento dos objectos da CEI61850 para MMS, a parte 8.1 da CEI61850 especifica o método de transformação da informação do modelo definido pela norma para uma variável MMS (*Manufacturing Message Specification*). O resultado é uma referência unívoca a cada elemento de dados apresentado no modelo virtual da subestação. Suponha-se que se tem um dispositivo lógico chamado “Relay1” constituído por um único nó lógico com um disjuntor (XCBR1) e se pretende verificar se o disjuntor está no modo local ou remoto de operação. Para aceder a esta informação, é necessário ler um objecto com uma estrutura idêntica à apresentada na Figura 3.4:

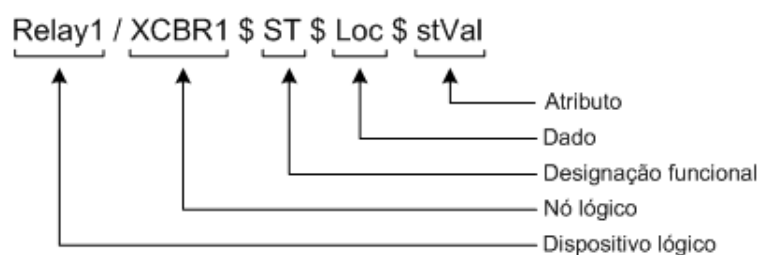


Figura 3.4 - Estrutura de um objecto segundo a norma [9].

3.4. Protocolos Reais: Mapeamento

Os modelos abstractos para dados e objectos apresentados na norma CEI61850 definem um método normalizado para descrever os dispositivos existentes na subestação, permitindo que todos os IEDs disponibilizem a informação utilizando estruturas idênticas e directamente relacionadas com a função que desempenham na instalação. Os modelos apresentados na Interface Abstracta de Serviços de Comunicação (ACSI) da norma CEI61850 definem um conjunto de serviços, e respectivas respostas, com o intuito de permitir que todos os IEDs se comportem de forma semelhante do ponto de vista do funcionamento global da rede de comunicação. Contudo, estes modelos têm de operar sobre um conjunto de protocolos reais que possam ser implementados e capazes de funcionar em ambientes computacionais. Tal como foi dito na secção 3.3, os objectos e serviços são mapeados para os protocolos MMS (*Manufacturing Message Specification*) na parte 8.1 da norma CEI61850. O MMS é uma escolha bastante boa porque suporta objectos com uma identificação complexa e tem um leque alargado de serviços flexíveis que suportam, de forma simples, o mapeamento para a norma CEI61850 [9].

O mapeamento dos modelos de objectos e serviços da norma para MMS é feito com base numa correspondência onde um ou vários serviços MMS específicos são escolhidos como meio de implementar os diferentes serviços definidos pela ACSI. Por exemplo, um modelo de controlo da ACSI é mapeado para um serviço de leitura e escrita da MMS [9].

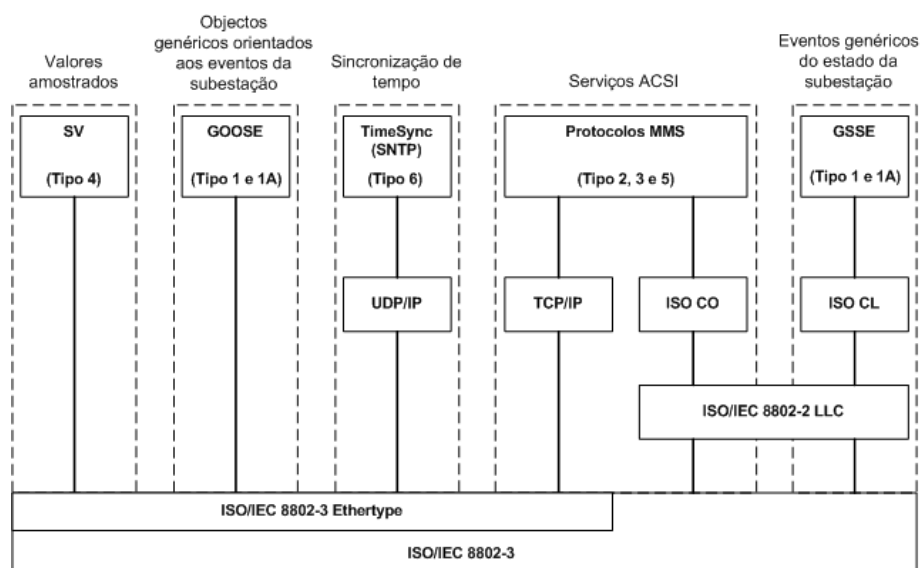


Figura 3.5 - Serviços definidos pela CEI61850 e protocolos de comunicação associados [9].

Na Figura 3.5 são apresentadas as camadas de transporte, rede e ligação de dados, bem como os serviços que geram mensagens (SV, GOOSE, TimeSync, ACSI e GSSE). A camada de ligação de dados, à qual é aplicada a norma ISO/IEC8802-3, é a única comum a todas as mensagens e utiliza o protocolo Ethernet com prioridade. A camada de ligação de dados está dividida em duas subcamadas: a de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) e a de Controlo da Ligação Lógica (LLC), sendo que a parte da norma aplicável a cada uma é a 8802.3 e 8802.2, respectivamente [9].

As mensagens sem requisitos de tempo real (comunicações cliente-servidor) utilizam as camadas de transporte, rede e ligação de dados. As restantes (GOOSE e SV) são mapeadas directamente para a camada de ligação de dados, tendo também uma prioridade mais alta face às primeiras. A camada orientada à conexão dos protocolos MMS pode operar sobre TCP/IP ou ISO CO. No que diz respeito aos GSSE, estes operam sobre serviços ISO não orientados à conexão (ISO CL). Entenda-se por comunicação orientada à conexão uma comunicação em que é estabelecida uma sessão sempre que se cria uma nova conexão, sendo que esta é terminada quando a conexão é interrompida. Por sua vez, numa ligação não orientada à conexão não é estabelecida nenhuma conexão nem sessão, pelo que as mensagens são enviadas independentemente umas das outras, podendo, desta forma, chegar desordenadas.

No que concerne às mensagens cliente-servidor, estas dividem-se em três tipos: Sincronização de tempo (TimeSync), Serviços ACSI e Eventos Genéricos do Estado da Subestação (GSSE). Apesar dos IEDs terem um relógio interno, para garantir a sincronização entre estes equipamentos, são enviadas mensagens de sincronização de rede através da rede de comunicação, utilizando-se para isso o protocolo SNTP. As mensagens ACSI fornecem uma interface abstracta de comunicação entre um cliente e um servidor remoto e para a partilha de eventos entre uma aplicação implementada num equipamento e aplicações existentes noutros equipamentos. As mensagens GSSE e GOOSE são incluídas na classe de mensagens GSE. As GSSE transportam informações de estado e só suportam uma estrutura fixa de dados, enquanto que as GOOSE transportam estruturas de dados configuráveis, permitindo, por exemplo, ao receptor ter informações sobre se um determinado estado foi ou não modificado, para além de também saber em que instante se deu essa modificação. Por último, as mensagens SV transportam informação como valores de tensão e corrente de diferentes equipamentos da subestação. Contudo, estas mensagens têm requisitos temporais estritos uma vez que os valores amostrados serão utilizados, pelo dispositivo receptor, para reconstituir o valor original das grandezas medidas em cada um dos equipamentos da instalação [10].

Em cada um dos serviços mencionados na figura 3.5 é feita uma classificação quanto ao tipo de mensagem que é enviada. Na Tabela 3.2 apresenta-se uma correspondência entre cada tipo de mensagem e a classe de desempenho a que cada uma pertence.

Tabela 3.2 - Tipos de mensagens definidos para os vários serviços e respectivas classes de desempenho [10].

Tipo	Classe
1	Mensagens rápidas
1A	Trip
2	Velocidade média
3	Baixa velocidade
4	Dados em rajada
5	Transferência de arquivos
6	Sincronização de tempo

3.5. Barramento de processo da subestação (*Process Bus*)

Com a evolução dos sistemas de sensores, a capacidade para digitalizar as grandezas de base inerentes ao funcionamento da subestação (tensão, corrente, frequência, etc.) e transmitir os valores amostrados e as informações de estado dos equipamentos, tornou-se um requisito. A norma aborda este requisito através da definição dos Valores Medidos Amostrados (SMV) e da implementação de um barramento de processo. O barramento de processo da subestação está relacionado com a recolha de informação dos transformadores de medida e transdutores ligados aos equipamentos primários da subestação (aparelhagem de potência). Desta forma, são consideradas pela norma duas definições protocolares diferentes para a recolha destes dados. A primeira, referida na parte 9.1 da norma IEC 61850, consiste numa ligação fixa ponto-a-ponto unidireccional, que transporta um conjunto fixo de dados. A segunda, definida na parte 9.2 da norma, define um conjunto de dados configurável que pode ser transmitido em *multicast*, isto é, a partir de um editor para vários subscritores da informação [9].

A Figura 3.6 ilustra o conceito básico associado ao barramento de processo, considerando, para isso, uma Unidade de Campo (MU), responsável por adquirir a informação proveniente do parque da subestação, encaminhando-a, posteriormente, para os IEDs.

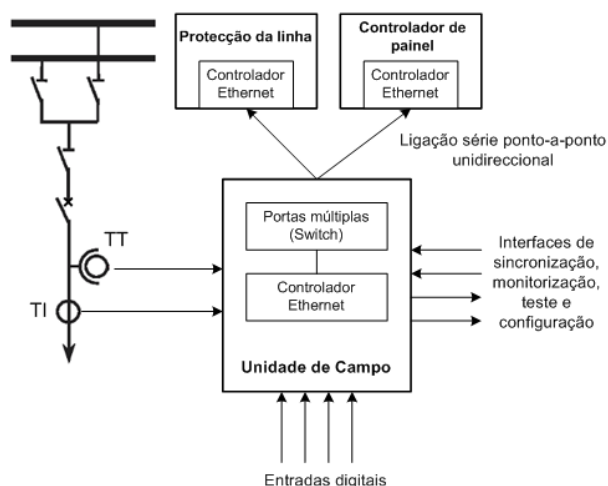


Figura 3.6 - Modelização do conceito de barramento de processo [9].

Os sinais à saída dos Transformadores de Intensidade (TI) e Transformadores de Tensão (TT), bem como informações de estado do processo são entradas da Unidade de Campo (*Merging Unit* - MU). Esta unidade recolhe estes valores com uma taxa de amostragem sincronizada. Desta forma, cada IED pode receber informação proveniente de vários MUs, organizando e processando-a automaticamente. Com base neste princípio de funcionamento podem ser definidas taxas de amostragem diferentes consoante o tipo de funções que se pretende implementar. Por exemplo, para protecção básica da subestação utilizam-se 80 amostras por ciclo do sistema, enquanto para se fazer uma oscilopertubografia de alta resolução já são necessárias 256 amostras [9].

3.6. Linguagem de Configuração da Subestação (SCL)

Na parte 6 da norma IEC 61850 é definida a Linguagem de Configuração da Subestação (SCL), baseada em XML (*eXtensible Markup Language*), para descrever a configuração da subestação. A SCL especifica a hierarquia dos ficheiros de configuração, organizando o sistema em várias camadas para que estas sejam descritas de forma inequívoca e normalizada. São assim definidos quatro tipos de ficheiros SCL, apresentados na Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Descrição dos diferentes tipos de ficheiros SCL [12].

Tipo de ficheiro (extensão)	Conteúdo
ICD (IED Capability Description)	Descrição das capacidades dos IEDs, tal como foi produzido pelo fabricante.
SSD (System Specification Description)	Descrição do esquema unifilar da subestação e dos nós lógicos necessários.
SCD (Substation Configuration Description)	Contém todos os IEDs, uma secção com a configuração da comunicação e outra com a descrição da subestação.
CID (Configured IED Description)	Descreve uma instância do IEDs totalmente configurado.

A forma como se pode aplicar a SCL fica ao critério do utilizador. Por exemplo, o utilizador pode decidir usar o ficheiro CID para auxiliar a configuração dos IEDs. O SCL pode também ser utilizado para reestruturar todo o modelo da subestação, como forma de evitar a que a sua configuração e introdução de dados seja feita manualmente. Assim, reduzem-se os erros relativos a uma má interpretação entre as funcionalidades e requisitos pretendidos para a subestação, melhorando-se, consequentemente, a interoperabilidade do sistema final.

Por último, esta arquitectura também suporta acesso remoto por rede às funções de escrita e leitura de todos os tipos de dados. Tipicamente, as funcionalidades pretendidas nas estações de controlo remotas são monitorizar a subestação a partir de uma interface gráfica semelhante à existente no local e realizar operações de manutenção, engenharia e planeamento. Contudo, a possibilidade de se aceder remotamente à subestação exige que se implementem funções de segurança tais como encriptação e autenticação [9].

3.8. Norma CEI61850: Benefícios e Desafios

Um dos maiores desafios relacionado com o projecto de uma subestação é conseguir justificar os custos de investimento no seu sistema de automação. É claro que são inúmeros os impactos positivos que a automação destas instalações traz, destacando-se entre estes, por exemplo, diminuição dos custos de operação, aumento da qualidade de energia e redução dos tempos de interrupção do serviço. Contudo, é também importante perceber qual as vantagens de utilização de uma norma para o sistema de comunicações, bem como qual o seu impacto nos custos de projecto, construção e exploração das subestações [9].

Os primeiros protocolos de comunicação normalmente eram desenvolvidos com o objectivo de garantirem a operabilidade das funções necessárias na subestação, sendo que ao mesmo tempo procuravam minimizar o número de bits utilizados para enviar a informação. O objectivo era tentar minimizar as limitações impostas pela baixa largura de banda, que caracterizava as ligações série utilizadas até então. Com a evolução e generalização da Ethernet e do TCP/IP, os protocolos antigos foram adaptados para funcionarem sobre estes. Todavia, esta modernização continuava a ter um problema base relacionado com o facto destes protocolos continuarem a ser concebidos de forma a minimizar o número de bits de dados, enviados através dos canais de comunicação. Desta forma, a elevada largura de banda disponibilizada pelas tecnologias de comunicação modernas estava a ser desaproveitada em detrimento de não se otimizar as funcionalidades existentes e reduzir alguns custos relativos ao sistema de automação da subestação [9].

A norma CEI61850 foi desenvolvida tendo em vista funcionar com suporte nas tecnologias de comunicação modernas, disponibilizando, simultaneamente, um grande número de funcionalidades inexistentes quando os primeiros protocolos de comunicação surgiram e começaram a ser introduzidos nas subestações. Para que se melhor se perceba quais os impactos resultantes da utilização da norma serão enumerados nas subsecções 3.8.1 e 3.8.2 as suas principais características e vantagens.

3.8.1. Principais características

- **Utilização de um modelo virtual:** a utilização de um modelo virtual para os dispositivos e nós lógicos, bem como para a ASCI e CDC permite que sejam definidos os dados, serviços e respectivo comportamento para além da definição de como a informação é transmitida na rede que, por sua vez, é ditada pelos protocolos de comunicação.

- **Utilização de nomes para todos os dados:** cada elemento de dados, considerado na norma, está identificado segundo uma *string* descritiva, ao contrário do que acontecia anteriormente, em que, tipicamente, os dados eram identificados através da sua localização de armazenamento, índice ou número do registo.
- **Todos os nomes de objectos são normalizados e definidos no contexto da subestação:** os nomes atribuídos a cada dado de um dispositivo desenvolvido segundo a norma são definidos pela mesma, permitindo que sejam imediatamente identificados no contexto da instalação, de forma inequívoca. Esta foi uma evolução importante atendendo a que identificação atribuída aos dados deixou de ser feita pelos fabricantes, vendedores ou até mesmo pelo operador responsável pela configuração destes equipamentos.
- **Auto-descrição dos equipamentos:** uma aplicação cliente que comunique com um dispositivo normalizado pode aceder à descrição dos dados que suporta, sem que haja necessidade de fazer qualquer configuração manual de objectos de dados ou nomes.
- **Serviços de alto nível:** A ACSI suporta uma grande variedade de serviços que não eram disponibilizados por outros protocolos. Destacam-se como funcionalidades únicas desta norma o GOOSE, GSSE e SMV.
- **Linguagem de configuração normalizada:** A utilização da SCL permite que a configuração de um dispositivo e da respectiva função por ele desempenhada na subestação sejam definidos de forma precisa utilizando um ficheiro XML.

3.8.2. Principais vantagens

- **Eliminação de procura ambígua (dos dispositivos):** com a utilização da SCL o utilizador pode especificar precisamente e de forma inequívoca o que é que se pretende que seja disponibilizado por cada dispositivo, não havendo assim o risco de ser alvo de interpretações erradas por parte dos fornecedores.
- **Baixo custo de instalação:** a norma permite que os dispositivos troquem informação rapidamente, com o GOOSE e do GSSE, através da Rede de Área Local (LAN), não sendo necessário fazer ligações separadas para cada relé. Assim, consegue-se uma redução de custos a nível de cablagem e construção de condutas para a mesma.
- **Custos de migração de equipamento baixos:** com a normalização dos equipamentos as diferenças funcionais entre dispositivos de marcas diferentes são minimizadas e, por vezes, até inexistentes. Todos os dispositivos partilham as mesmas convenções para atribuição de identificação de objectos e dados, minimizando assim a necessidade de reconfigurar a aplicação quando se substituem os dispositivos.
- **Baixos custos de expansão:** A introdução de novos dispositivos e aplicações num sistema implementado com base na norma pode ser feita com o mínimo impacto no

equipamento já existente, uma vez que estes não têm de ser configurados para enviar dados que não estavam acessíveis previamente.

3.9. Sumário

A norma CEI61850 aborda as principais questões relativas às implicações que advêm da migração para o mundo digital. Entre estas residem a normalização dos nomes atribuídos aos dados, criação de um conjunto de serviços explícitos, implementação sobre protocolos e equipamentos normalizados e definição de um barramento de processo na subestação. A principal motivação para a sua utilização passa por assegurar a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos.

Relativamente ao protocolo de comunicação a utilizar para ligação ao centro de controlo, já decorrem discussões no sentido de este ser também baseado na norma CEI61850, sendo que, actualmente, o protocolo utilizado para fazer a ligação ao centro de controlo é definido na norma CEI60870.

Capítulo 4

Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição

Neste capítulo será feita uma descrição da organização do equipamento da subestação a nível do parque exterior e edifício de comando, caracterização técnica e arquitectura funcional dos SPCC, bem como aplicações e serviços dos mesmos. Será também feita uma descrição das funções de protecção implementadas em cada unidade de painel do edifício de comando. Por último, serão apresentadas as várias arquitecturas de ligação dos equipamentos de rede no interior do edifício de comando, bem como a sua evolução.

4.1. Projecto tipo de subestações AT/MT

Segundo [13], o projecto destas subestações engloba três áreas técnicas principais: Equipamento, Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) e Construção Civil. Estas instalações são constituídas por equipamento exterior e equipamento interior como é ilustrado na Figura 4.1:

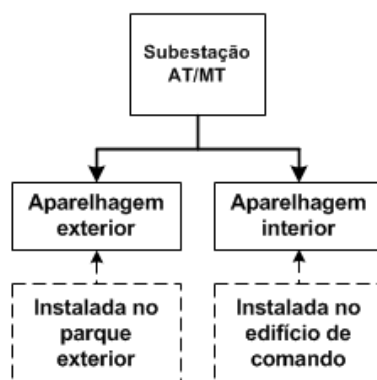


Figura 4.1 - Organização da aparelhagem numa subestação.

No edifício de comando são instalados os equipamentos principais de Média Tensão (MT), os sistemas de alimentação e os Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC). Relativamente aos SPCC, estes são baseados em tecnologia digital e constituídos por unidades

de painel e uma unidade central. As unidades de painel comunicam por fibra óptica e garantem o funcionamento da subestação na ausência de operadores humanos, ou seja, pretende-se que seja possível comandar e supervisionar a subestação a partir de um posto remoto, sendo que estas funcionalidades também estão disponíveis a nível local, na própria subestação [13].

O edifício de comando é constituído por uma sala ampla onde é instalado o equipamento principal de MT - Quadro Metálico de Média Tensão (QMMT) (Figura 4.7) - e os sistemas de alimentação e de comando e controlo. Os sistemas de comando e controlo são integrados em armários próprios designados Armários de Comando e Controlo (ACC) (Figura 4.2 e Figura 4.6) [13]. O QMMT é blindado, estando os equipamentos de Média Tensão e Baixa Tensão (BT) dispostos no interior de compartimentos distintos e completamente fechados, designados por celas. No caso de existirem dois barramentos de MT, as celas de cada um ficarão dispostas em dois alinhamentos paralelos de modo a reduzir a área do edifício de comando. Refira-se que os relés numéricos são instalados nos compartimentos de Baixa Tensão (BT) de cada cela do QMMT [13]. No parque exterior são instalados a maior parte dos equipamentos primários da subestação, isto é, os equipamentos que constituem o Sistema Eléctrico de Energia (SEE).

4.1.1. Armários de Comando e Controlo do edifício de comando

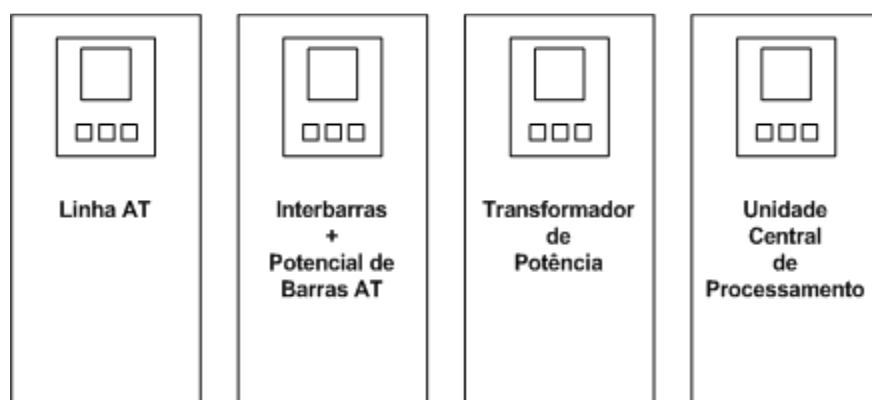


Figura 4.2 - Armários de Comando e Controlo do edifício de comando.

Os Armários de Comando e Controlo (ACC) recebem informação proveniente do equipamento instalado no parque exterior, estando especificado quais os equipamentos que são ligados a cada um deles. A Figura 4.3 apresenta o esquema unifilar de cada um dos equipamentos do painel de linha AT, ligado ao ACC de Linha de Alta Tensão (AT). Este armário é constituído por dois Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs). De referir que este ACC comporta até duas linhas de chegada AT, pelo que, no caso de existirem mais, será necessário instalar outro ACC semelhante.

Relativamente ao esquema unifilar do Potencial (de tensão) de Barras AT (PB AT) e Inter-Barras AT (IB AT), este é apresentado na Figura 4.4. O ACC ao qual são ligados os diferentes órgãos deste painel é, igualmente, constituído por dois IEDs. Por seu lado, ao ACC do Transformador de Potência chegam ligações provenientes dos órgãos apresentados no esquema unifilar da Figura 4.5. O ACC do Transformador de Potência é constituído por três IEDs. Por cada Transformador de Potência é instalado um destes armários. Por último, o ACC

respeitante à Unidade Central de Processamento contém uma Unidade Central e o Posto de Comando Local, constituído por um monitor, teclado e rato para facilitar a interacção com o operador. Cada um destes ACCs tem um comutador (*switch*) onde são ligados, através de fibra óptica, os IEDs. Na secção 4.2.3 será apresentada a arquitectura física de ligação entre dispositivos e armários.

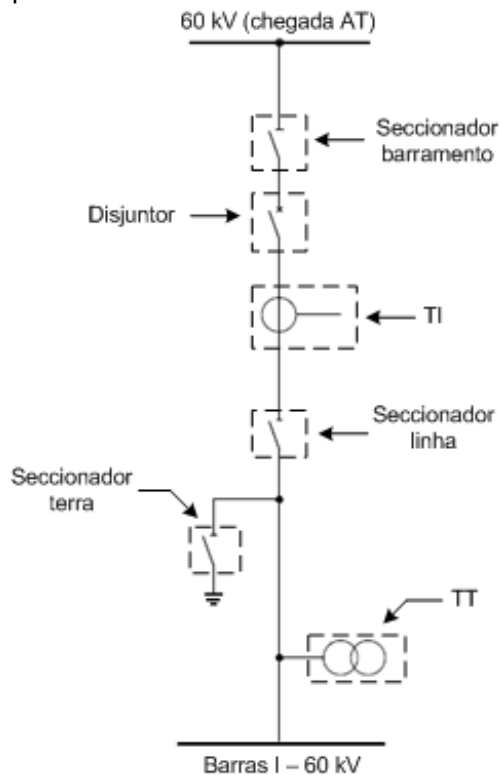


Figura 4.3 - Esquema unifilar do painel de linha AT [14].

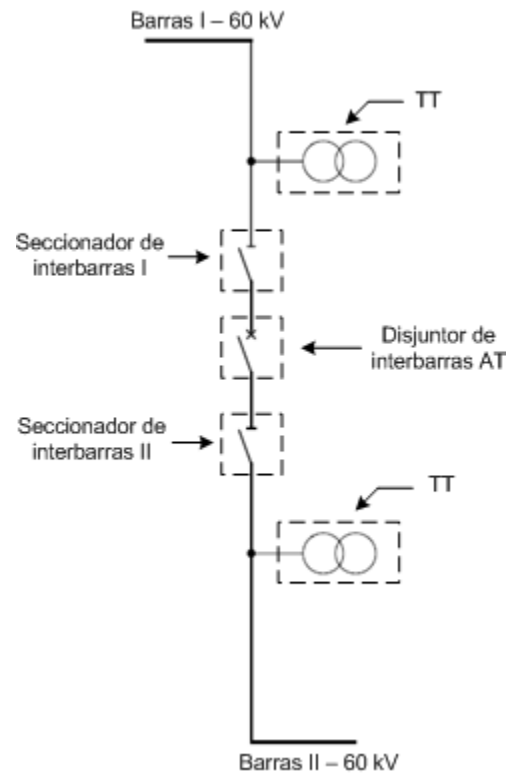


Figura 4.4 - Esquema unifilar do painel de potencial de barras e interbarras AT [15].

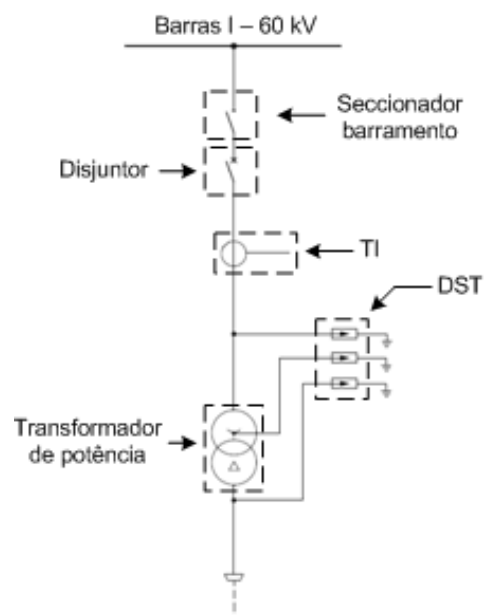


Figura 4.5 - Esquema unifilar do painel do transformador de potência [16].

Nos esquemas unifilares das Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 são apresentados os equipamentos constituintes de cada um dos painéis de AT da subestação. O painel de Linha AT (ver Figura 4.3) é constituído por um seccionador de barramento, um disjuntor, um Transformador de Intensidade (TI), um seccionador de linha, um seccionador de terra e um Transformador de Tensão (TT). Por sua vez, o painel de Potencial de Barras e Inter-Barras AT (ver Figura 4.4) é constituído por dois TTs, dois seccionadores de Inter-Barras e um disjuntor de Inter-Barras. Por último, o painel do Transformador de Potência (ver Figura 4.5) é formado por um seccionador de barramento, um disjuntor, um TI e três Descarregadores de Sobre Tensão (DST).

Para além dos ACCs de Linha AT, Inter-Barras e Potencial de Barras, Transformador de Potência e Unidade Central de Processamento (UCP), existem ainda os apresentados na Figura 4.6. Para as Comunicações existem dois ACCs, sendo que um é utilizado para as ligações de fibra óptica e outro para os repartidores locais, onde são disponibilizadas, por exemplo, as interfaces para cada um dos teleserviços referidos na Tabela 4.3. O ACC de Contagem é constituído por equipamento de contagem de energia referente ao Transformador de Potência, Bateria de Condensadores e Serviços Auxiliares de Corrente Alternada (SACA). O ACC de Contagem possui ainda equipamento de telecontagem. Por sua vez, o ACC de Qualidade de energia contém um Sistema de Monitorização da Qualidade de Energia. O armário dos SACA não possui IED. Todavia, o IED que é instalado no armário dos Serviços Auxiliares de Corrente Contínua engloba as funções associadas aos SACC e SACA. No que toca aos armários para o sistema de baterias, existem no máximo três ACCs, estando destinado um para o alimentador e os restantes para as baterias.

Nos ACCs de Linha AT, Inter-Barras e Potencial de Barras, Transformador de Potência, Unidade Central de Processamento (UCP) e Serviços Auxiliares de Corrente Contínua é utilizado um *switch* por armário. Assim, os IEDs instalados em cada armário são ligados ao respectivo *switch*. Porém, nos ACCs apresentados na Figura 4.6, com excepção do ACC dos SACC, não é instalado nenhum *switch* por armário.

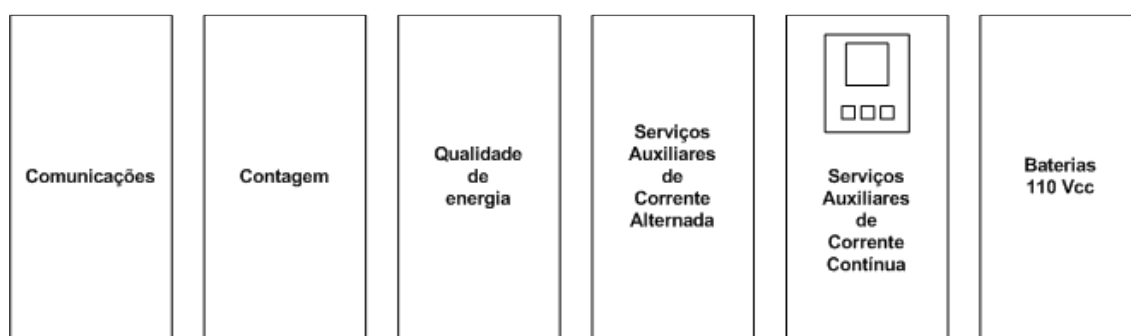


Figura 4.6 - Armários de Comando e Controlo do edifício de comando.

4.1.2. Quadros Metálicos de Média Tensão do edifício de comando

Ao encontro do que acontece com os Armários de Comando e Controlo (ACC), também os Quadros Metálicos de Média Tensão (QMMT) monitorizam e controlam parte da aparelhagem que está instalada no parque exterior da subestação, estando especificado o que é ligado a

cada um, no que concerne a equipamento exterior e instalado nas suas celas interiores. A Figura 4.7 apresenta as várias celas que constituem um QMMT.

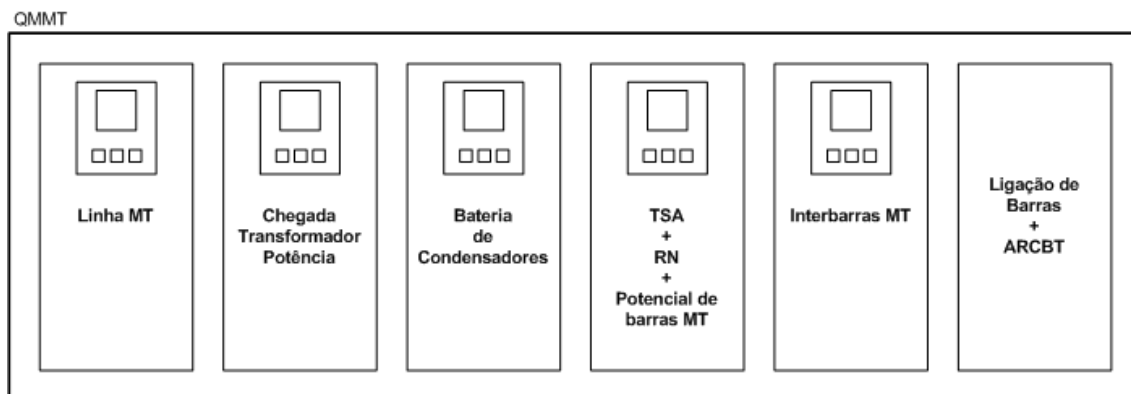


Figura 4.7 - Quadro Metálico de Média Tensão do edifício de comando.

Nas Figura 4.8 e Figura 4.9 são apresentados os esquemas unifilares com a aparelhagem que é ligada aos QMMTs de Linha MT (Média Tensão) e Chegada do Transformador de Potência, respectivamente. De referir que, embora sejam representados os divisores capacitivos nos esquemas unifilares, actualmente não é realizada qualquer tipo de monitorização, do ponto de vista do edifício de comando, sobre estes equipamentos. Tipicamente são utilizados com o intuito de sinalizarem e indicarem, se os barramentos aos quais estão ligados se encontram sobre tensão.

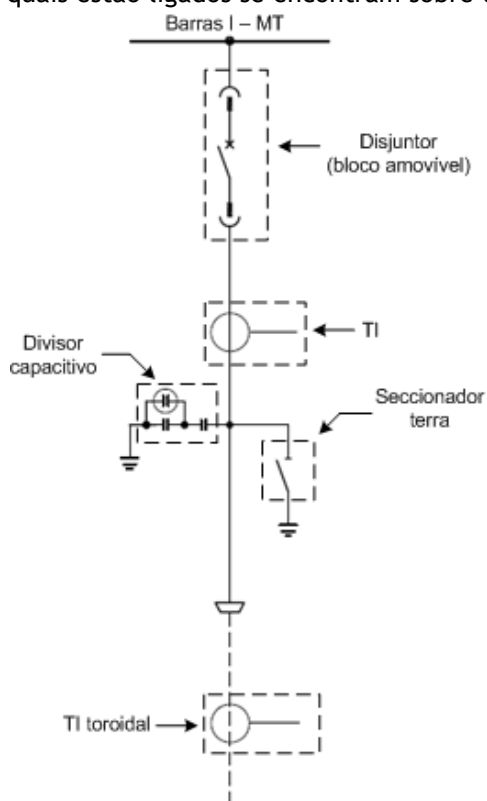


Figura 4.8 - Esquema unifilar do painel de linha MT [17].

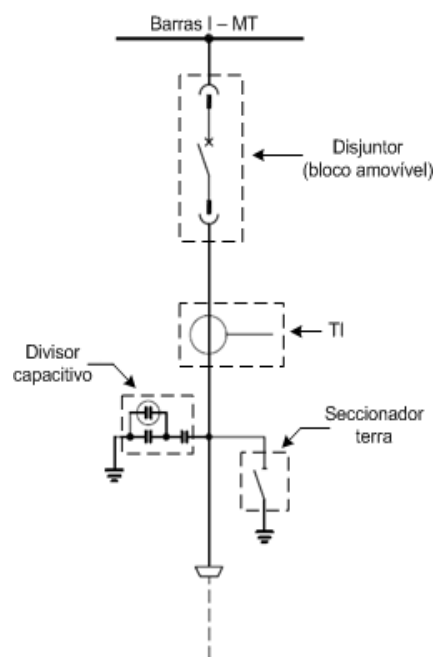


Figura 4.9 - Esquema unifilar do painel de chegada do transformador de potência [18].

O painel de Linha MT (ver Figura 4.8) é constituído por um disjuntor, um Transformador de Intensidade (TI), um divisor capacitivo, um seccionador de terra e um TI toroidal. Por sua vez, o painel de Chegada do Transformador de Potência (ver Figura 4.9) é constituído por um disjuntor, um TI, um divisor capacitivo e um seccionador de terra. Por seu lado, os esquemas unifilares dos painéis da bateria de condensadores, Figura 4.10, e do transformador de serviços auxiliares (TSA), regime de neutro (RN) e potencial (de tensão) de barras MT (PB MT), Figura 4.11, demonstram os equipamentos ligados e instalados em cada uma das respectivas celas do QMMT. O painel da bateria de condensadores (ver Figura 4.10) é constituído por um disjuntor, um TI, um divisor capacitivo, um seccionador de terra, um TI toroidal e pelos escalões das baterias de condensadores. O painel de TSA, RN e PB MT é constituído por um TT, um disjuntor, um TI, um divisor capacitivo, um seccionador de terra, o selector de regime de neutro, o transformador de serviços auxiliares e um TI toroidal.

Com excepção da cela de Ligação de Barras e ARCBT (Armário de Reagrupamento de Cabos de Baixa Tensão), em que não é instalado nenhum IED, e no do TSA, RN e Potencial de Barras MT em que, nalguns casos, podem ser instalados dois, em todas as restantes é instalado um IED por armário. No QMMT só existem *switches* no quadro de Ligação de Barras e ARCBT, ao invés do que acontecia nalguns ACCs, em que eram instalados *switches* individuais em cada armário.

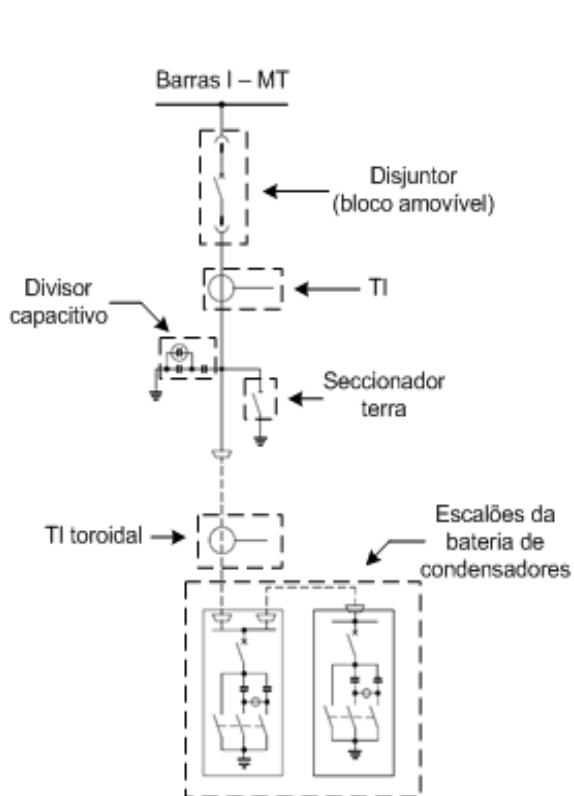


Figura 4.10 - Esquema unifilar do painel da bateria de condensadores [19].

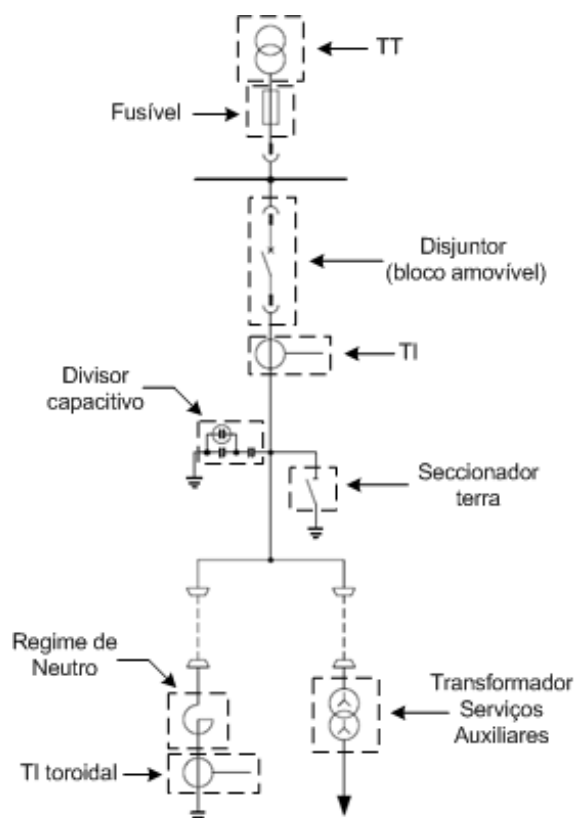


Figura 4.11 - Esquema unifilar do painel de TSA, RN e potencial de barras MT [20].

4.1.3. Caracterização técnica dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações

Na caracterização técnica dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) que consta do projecto tipo das subestações em questão são definidos os aspectos referidos na Figura 4.12:

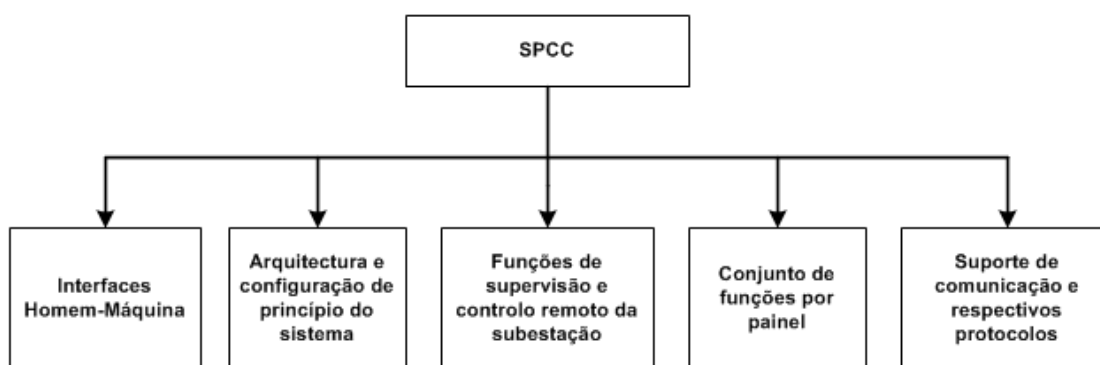


Figura 4.12 - Aspectos considerados na especificação técnica dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo de uma subestação de distribuição [13].

O objectivo final passa por conceber um sistema modular, distribuído e flexível capaz de suportar potenciais evoluções a nível da instalação, bem como uma simplificação do número de ligações entre os diversos equipamentos constituintes do SPCC. Ao mesmo tempo também se pretende assegurar uma melhoria da supervisão da subestação, possível através do aperfeiçoamento dos sistemas de gestão e disponibilização da informação, tendo em vista facilitar grande parte das tarefas a realizar na subestação, entre as quais se destacam as de controlo, manutenção e planificação. Por último, pretende-se otimizar o controlo sobre as diversas funcionalidades do sistema com base na integração dos equipamentos instalados nos diferentes painéis da subestação [13].

No que toca à arquitectura funcional dos SPCC, tipicamente, aparecem associadas ao sistema de protecção, comando e controlo de uma subestação AT/MT as seguintes funções:

- Modo de funcionamento e encravamentos;
- Protecções;
- Automatismos;
- Gestão da informação;
- Manutenção e teleparametrização;
- Interface Homem-Máquina.

No sentido de se normalizar a arquitectura implementada nas várias subestações para os SPCC, opta-se por fazer uma abordagem mais genérica, independente da configuração da instalação, que pressupõe a existência de três níveis hierárquicos - Figura 4.13. No nível 0 estão todos os equipamentos de alta e média tensão com os quais o SPCC interage. Por sua vez, no nível 1 é constituído pelas unidades de painel, isto é, pelos Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED), estabelecendo a interface entre os equipamentos do nível 0 e a unidade

central, localizada no nível 2. A interligação entre os níveis 0 e 1 é efectuada através de ligações eléctricas fio a fio (cabos de alta tensão), enquanto que a comunicação entre as unidades de painel e entre estas e a unidade central é feita por intermédio de uma rede de comunicação de dados com suporte físico para fibra óptica. O SPCC deverá garantir, de forma ininterrupta, que toda a informação proveniente da sua interacção com a subestação e por si gerada possa ser disponibilizada para o Centro de Condução, situado num local remoto ao da subestação. O objectivo é permitir que o comando e controlo da subestação possa ser efectuado à distância [13].

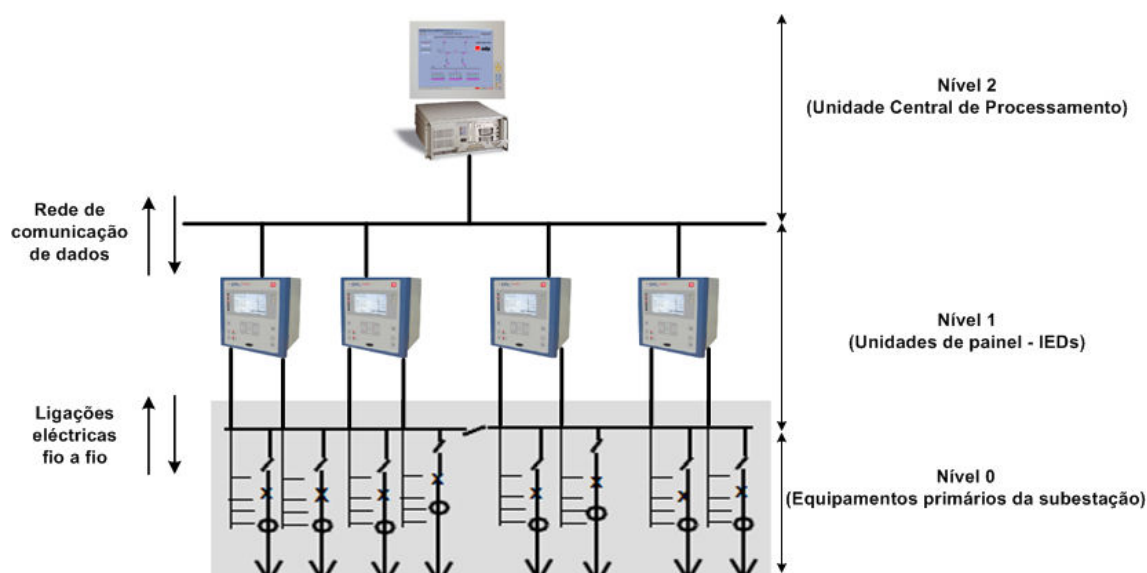


Figura 4.13 - Modelo de organização dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações.

Na Tabela 4.1 apresentam-se as funções que deverão ser desempenhadas pelos diferentes módulos constituintes dos dispositivos do nível 1, ou seja, dos IED, que coaduna com a estrutura apresentada na Figura 2.3, apresentada na secção 2.1.3 do capítulo 2. Por outro lado, na figura x apresenta-se um resumo das funções que deverão estar implementadas na Unidade Central, localizada no nível 2 da arquitectura organizacional apresentada na Figura 4.13.

Tabela 4.1 - Funções desempenhadas pelos diferentes módulos de um IED [13].

Módulo	Função
Entrada	Aquisição de informação proveniente do processo
Processamento	Processamento das funções de protecção, automatismos, condições específicas de funcionamento e funções complementares existentes no painel
Saída	Emissão de ordens para o processo
Comunicação	Interacção com outras unidades de painel e unidade central através da rede de comunicação local
Interface Homem-Máquina	Disponibilização ao utilizador de informação e permitir o comando local do painel

De salientar, que estas unidades deverão conter um sistema de diagnóstico que verifique continuamente o estado do software e hardware de todos os módulos funcionais existentes no seu interior. Este sistema de diagnóstico é tipicamente designado de *watchdog*.

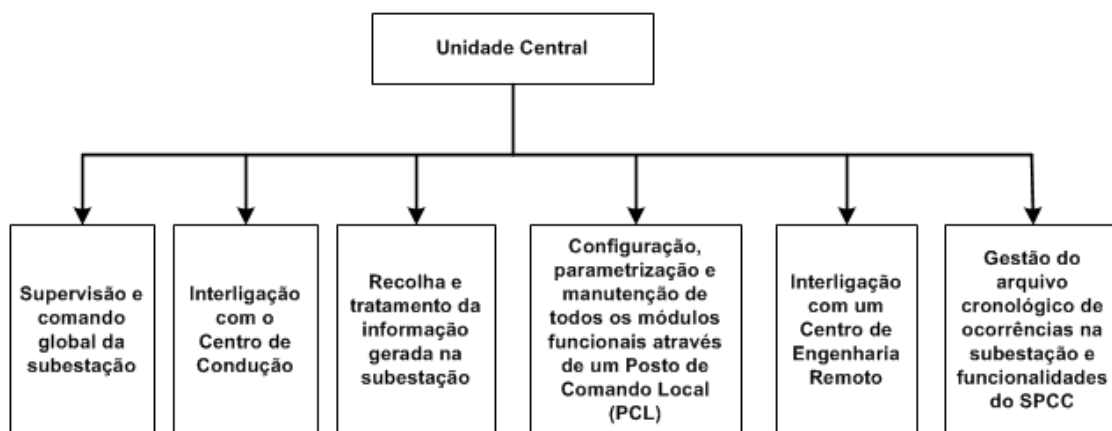


Figura 4.14 - Funções desempenhadas pela Unidade Central, instalada num Armário de Comando e Controlo do edifício de comando.

A Unidade Central deverá ser um sistema computacional do tipo PC industrial, ou equivalente, equipado com monitor, teclado e rato de forma a facilitar a interface com o operador na subestação.

4.1.4. Aplicações e serviços dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo

As aplicações e serviços disponibilizados pelos SPCC são apresentados na Figura 4.15, enquanto que na Tabela 4.2 é feita uma breve caracterização das mesmas.

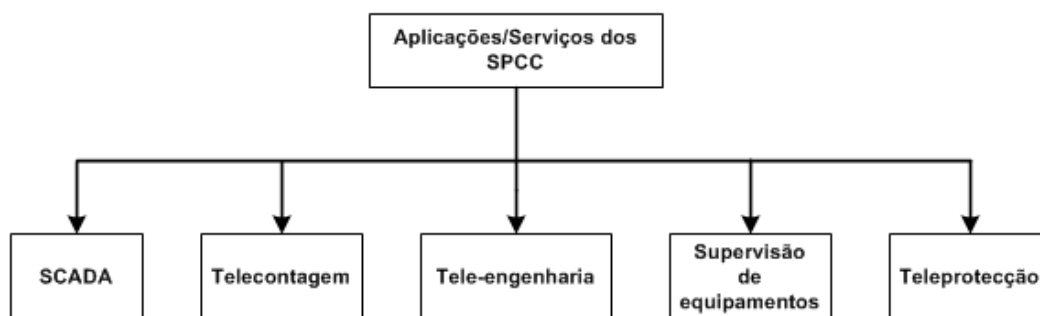


Figura 4.15 - Aplicações e serviços disponibilizados pelos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo de uma subestação de distribuição.

Tabela 4.2 - Caracterização dos serviços disponibilizados pelos SPCC [13].

Aplicação/Serviço	Caracterização
SCADA	Supervisão e comando da subestação, local ou remotamente.
Telecontagem	Recolha dos valores de energia nos diferentes painéis da subestação.
Tele-engenharia	Alteração de parâmetros e modos de funcionamento das funções de protecção e de automatismo, bem como recolha de dados relativos à ocorrência de eventos e de osciloperturbografia armazenados nos IED. Permite ainda a alteração de parâmetros e de configuração da unidade central do SPCC e recolha de dados das funções de autodiagnóstico.
Supervisão de equipamentos	Serviço de manutenção e/ou supervisão à distância de equipamentos existentes na subestação.
Teleprotecção	Deverá assegurar a ligação ponto-a-ponto digital entre duas ou três instalações distintas, através de uma ligação directa ou canal multiplexado.

Para além destes serviços ainda existem outros que, não sendo essenciais para o funcionamento pretendido para o sistema, asseguram maior segurança e, consequentemente, melhor qualidade de serviço da subestação - Figura 4.16.

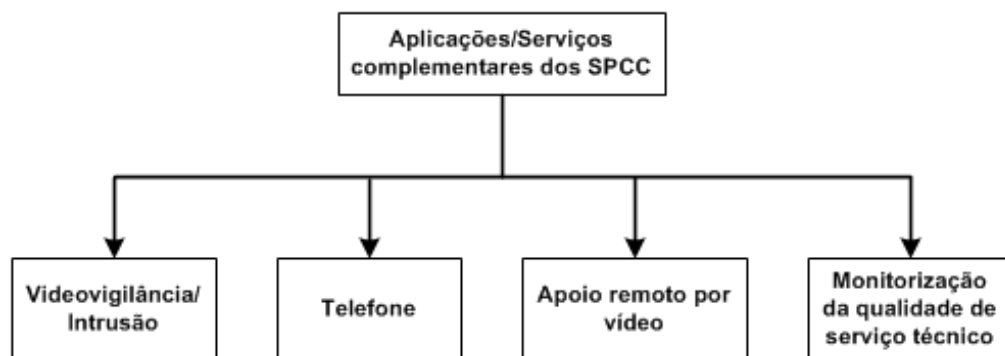


Figura 4.16 - Aplicações e serviços complementares dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo.

Alguns serviços dos SPCC requerem comunicação com o centro de controlo, pelo que é necessário disponibilizar no armário de comunicações, localizado no interior do edifício de comando, as interfaces necessárias para ligação dos equipamentos onde estão implementados estes mesmos serviços. Na Tabela 4.3 apresentam-se os tipos de ligação, velocidades e disponibilidade requeridas por cada um dos serviços apresentados na Figura 4.16.

Tabela 4.3 - Caracterização técnica dos teleserviços dos SPCC [13].

Serviço de comunicação	Caracterização técnica do serviço de comunicação			
	Tipo de ligação	Velocidade mínima	Disponibilidade de serviço	Grau de importância
SCADA	Canal digital (RS232)	9600 kbps	Permanente	Prioritário
	Canal digital (Ethernet)	2 MB		
	Canal áudio (4 fios)	1200 kbps		
Telecontagem	Canal digital (Ethernet)	9600 kbps	Pedido	Prioritário
Tele-engenharia	Canal digital (Ethernet)	512 kbps	Pedido	Não prioritário
Supervisão de equipamentos	Canal digital (Ethernet)	256 kbps	Pedido	Não prioritário
Teleprotecções	Canal digital (multiplexado ou directo)	64 kbps	Pedido	Prioritário
Monitorização QST	Canal digital (Ethernet)	512 kbps	Pedido	Não prioritário
Videovigilância	Canal digital (Ethernet)	2 MB	Permanente	Prioritário
Telefone	Rede fixa (2 fios)	-	Pedido	Prioritário
Apoio remoto por video	Canal digital (Ethernet)	2 MB	Pedido	Prioritário

4.1.5. Funções de protecção implementadas nas diferentes unidades de painel do edifício de comando

Em cada painel do edifício de comando são utilizadas funções de protecção específicas, definidas em [21], de acordo com o andar de tensão (AT ou MT) e dos equipamentos a proteger.

4.1.5.1. Funções de protecção do painel de Linha AT:

- **Distância:** Representa a função de protecção principal de linhas de Alta Tensão, uma vez que a sua característica tempo-distância permite rapidez e selectividade na detecção de defeitos Fase-Fase (F-F) e Fase-Terra (F-T). Esta função deverá estar permanentemente activa [21].
- **Diferencial de linha ou cabo** (utilização facultativa): A função diferencial, quando considerada, constitui a protecção principal de cabos ou linhas aéreas de AT, permitindo detectar e eliminar defeitos entre os transformadores de intensidade localizados nos painéis AT que interligam as respectivas subestações [21].
- **Máxima Intensidade de Fase:** A função de protecção de máximo de intensidade de fase (MIF) deverá ser trifásica, com pelo menos dois níveis de detecção ($I >$ e $I >>$) e de funcionamento por tempo independente, para o qual deverão ser consideradas uma actuação "instantânea" e outra "temporizada" para cada nível [21].
- **Máxima Intensidade Homopolar Direcional:** A função de protecção de máximo de intensidade homopolar direcional (MIHD) deverá ter um nível de detecção ($I_0 >$) com funcionamento por tempo independente ou tempo inverso (segundo as normas IEC: tempo definido, tempo normalmente inverso, tempo muito inverso, tempo extremamente inverso e logarítmico), e para o qual deverão ser consideradas uma actuação "instantânea" e outra "temporizada" [21].
- **Máxima Intensidade Homopolar de Terras Resistentes:** A ocorrência de trabalhos TET implica que se inclua uma função de protecção de máximo de intensidade homopolar de elevada sensibilidade (terras resistentes), de tempo independente com possibilidade de actuação instantânea [21].
- **Power Swing Detection:** Esta função tem como objectivo detectar oscilações de potência no sistema de distribuição, bloqueando a função de protecção de distância, de modo a impedir a sua actuação intempestiva [21].
- **Weak End Infeed:** Se as correntes de defeito não forem significativas no extremo com defeito na linha protegida, poderão não ser suficientes para fazer actuar os elementos de medida, pelo que não existirá o envio do sinal de teleprotecção, originando disparos temporizados (em *backup*) no extremo com maior corrente de defeito. Esta função permite reenviar os sinais recebidos do extremo com maior corrente de defeito, assegurando deste modo a actuação da função de distância, mesmo com correntes de defeitos reduzidas [21].
- **Ligação sobre defeito:** Deverá ser prevista uma função que detecte uma ligação sobre defeito. Esta garantirá o disparo instantâneo e definitivo do disjuntor da linha pela função distância e/ou direcional de terra, no momento da ligação manual do disjuntor, se for detectado um defeito na linha associada ao painel [21].
- **Condutor partido:** Esta função tem como objectivo detectar a interrupção de uma fase na linha a proteger podendo ser baseada no aparecimento da componente inversa da corrente ou em qualquer outro método, desde que seja garantida a detecção eficaz da assimetria da rede resultante deste tipo de defeito [21].
- **Teleprotecção:** O objectivo da função de teleprotecção é permitir a eliminação instantânea dos defeitos localizados ao longo da linha [21].

- **Verificação de sincronismo:** Esta função destina-se a garantir as condições de sincronismo entre sistemas provenientes de fontes de energia distintas (diferentes pontos injectores, Produção em Regime Especial) [21].

4.1.5.2. Funções de protecção do painel de Barras AT

- **Diferencial:** A função diferencial constitui a protecção principal do barramento AT, permitindo detectar e eliminar instantaneamente (tempo total de operação inferior a 20 ms) defeitos entre os transformadores de intensidade localizados nos painéis AT interligados no mesmo barramento [21].
- **Mínimo de Tensão:** A função de mínimo de tensão deverá ser trifásica e associada a cada semibarramento AT, tendo por missão desencadear a função de automatismo “deslastre por falta de tensão/reposição por regresso de tensão” [21].
- **Verificação de sincronismo.**

4.1.5.3. Funções de protecção do painel de Transformador de Potência

- **Diferencial:** A função protecção diferencial, que constitui a protecção principal do transformador de potência, terá como missão reduzir ao mínimo as consequências nefastas de uma avaria ou defeito interno neste equipamento [21].
- **Máximo de Intensidade de Fase.**

4.1.5.4. Funções de protecção do painel de Chegada MT

- **Máximo de Intensidade de Fase:** Esta função de protecção, para além de proteger o barramento MT contra defeitos fase-fase, desempenhará um papel de reserva às funções semelhantes dos painéis de linhas MT [21].
- **Mínimo de tensão:** Deverá detectar a falta da tensão para que se proceda ao deslastre das cargas alimentadas pelo semibarramento em causa. Quando a tensão no semibarramento normalizar, será desencadeado o processo de reposição em serviço das cargas anteriormente deslastradas [21].
- **Máximo de tensão:** Esta função tem por objectivo detectar situações de elevação anormal da tensão de barras MT, desencadeando o disparo temporizado do disjuntor do painel de chegada MT [21].
- **Mínimo de frequência:** Esta função de protecção detecta abaixamentos de frequência na rede, informando posteriormente a função de automatismo “deslastre por mínimo de frequência/reposição por normalização de frequência”, para que se proceda à desligação selectiva das cargas da subestação [21].

4.1.5.5. Funções de protecção do painel de Bateria de Condensadores

- **Desequilíbrio de neutro:** Deverá ser prevista uma função de protecção de desequilíbrio de neutro por escalão, para detectar situações de defeito interno nas baterias, como por exemplo, a danificação de elementos [21].
- **Máximo de Intensidade de Fase;**
- **Máximo de Intensidade Homopolar;**
- **Máximo de tensão.**

4.1.5.6. Funções de protecção do painel de Linha MT

- **Máximo de Intensidade de Fase;**
- **Máximo de Intensidade Homopolar Direccional;**
- **Máximo de Intensidade Homopolar de Terras Resistentes;**
- **Condutor partido;**
- **Presença de tensão:** Sempre que seja interligada uma unidade independente de produção de energia numa determinada saída de linha MT da subestação, e se assim se entender, dever-se-á incluir um detector de presença de tensão nesse painel. A sua função é efectuar a verificação da presença de tensão na saída de linha MT, em situações de ordens de fecho do disjuntor, quer em resultado de uma actuação por automatismo, quer por um comando voluntário - local ou por telecomando [21].
- **Cold Load Pickup / Inrush Restraint:** Esta função tem como objectivo evitar actuações intempestivas das funções de protecção associadas aos picos de corrente, na sequência de ligação de cargas (colocação em carga de uma linha ou arranques directos de motores de potência elevada) [21].

4.1.4.7. Funções de protecção do painel do Transformador de Serviços Auxiliares e Reactância de Neutro

- **Máximo de Intensidade de Fase;**
- **Máximo de Intensidade Homopolar de Barras MT;**
- **Máximo Intensidade Homopolar de Terras Resistentes;**
- **Máximo de Tensão Homopolar de Terras Resistentes:** Quando o andar MT da subestação for explorado em regime de neutro isolado, a detecção de defeitos à terra resistivos no andar MT é efectuada através da função de protecção máximo de tensão homopolar [21].

Os painéis de linha AT e linha MT devem estar preparados para funcionar em Regime Normal de Exploração e em Regime Especial de Exploração, sendo que este está associado à realização de trabalhos em tensão na rede. De salientar que a opção por um destes regimes pode ser feita na Interface Homem-Máquina (HMI) do IED ou por comando remoto, estando

associado a cada um deles funções de protecção específicas. Assim, no caso do painel de linha AT, deverão estar implementadas as seguintes:

Regime Normal de Exploração:

- Função de protecção Distância e/ou Diferencial em serviço com religador associado;
- Funções de Máximo de Intensidade de Fase e Homopolar Direccional temporizadas;
- Função de protecção Máximo de Intensidade Homopolar inibida.

Regime Especial de Exploração (trabalhos em tensão):

- Inibição da função de automatismo Religação;
- Função de protecção Distância e/ou Diferencial em serviço;
- Funções de MIF e MIHD de actuação instantânea;
- Função de protecção MIH em serviço.

Por sua vez, para o painel de linha MT deverão considerar-se as seguintes:

Regime Normal de Exploração:

- Todas as funções de protecção temporizadas;
- Função religação em serviço (no caso de ser utilizada).

Regime Especial de Exploração A:

- Funções de MIF e MIH com actuação instantânea;
- Função de Máximo de Intensidade Homopolar de Terras Resistentes bloqueada.

Regime Especial de Exploração B:

- Função de MIF com actuação instantânea;
- Funções de PTR e MIF bloqueadas.

4.1.6. Funções complementares implementadas em cada unidade de painel do edifício de comando

Para além das funções de protecção implementadas em cada unidade de painel, existem outras que embora não sejam fundamentais para o funcionamento do sistema de protecção, melhoram a qualidade de serviço e permitem ter uma melhor monitorização e conhecimento sobre o estado do sistema em cada instante.

Tabela 4.4 - Funções complementares existentes em cada unidade de painel do edifício de comando.

Painel Função	Painel de Linha AT	Painel de Barras AT	Painel de Transformador de Potência (AT/MT)	Painel de Chegada MT
Monitorização do disjuntor	x		x	X
Registo de acontecimentos	x	x	x	X
Osciloperturbografia	x	x	x	X
Localização de Defeitos	x			
Comutação de parâmetros	x			
Selectividade lógica				X

Tabela 4.5 - Funções complementares existentes em cada unidade de painel do edifício de comando (continuação).

Painel Função	Painel de Bateria de Condensadores	Painel de Saída MT	Painel do Transformador de Serviços Auxiliares e Regime de Neutro
Monitorização do disjuntor	x	x	X
Registo de acontecimentos	x	x	x
Osciloperturbografia	x	x	x
Localização de defeitos			
Comutação de parâmetros		x	
Selectividade lógica			x

4.1.7. Funções de automatismo implementadas em cada unidade de painel do edifício de comando

Tabela 4.6 - Funções de automatismo e respectiva localização.

Função de automatismo	Localização
Comutação automática de disjuntores BT	Painel do TSA
Religação rápida e/ou lenta de disjuntores	Painéis de linha AT e MT
Pesquisa de terras resistentes	Painel de linha MT
Deslastre por falta de tensão/religação por regresso de tensão	Painel de barramentos AT e MT
Deslastre por mínimo de frequência/religação por normalização de frequência	Painel de barramento MT
Regulação de tensão	Painel de barramento MT
Comando horário das baterias de condensadores	Painel de baterias de condensadores

4.1.7.1. Comutação automática de disjuntores de Baixa Tensão (BT)

O objectivo desta função é actuar sobre os disjuntores de baixa tensão dos painéis TSA das subestações de distribuição, podendo funcionar em modo manual ou automático, assegurando assim a alimentação do barramento de corrente alternada através da selecção automática do transformador de serviço auxiliar que reúna as condições para o efeito. Existem no máximo 2 destes disjuntores por subestação [22].

4.1.7.2. Religação rápida e/ou lenta de disjuntores

O objectivo desta função é actuar sobre os painéis de linha AT e/ou MT das subestações com o intuito de eliminar automaticamente defeitos não permanentes (fugitivos e semipermanentes) nestes mesmos painéis, assegurando assim a reposição do serviço após

interrupções de curta duração, realizadas automaticamente. É importante referir que a religação lenta não é válida para linhas AT [23].

4.1.7.3. Pesquisa de terras resistentes

Um defeito resistente à terra é um defeito cuja resistência de defeito é muito elevada o que tem como principal consequência o facto de as correntes de defeito serem muito baixas, o que pode levar a que as funções de protecção implementadas a nível dos painéis de linha MT por terem uma sensibilidade limitada não as consigam detectar. Assim, surge a necessidade de utilização de um detector de terras resistentes que assegura uma função de protecção de máximo de intensidade de corrente homopolar de alta sensibilidade, tendo em vista a detecção destas mesmas correntes a nível dos barramentos [24].

No que concerne à função de automatismo de pesquisa de terras resistentes, esta tem como objectivo identificar de forma automática e coordenada com a função de religação os defeitos à terra resistentes que não sejam detectados pelos sistemas de protecção de um painel de linha MT associados a um barramento. Esta protecção estará ao cargo de protecções existentes em cada painel MT de reactância de neutro [24].

Relativamente ao seu funcionamento, esta função de automatismo deverá identificar e retirar de serviço todos os painéis das linhas de saída em MT que apresentem um defeito resistente permanente, sendo que os restantes painéis deverão continuar em serviço [24].

4.1.7.4. Deslastre por falta de tensão/religação por regresso de tensão

Esta função está implementada ao nível dos andares AT e MT da subestação tem como objectivo actuar sobre os painéis dos barramentos destes mesmos andares de forma a desligá-los simultaneamente quando o valor da tensão excede determinados limites definidos pelas funções de máximo e mínimo de tensão. A ligação destes painéis é restabelecida sequencialmente logo que os valores de tensão retomem os valores admissíveis e aceites em regime de funcionamento normal. A ideia é evitar que todas as linhas de um barramento sejam alimentadas bruscamente após o deslastre. Assim, procede-se a uma ligação da alimentação de forma gradual tendo em vista diminuir as sobreintensidades e perturbações que lhe estão associadas. Os painéis onde está implementada esta função de automatismo podem estar programados para realizar apenas a função de deslastre, em vez do conjunto deslastre mais reposição [25].

4.1.7.5. Deslastre por mínimo de frequência/religação por normalização de frequência

Esta função está implementada no andar de tensão MT, actuando sobre os painéis ligados a cada um dos barramentos existentes de forma a evitar o colapso da rede no caso desta diminuir abaixo de valores pré-configurados na fase de implementação da protecção. Logo que o valor da frequência corresponda ao aceitável num regime de funcionamento normal

pode-se proceder à religação dos painéis que foram desligados pelo deslastre. Contudo, é importante referir que neste caso, e ao contrário do que acontece com a religação por regresso de tensão, esta função não é automática, isto é, é necessário enviar uma ordem voluntária, a partir do Centro de Condução, para que a função de reposição seja desencravada e possa ser efectuada [26].

4.1.7.6. Regulação de tensão

Esta função tem como objectivo estabilizar a tensão de um barramento MT de acordo com valores pré-definidos de forma a tentar compensar os efeitos das variações do valor da tensão primária e das quedas de tensão em carga no ou nos transformadores que alimentam este barramento. Para tal, a tensão no barramento de MT é comparada com um valor pré-estabelecido (valor de referência). Consoante o valor actual do desvio entre estas duas variáveis serão emitidas ordens para os dispositivos de comando dos comutadores das tomadas em serviço dos transformadores que alimentam este barramento, de forma a aumentar ou diminuir o valor da tensão secundária, mantendo-a no domínio dos valores pretendidos e definidos a priori [27].

Este módulo de funcionamento básico pode ser complementado com outros, entre os quais se destacam:

- Compensação da queda de tensão na linha;
- Controlo do funcionamento de transformadores em paralelo (minimização da energia reactiva que circula);
- Interacção com as funções de automatismo “deslastre/reposição por tensão” e “deslastre/ reposição por frequência”;
- Interacção com a função “comando de baterias de condensadores”;
- Controlo das ordens de aumento e diminuição do valor da tensão, com o intuito de serem correctamente emitidas pela própria função.

4.1.7.7. Comando horário de bateria de condensadores

Esta função é implementada a nível dos painéis de bateria de condensadores de MT, actuando sobre os respectivos escalões de acordo com a programação planeada com o objectivo de melhorar o factor de potência das cargas alimentadas pela instalação. O resultado pretendido é reduzir os encargos relativos à compra de energia reactiva e às perdas e quedas de tensão na rede a montante [28].

4.2. Arquitectura física da rede de comunicação do edifício de comando

A criação da norma CEI61850 [29] motivou a que se procedesse a uma reformulação na forma como eram ligados e organizados os equipamentos do edifício de comando, do ponto de vista da rede de comunicação de dados. Anteriormente à adopção desta norma não havia uma solução normalizada, para a rede de comunicação, entre os vários fabricantes de equipamentos. Por exemplo, a ABB e a Efacec adoptavam arquitecturas distintas nas redes de comunicação de dados que interligavam os vários equipamentos do SPCC. Na secção 4.2.1 e 4.2.2 apresentam-se as arquitecturas implementadas nas subestações de distribuição pela Efacec e ABB. De referir que estas soluções ainda não tinham como base a norma CEI61850, pelo que já estão obsoletas. Na secção 4.2.3 é apresentada a arquitectura da rede de comunicação utilizada nos SPCC actuais. Esta arquitectura é independente do fabricante dos equipamentos o que, por si só, já introduz uma considerável melhoria para estes sistemas.

4.2.1. Arquitectura do sistema de comunicação da Efacec utilizando o protocolo LonWorks

Para o estudo da solução proposta pela Efacec para as redes de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações considerar-se-á uma simplificação do esquema geral unifilar de uma subestação de distribuição tipo, apresentado em [30]. O esquema unifilar simplificado considerado é constituído por dois painéis de linha de chegada de Alta Tensão (AT), um painel de barras AT, um painel de transformador de potência, um painel do transformador de serviços auxiliares (TSA), regime de neutro (RN) e potencial de barras de Média Tensão (MT), um painel da bateria de condensadores e seis painéis de linhas de saída MT. Na Figura 4.17 apresenta-se a arquitectura física da rede de comunicação de dados do Sistema de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) utilizado pela Efacec até ao ano de 2005, com base no esquema unifilar simplificado descrito.

Os equipamentos apresentados na Figura 4.17 são desenvolvidos pela Efacec com excepção de uma protecção de distância, que é desenvolvida pela ABB. Os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) da ABB realizam a função de protecção distância dos painéis de chegada de linha de Alta Tensão (AT), estando ligados em anel ao Posto de Comando Central do edifício de comando da subestação através do protocolo de comunicação SPA Bus.

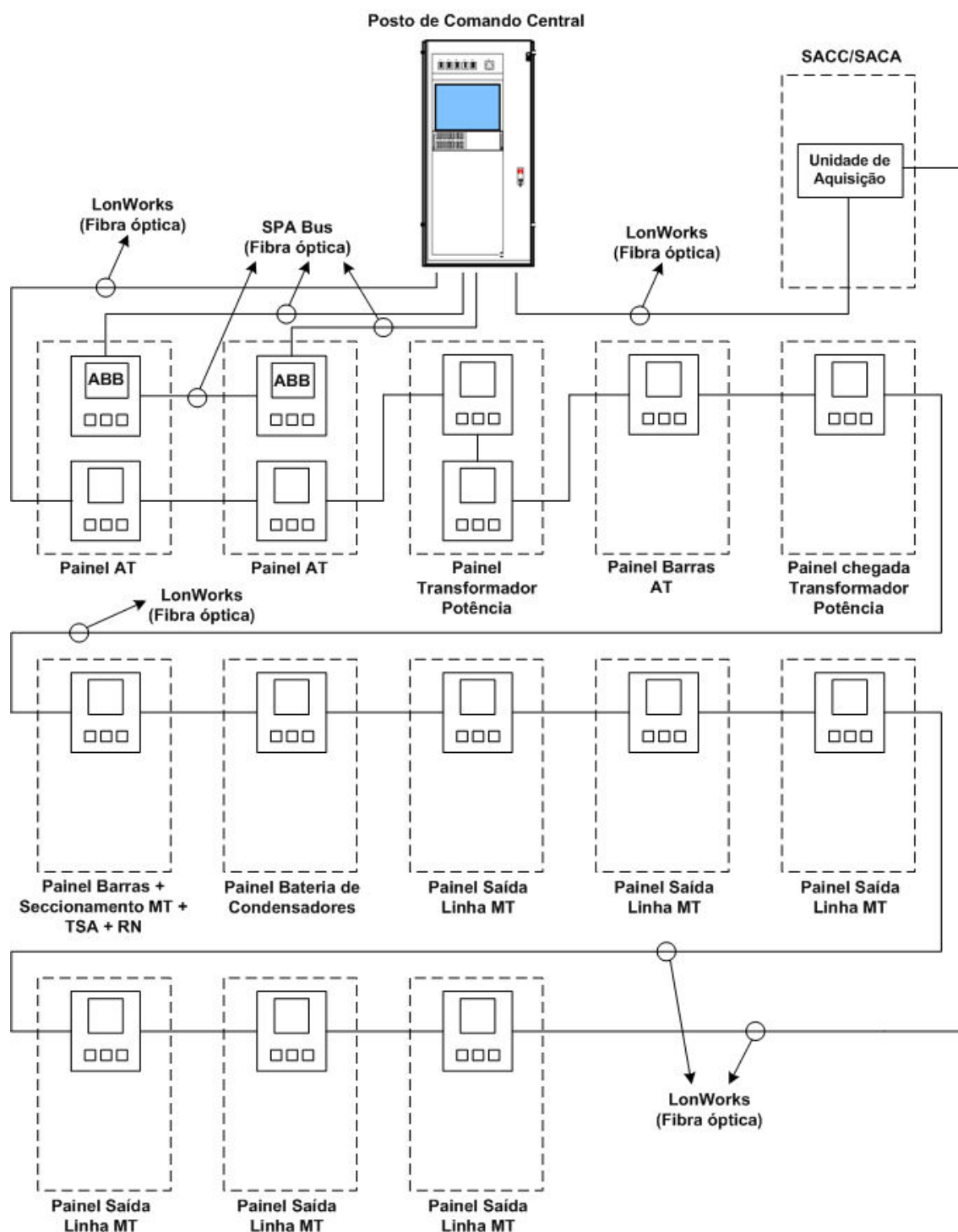


Figura 4.17 - Arquitectura para o sistema de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) utilizada pela Efacec até 2005.

A arquitectura apresentada na Figura 4.17 está organizada segundo uma topologia em anel. Os IEDs existentes nos diversos painéis comunicam entre si utilizando o protocolo de comunicação LonWorks, com excepção dos IEDs da ABB, instalados em cada um dos painéis de linha AT, que utilizam o protocolo SPA Bus. As ligações físicas que interligam os equipamentos apresentados nesta arquitectura eram em fibra óptica, tanto para o LonWorks como para o SPA Bus.

Sempre que se utilizava um equipamento de outro fabricante, neste caso os IEDs para protecção distância da ABB, era necessário instalar uma rede de comunicação independente uma vez que a ABB usava o protocolo SPA Bus, enquanto que a Efacec utilizava o LonWorks. Assim o Posto de Comando Central do edifício de comando tinha de suportar vários protocolos de comunicação para que fosse garantida a comunicação com todos os IEDs. Como não existia normalização para os protocolos a utilizar na rede de comunicação de dados da subestação cada fabricante utilizava o seu próprio protocolo.

O SPA Bus foi originalmente desenvolvido para funcionar como uma rede de campo para sistemas de protecção distribuída, controlo e registos de eventos. A rede de comunicação era constituída por vários equipamentos (escravos), como IEDs e unidades de controlo que estavam ligados a uma unidade principal (mestre) - Figura 4.18. A arquitectura física tipicamente usada em sistemas de protecção e controlo de subestações, para este protocolo de comunicação, apresenta uma topologia em anel ou barramento em fibra óptica. O SPA Bus utiliza um protocolo de comunicação série assíncrono com uma taxa de transferência de 9600 bits por segundo.

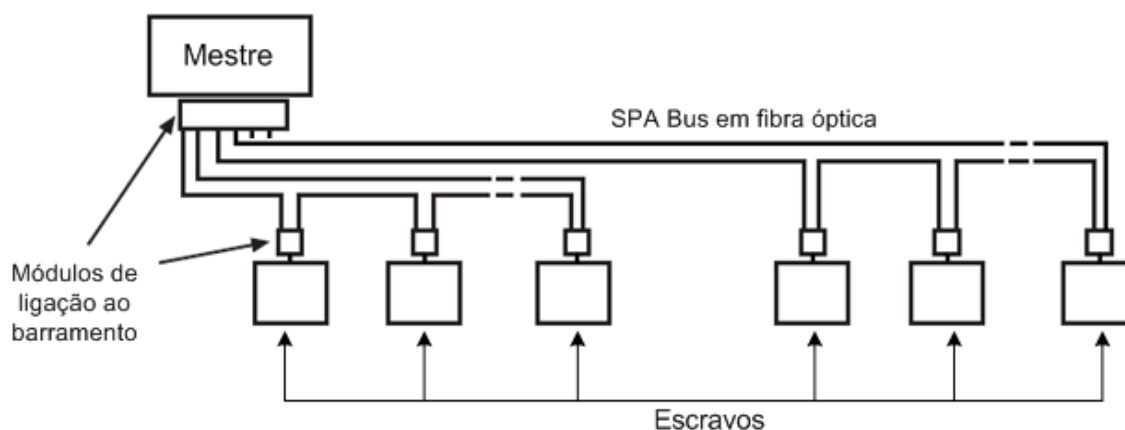


Figura 4.18 - - Arquitectura Mestre-Escravo com topologia em anel utilizando o protocolo SPA Bus [31].

A rede Lonworks não foi especialmente concebida para sistemas de energia, tendo uma forte implantação nos sectores terciário, industrial e sobretudo militar. Foi desenvolvida pela Echelon Corp e baseia-se no chamado Neuron chip, fabricado pela própria Echelon e ainda pela Toshiba, Motorola e Cypress Semiconductor. Destina-se especialmente a processos de automação, não tendo sido concebida para funções mais genéricas como redes empresariais de computadores [12].

Uma das principais vantagens do LonWorks é o facto deste protocolo permitir que cada equipamento mande e receba informação de outro equipamento sem que haja necessidade de ter conhecimento da topologia da rede de comunicação e dos nomes, endereços e funções dos outros equipamentos [32].

Numa rede LonWorks a unidade de controlo mais básica é designada por nó ou equipamento LonWorks. Este nó é constituído por uma unidade com sensores e dispositivos de controlo, um Neuron Chip, um transceptor e uma fonte de alimentação - Figura 4.19.

O protocolo LonWorks cobre as sete camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI). Diversos meios físicos de transmissão são suportados incluindo a fibra óptica. A topologia de ligação física dos equipamentos pode ser em anel, estrela, barramento ou mista,

isto é, uma combinação das três primeiras topologias - Figura 4.20. No que concerne à velocidade máxima permitida pelo LonTalk, esta é 1,25 Megabits por segundo.

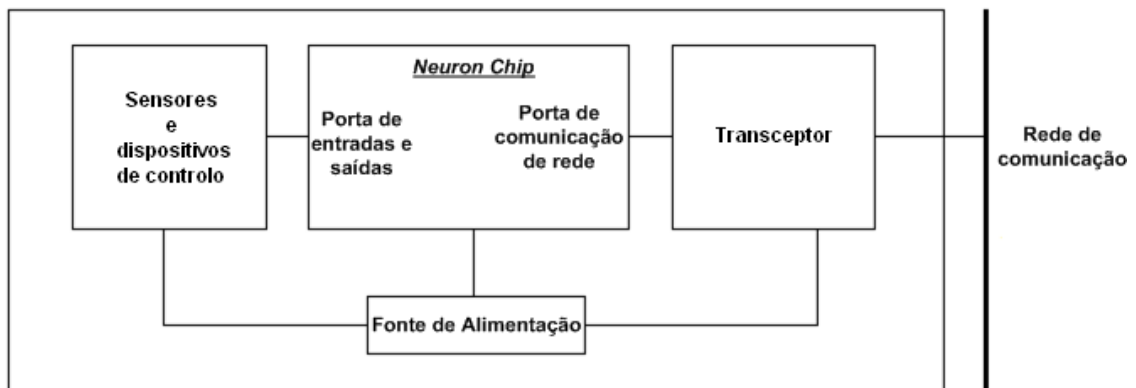


Figura 4.19 - Diagrama de blocos de um nó típico de uma rede LonWorks [32].

O Neuron Chip é um dispositivo semicondutor especialmente desenvolvido para dotar os sensores e equipamentos de controlo de inteligência artificial e capacidade de funcionarem numa rede de comunicação. Os transceptores providenciam uma interface de comunicação entre o dispositivo LonWorks e a rede Lonworks. O principal objectivo dos transceptores é simplificar o desenvolvimento de equipamentos baseados no protocolo LonWorks capazes de interoperar entre si. Por último, refira-se que os transceptores utilizados nos Neuron Chips suportam vários meios de comunicação, bem como topologias de ligação, reunindo as funções de transmissor e receptor num único equipamento [32].

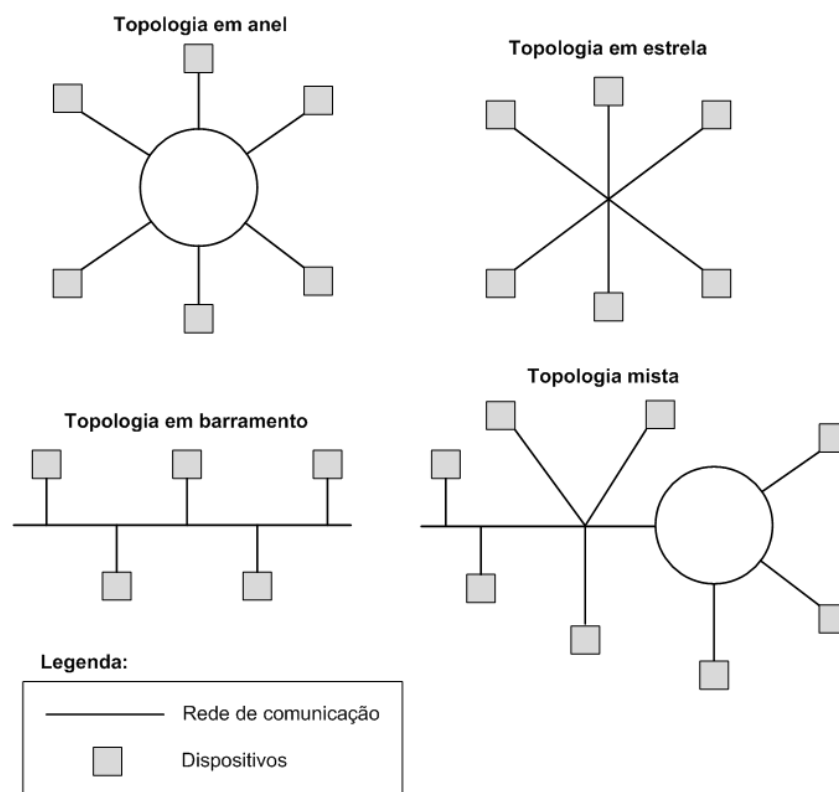


Figura 4.20 - Topologias possíveis para uma rede LonWorks [33].

4.2.2. Arquitectura do sistema de comunicação da ABB utilizando o protocolo LonWorks

Para o estudo da solução proposta pela ABB para as redes de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações considerar-se-á uma simplificação do esquema geral unifilar de uma subestação de distribuição tipo, apresentado em [30]. O esquema unifilar simplificado considerado é constituído por dois painéis de linha de chegada de Alta Tensão (AT), um painel de seccionador de barras AT, dois painéis de transformador de potência, um painel de barras de Média Tensão (MT), dois painéis de chegada de Média Tensão, dois painéis do transformador de serviços auxiliares (TSA) e regime de neutro (RN), dois painéis de bateria de condensadores e nove painéis de linhas de saída MT. Na Figura 4.21 apresenta-se a arquitectura física da rede de comunicação de dados do Sistema de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) utilizada pela ABB até ao ano de 2006, com base no esquema unifilar simplificado descrito.

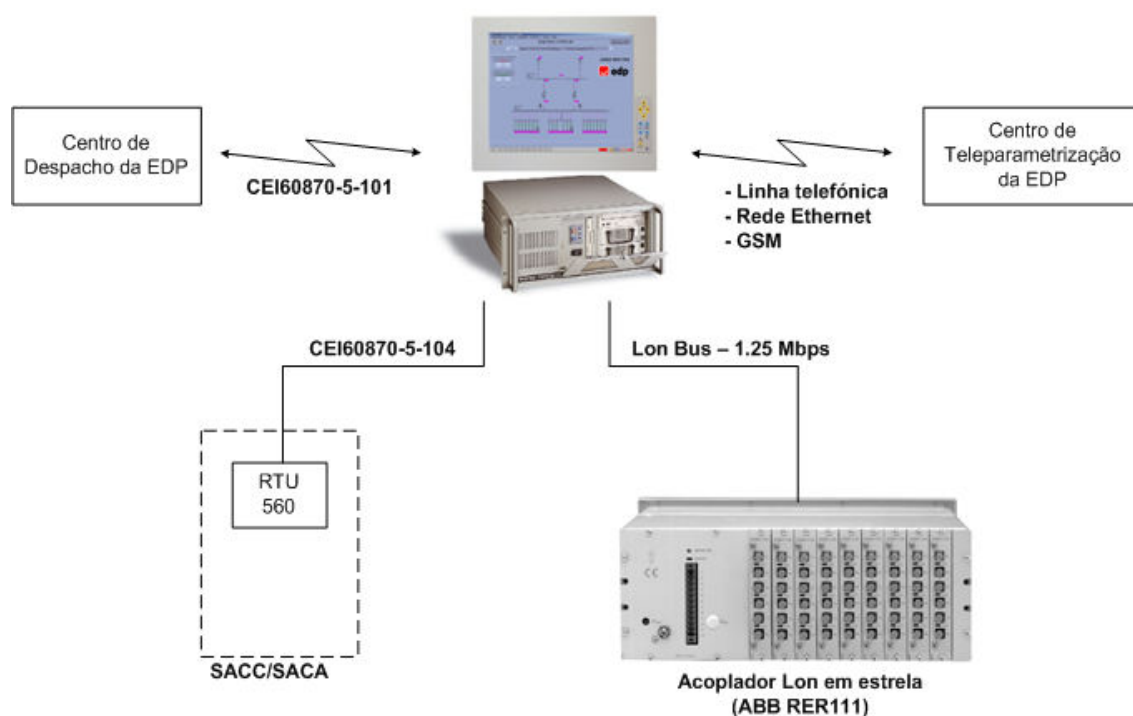


Figura 4.21 - Arquitectura para o sistema de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) utilizada pela ABB até 2006.

Esta arquitectura adoptada pela ABB era constituída por uma rede de dados principal com uma topologia em estrela. Esta rede assegurava a ligação dos vários Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) ao computador central do edifício de comando utilizando o protocolo LonWorks. Por sua vez a ligação à Unidade Terminal Remota (RTU 560), instalada no armário dos Serviços Auxiliares de Corrente Contínua (SACC) e Serviços Auxiliares de Corrente Alternada (SACA), é feita também com suporte físico em fibra óptica. Contudo, a nível do protocolo de comunicação utilizado para comunicação entre o Posto de Comando Central e a RTU560, este está definido em CEI60870-5-101.

A ligação das unidades de painel é feita com um acoplador em estrela, o RER111 da ABB. Este acoplador assegura a ligação em estrela dos vários IEDs do edifício de comando, tal como é apresentado na Figura 4.22. O RER111 da ABB é um equipamento modular que permite utilizar vários módulos de comunicação de dados. Contudo, está limitado a nove módulos. No caso da arquitectura apresentada na Figura 4.22 foram utilizadas os nove módulos, sendo que cada um permitia a ligação, através de fibra óptica, de três IEDs. Desta forma, era possível ligar-se um total de vinte e sete IEDs ao RER111.

A ligação com o Centro de Despacho da EDP está definida em CEI60870-5-101. Por outro lado, a ligação com o Centro de Teleparametrização da EDP pode ser feita através da linha telefónica, de uma rede Ethernet ou de GSM (*Global System for Mobile Communications*).

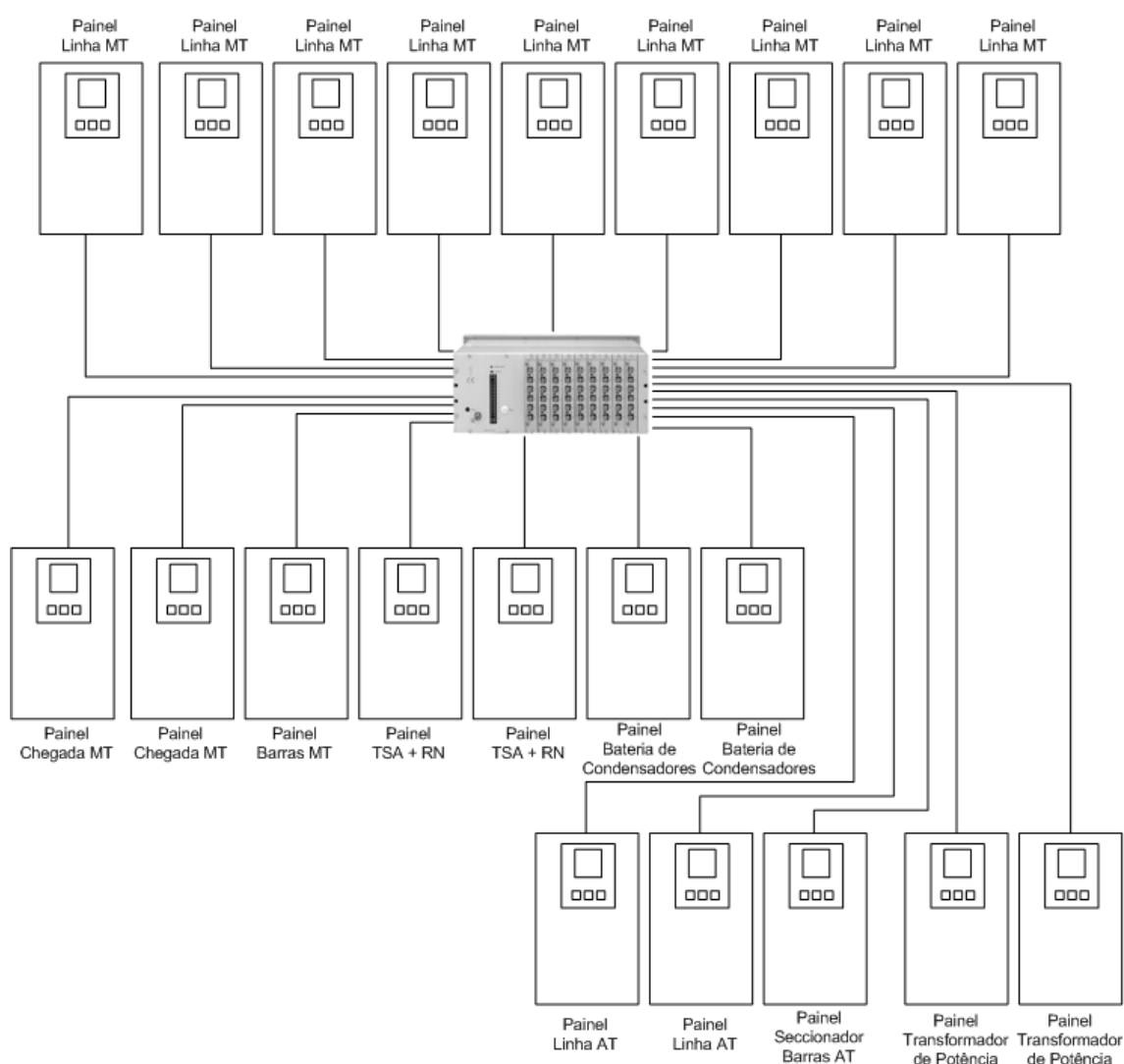


Figura 4.22 - Arquitectura física de ligação das unidades de painel ao acoplador RER111 da ABB, no edifício de comando da subestação de Tondela.

4.2.3. Arquitectura do sistema de comunicação utilizando o protocolo Ethernet

Para o estudo da arquitectura actual das redes de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações considerar-se-á uma simplificação do esquema geral unifilar de uma subestação de distribuição tipo, apresentado em [30]. O esquema unifilar simplificado considerado é constituído por dois painéis de linha de chegada de Alta Tensão (AT), um painel de potencial (tensão) de barras e interbarras AT, dois painéis de transformador de potência, dois painéis de chegada do transformador de potência, um painel de interbarras de Média Tensão (MT) dois painéis do transformador de serviços auxiliares, regime de neutro e potencial de barras MT, dois painéis de bateria de condensadores e sete linhas de saída MT. Refira-se que esta arquitectura corresponde a uma arquitectura tipo das redes de comunicação actuais implementadas nos SPCC das subestações de distribuição, independentemente dos fabricantes dos equipamentos. O protocolo de comunicação utilizado na rede de comunicação do edifício de comando é a Ethernet com suporte físico em fibra óptica e cabo de par entrelaçado (UTP). A topologia física da rede é em anel.

Esta arquitectura está implementada segundo a norma CEI61850. O lançamento desta norma motivou uma reformulação na forma como eram implementados os sistemas de comunicação nos SPCC das subestações. O primeiro objectivo passava por normalizar o protocolo de comunicação da rede de comunicação dentro do edifício de comando. Também os fabricantes de IEDs começaram a desenvolvê-los com base na norma CEI61850.

Na arquitectura da rede de comunicação apresentada na Figura 4.24 e Figura 4.25 pode-se verificar que dentro de cada Armário de Comando e Controlo (ACC) está instalado um *switch* que recebe as ligações provenientes dos Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) existentes nesse mesmo armário. Posteriormente, esse *switch* é ligado ao *switch* do ACC adjacente. Relativamente aos Quadros Metálicos de Média Tensão (QMMT), nestes quadros os *switches* são colocados unicamente no ARCBT (Armário de Reagrupamento de Cabos de Média Tensão). Cada IED existente nos compartimentos de Baixa Tensão (BT) das celas do QMMT são ligados aos *switches* instalados no ARCBT. Ao contrário do que acontece nos ACC, nas várias celas do QMMT não é colocado nenhum *switch*. Na Figura 4.23 apresenta-se o exemplo de um *switch*, desenvolvido de acordo com a norma CEI61850, que poderia ser utilizado nos armários do edifício de comando.

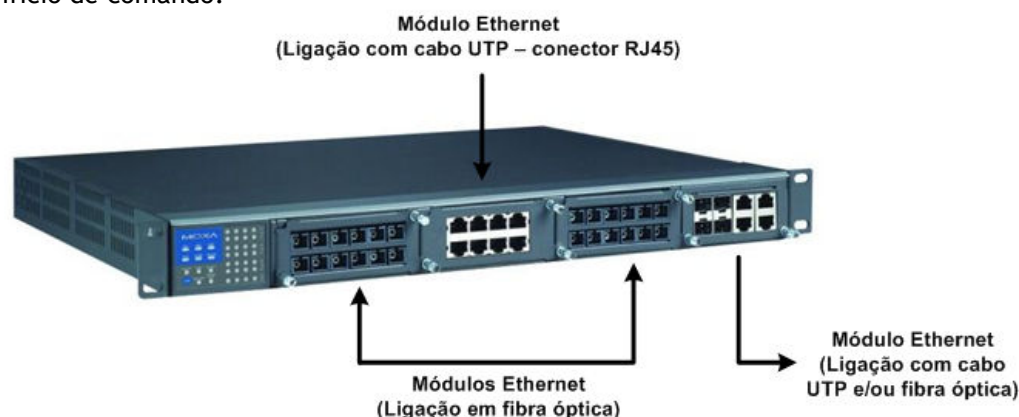


Figura 4.23 - Exemplo de um *switch* (fabricado pela MOXA) utilizado para ligar as várias unidades de painel existentes nos armários do edifício de comando [34].

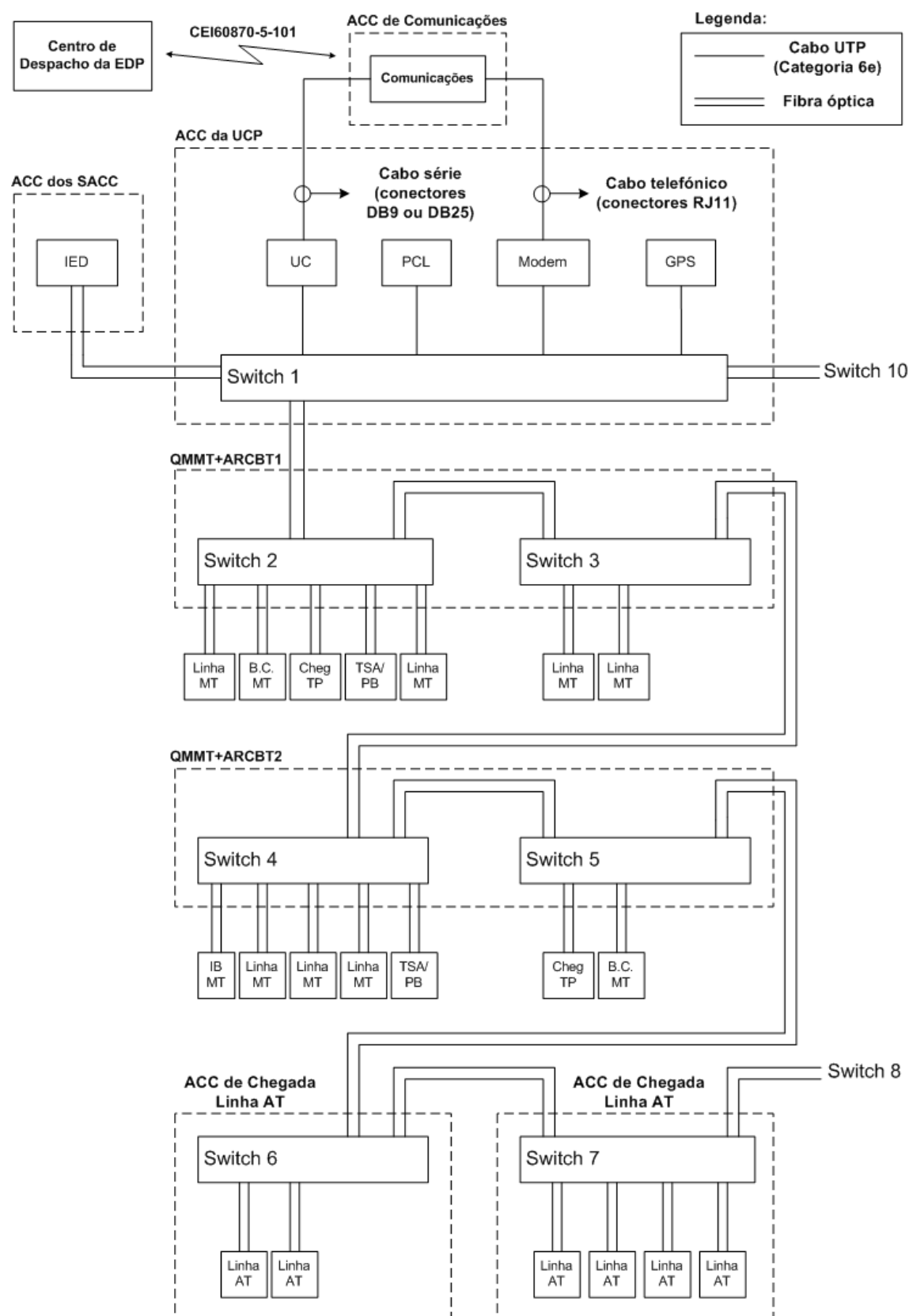


Figura 4.24 - Arquitectura física da rede de comunicação actual utilizada nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) do edifício de comando das subestações de distribuição.

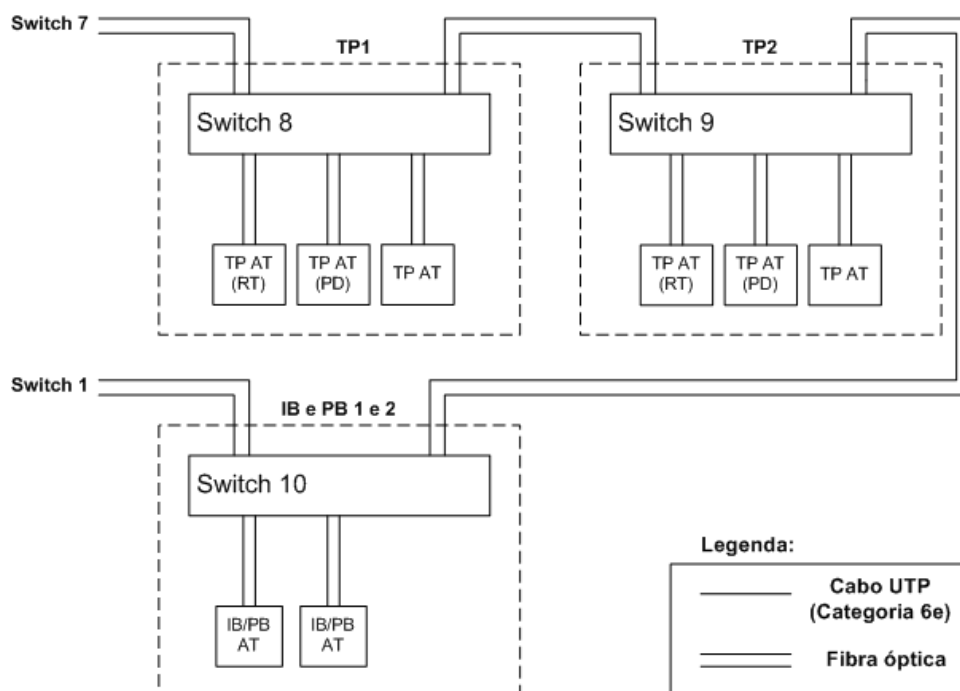


Figura 4.25 - Arquitectura física da rede de comunicação actual utilizada nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) do edifício de comando das subestações de distribuição.

Na Figura 4.24 e Figura 4.25 apresenta-se a arquitectura actual da rede de comunicação dos SPCC das subestações. Ao *switch* 1 estão ligados a Unidade Central (UC), o Posto de Comando Local (PCL), o modem, a unidade do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e ainda o Dispositivo Electrónico Inteligente (IED) do Armário de Comando e Controlo (ACC) dos Serviços Auxiliares de Corrente Contínua (SACC). Em cada Armário de Reagrupamento de Cabos de Baixa Tensão (ARCBT) do Quadro Metálico de Média Tensão (QMMT) são instalados dois *switches*. Aos *switches* 2 e 3 estão ligados os IEDs de linha de saída de MT (Linha MT), bateria de condensadores (B.C. MT), transformador de serviços auxiliares e potencial (de tensão) de barras MT (TSA/PB) e chegada do transformador de potência (Cheg. TP). Ao *switch* 4 para além de outros IEDs também é ligado o de interbarras MT (IB MT). Aos *switches* 6 e 7 são ligados os IEDs das linhas de chegada de Alta Tensão (Linha AT). Os *switches* 8 e 9 recebem as ligações provenientes dos IEDs do transformador de potência (TP AT), sendo que estes dois *switches* estão instalados nos ACCs do transformador de potência 1 (TP1) e transformador de potência 2 (TP2), respectivamente. Por último, o *switch* 10 recebe as ligações provenientes dos IEDs de interbarras e potencial (de tensão) de barras AT (IB/PB AT).

A comunicação da subestação com o centro de despacho está definida na norma CEI60870-5-101. Contudo, a tendência actual é utilizar protocolos de comunicação normalizados para comunicar com o centro de despacho. A definição de como deverá ser feita essa comunicação, tendo como base protocolos normalizados, está definida em CEI60870-5-104. O protocolo de preferencial para garantir esta comunicação é o TCP/IP.

A ligação entre a UC e o ACC de Comunicações é feita por intermédio de um cabo série, utilizando conectores DB9 ou DB25 nos seus terminais. Por seu turno, a ligação entre o Modem e o ACC de Comunicações utiliza um cabo telefónico convencional, com conectores RJ11 nos seus terminais.

A rede de comunicação entre os vários armários apresenta uma topologia em anel. O meio físico que suporta esta rede é fibra óptica monomodo². São utilizados dois canais independentes para as ligações a cada dispositivo. Um para transmitir e outro para receber os dados, explicando-se, assim, a representação das ligações em fibra óptica da Figura 4.23 com duas linhas. Contudo, estas ligações são realizadas em patchcord, isto é, embora existam dois canais independentes estão ambos dentro do mesmo cabo - Figura x.

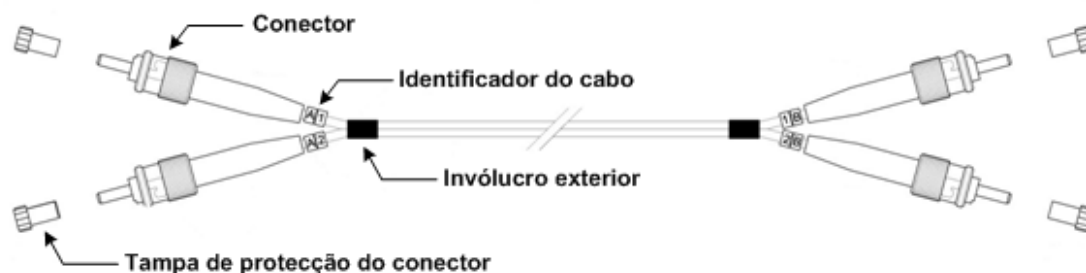


Figura 4.26 - Esquematisação de um cabo de fibra óptica monomodo utilizado na rede de comunicação.

A topologia de ligação dos IEDs aos respectivos *switches* é em estrela. Neste caso são utilizadas ligações independentes entre estes equipamentos, ao contrário do que acontece com a ligação entre *switches* que segue uma topologia em anel. A ligação entre o *switch* do ACC da UCP e a UC, PCL, Modem e GPS é feita com cabo de par entrelaçado (UTP) categoria 6e. O cabo é constituído por um par de fios eléctricos entrelaçados e não blindados.



Figura 4.27 - Pares entrelaçados de um cabo UTP categoria 3 (a) e categoria 5 (b) [11].

Os cabos UTP podem ser de sete categorias. Quanto maior é a categoria do cabo UTP, mais entrelaçado por centímetro está - Figura 4.27. O resultado é que utilizando cabos de categorias superiores consegue-se reduzir as interferências nos pares de fios condutores e ter uma melhor qualidade de sinal ao longo do cabo. Consequentemente, garante-se uma velocidade de comunicação superior àquelas que se conseguiam com cabos UTP de categorias mais baixas. As categorias seis e sete permitem a transmissão de sinais com uma largura de banda de 250 MHz e 600 MHz, respectivamente. Com cabos UTP categoria 3 e 5 apenas se conseguiam larguras de banda de 16 MHz e 100MHz [11].

Entre as vantagens de utilização do cabo UTP destacam-se o facto deste ser um cabo telefónico convencional, ser muito barato e fácil de instalar. Contudo, o cabo UTP pode ter problemas com interferências electromagnéticas devido ao facto de não ter blindagem.

² As fibras ópticas podem ser basicamente de dois modos: monomodo e multimodo. Em monomodo apenas um feixe de luz é transmitido no núcleo da fibra óptica. Por sua vez, em multimodo vários feixes de luz são transmitidos simultaneamente ao longo do núcleo da fibra óptica. Em monomodo é possível transmitir dados a distâncias cerca de cinquenta vezes superiores às que se conseguem em multimodo. Assim, o monomodo adequa-se a casos em que uma reduzida perda de sinal, elevada taxa de transmissão de dados e elevadas distâncias sejam requisitos.

Embora a fibra óptica seja consideravelmente mais cara que o cabo UTP, esta é o meio de transmissão utilizado em grande parte da rede de comunicação. Um dos principais factores que sustenta esta opção é a imunidade que a fibra óptica apresenta face ao ruído electromagnético. Mesmo nas ligações realizadas dentro do mesmo armário, entre *switches* e IEDs, é utilizada fibra óptica.

4.3. Sumário

Os Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) possuem um leque alargado de funcionalidades que visam garantir a monitorização, comando e controlo de uma subestação, local ou remotamente. A rede de comunicação de dados surge, então, como um elemento fundamental que garante o funcionamento de todos os serviços e aplicações definidos para a subestação. Através de uma Rede de Área Local (LAN), os IEDs comunicam entre si e também com o Posto de Comando Local.

As primeiras redes de comunicação utilizadas nos SPCC das subestações de distribuição tinham como principais características o facto de não apresentarem topologias de ligação física dos equipamentos normalizadas, o que também se verificava no caso dos protocolos de comunicação. Até à criação e aplicação da norma CEI61850 nas subestações, as arquitecturas das redes de comunicação variavam de fabricante para fabricante, como se comprovou pela análise das arquitecturas utilizadas pela Efaced e a ABB até ao ano de 2005 e 2006, respectivamente. Consequentemente, sempre que se pretendia fazer algum melhoramento ou expansão ao sistema, o leque de soluções estava bastante limitado, sendo que, normalmente, a escolha recaía sobre equipamentos do mesmo fabricante daqueles que já se encontravam instalados. Nos casos em que se optava por utilizar equipamentos de outros fabricantes surgiam custos acrescidos. Estes custos eram relativos à utilização de outra rede de comunicação para além da existente ou aquisição de hardware para conversão de protocolos de comunicação para assegurar a compatibilidade entre todos os equipamentos da rede. Tome-se como exemplo a arquitectura da rede de comunicação da Efaced utilizando o protocolo LonWorks. Neste caso, a necessidade de instalação de relés numéricos da ABB para a protecção distância levou à necessidade de instalação de uma rede de comunicação independente. Embora o meio físico de transmissão dos dados também fosse fibra óptica, o protocolo de comunicação era o SPA Bus.

Com a aplicação da norma CEI61850 nas subestações registou-se uma mudança na forma como as redes de comunicação dos SPCC das subestações de distribuição passaram a ser concebidas. O principal objectivo passava por garantir a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos, sem necessidade de instalar redes de comunicação independentes e/ou hardware para conversão de protocolos de comunicação. Desta forma, as arquitecturas das redes de comunicação instaladas nos edifícios de comando das subestações tornaram-se normalizadas. A filosofia dos sistemas actuais é que sempre que se pretenda introduzir ou alterar equipamentos a sua instalação seja simples com a garantia que é assegurada a compatibilidade entre todos os equipamentos da rede de comunicação.

Capítulo 5

Protocolos e especificação do sistema de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição

Neste capítulo será feita uma introdução a conceitos relacionados com os protocolos de comunicação, arquitectura lógica, fiabilidade e segurança do sistema de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição. Começar-se-á por apresentar o modelo de organização de um sistema de comunicação em camadas protocolares. Posteriormente, será feita uma descrição dos protocolos Ethernet e TCP/IP, fazendo-se o seu enquadramento no modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI). Por último, serão abordados aspectos relativos à arquitectura lógica, fiabilidade e segurança da rede de comunicação.

5.1. Redes de comunicação

A rede de comunicação das subestações de distribuição que suporta os Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) é classificada como uma Rede de Área Local (LAN). Por outro lado, a rede de comunicação que garante a ligação entre a subestação de distribuição e o centro de controlo remoto é classificada como uma Rede de Longa Distância (*Wide Area Network* - WAN).

Uma rede de comunicação está organizada numa série de camadas que desempenham funções específicas. Estas funções são executadas de acordo com um conjunto de regras que estão definidas para cada camada. Este conjunto de regras é designado protocolo. Para qualquer uma das camadas utilizadas é necessário que todos os equipamentos existentes na rede de comunicação utilizem o mesmo protocolo. Esta normalização a nível dos protocolos utilizados em cada camada permite que cada dispositivo comunique com a respectiva camada doutro dispositivo instalado na mesma rede [35].

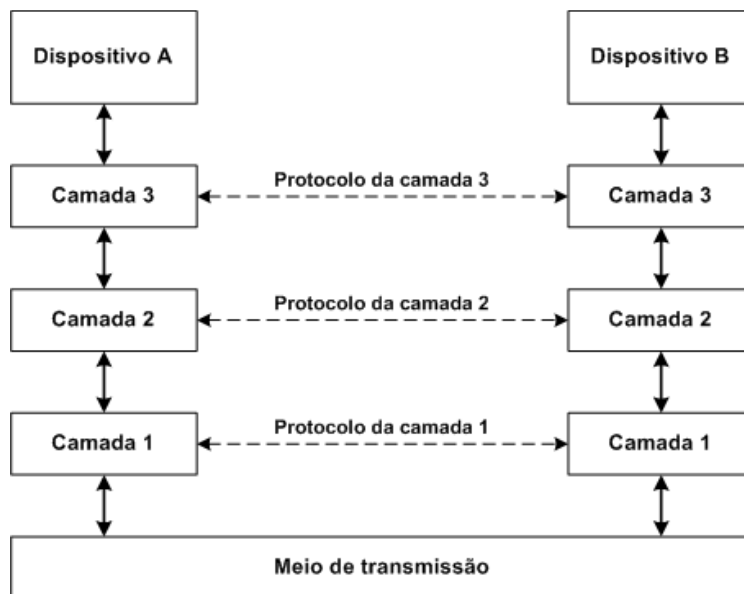


Figura 5.1 - Exemplo de uma divisão hierárquica dos protocolos de uma rede de comunicação organizada em camadas [35].

A hierarquia protocolar, apresentada na Figura 5.1, é utilizada de forma a que cada camada isole a camada imediatamente acima de si do resto da pilha protocolar. Por exemplo, quando a camada 3 envia dados para a camada 2 não tem conhecimento nem está envolvida com os protocolos e técnicas utilizadas na camada 2 ou na camada 1. A camada 3 está sim preocupada em comunicar directamente com a camada 3 de outro dispositivo. A forma como é feita a comunicação entre estas mesmas camadas está definida nas camadas inferiores, neste caso as camadas 1 e 2. A vantagem é que os protocolos utilizados nas camadas de mais baixo nível podem ser substituídos sempre que surjam novas tecnologias sem afectar as camadas superiores. Contudo, é condição obrigatória que a interface entre as camadas se mantenha a mesma. Por exemplo, o protocolo utilizado na camada 2 pode ser substituído por outro mais eficaz sem afectar os protocolos utilizados nas camadas 1 e 3 [35]. Os protocolos utilizados nas diferentes camadas estão organizados numa pilha protocolar. Na Figura 5.2 apresenta-se um exemplo de uma pilha protocolar tipicamente utilizada em sistemas de comunicação.

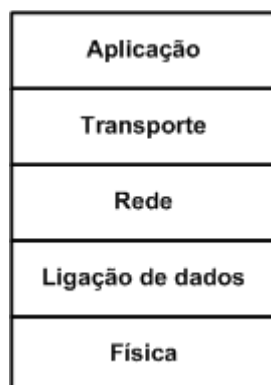


Figura 5.2 - Exemplo de uma pilha protocolar típica num sistema de comunicação [35].

5.1.1. Camada Física

A camada Física é a camada mais baixa da pilha protocolar do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI), assegurando a interface directa com o meio de transmissão ou canal de comunicação. O canal é o meio físico no qual a informação é transmitida através da manipulação de algumas grandezas físicas como é o caso da tensão eléctrica. Os canais numa rede de comunicação ser suportados por cabo telefónico, cabo coaxial, e fibra óptica. Contudo, também podem ser utilizados meios de transmissão não guiados, isto é, sem recurso a cablagem. Neste caso, o meio de transmissão é geralmente a atmosfera terrestre [35].

A camada Física deverá considerar as diversas não idealidades do canal de comunicação. Entre as não idealidades destacam-se o ruído térmico, reflexões de sinal, interferências de outros sistemas de comunicação e imperfeições nos componentes dos equipamentos transmissores e receptores. Neste sentido utilizam-se técnicas como a estabilização do canal, filtragem, sincronização de tempo e frequência e codificação para controlo de erros para tentar eliminar os efeitos provocados pelas não idealidades do canal. O objectivo principal da camada Física passa por receber os bits de dados provenientes da camada de Ligação de dados, enviando-os, sem erros, para o canal de transmissão [35].

5.1.2. Camada de Ligação de dados

A camada de Ligação de dados fornece à camada de Rede uma ligação de comunicação sem erros. Os dados na camada de Ligação de dados são divididos em tramas, sendo que esta camada tem a responsabilidade de determinar se a trama chegou intacta e sem erros ao dispositivo receptor. Para atingir esse objectivo é utilizado um mecanismo de reconhecimento da trama. O algoritmo de funcionamento deste mecanismo é o seguinte: O dispositivo receptor envia a trama de volta para o dispositivo transmissor para informá-lo do estado da trama de dados recebida. Se ocorrer algum erro durante a transmissão, o transmissor pode reenviar a trama para o dispositivo receptor [35].

A camada de Ligação de dados também assegura a função de regulação da taxa de transmissão de dados. Os dispositivos transmissores e receptores processam os dados, frequentemente, com taxas de velocidade diferentes. Este não balanceamento entre dispositivos pode levar a ocorrência de condições de *overflow* (o transmissor envia dados a uma velocidade superior àquela que o receptor consegue processar) ou *underflow* (o receptor processa os dados a uma velocidade superior àquela a que o transmissor os envia) no dispositivo receptor. Numa rede de difusão de dados em que todos os equipamentos partilham o mesmo meio de transmissão podem ocorrer problemas de colisão de dados. Neste tipo de sistemas só um dispositivo pode transmitir em cada instante de tempo, sendo que se vários dispositivos tentarem transmitir simultaneamente, todos os dados são perdidos ou corrompidos. Desta forma, é necessário ter um mecanismo que controle o acesso ao meio. Esta tarefa é da subcamada MAC (*Medium Access Control*) da camada de Ligação de dados [35].

5.1.3. Camada de Rede

A camada de Rede é responsável por assegurar que os pacotes de dados são devidamente encaminhados do transmissor para o receptor. Este encaminhamento é trivial se todos os nós da rede conseguirem ver todos os pacotes de dados. Porém, o problema do encaminhamento torna-se muito mais complexo numa rede ponto a ponto, em que um pacote de dados pode ter de atravessar vários nós da rede até chegar ao dispositivo de destino. O problema de encaminhamento pode-se tornar ainda mais complicado perante a presença de congestionamento. Quando um nó da rede está a enviar muitos pacotes de dados ao mesmo tempo causa um atraso (*bottleneck*) na rede, uma vez que se começa a formar uma fila de espera devida ao facto do nó em causa não ter capacidade de transmitir os dados instantaneamente [35].

O protocolo utilizado na camada de Rede deve assegurar o encaminhamento dos pacotes de dados, ao mesmo tempo que lida com o problema de congestionamento. Embora o caminho entre dois nós possa ser optimizado em termos de distância, pode ser ineficiente utilizar o caminho mais curto caso este contenha um ou mais nós congestionados. Assim, o protocolo deverá escolher um caminho alternativo que, embora abranja uma maior distância física, é mais rápido devido ao congestionamento existente no caminho mais curto [35].

5.1.4. Camada de Transporte

A camada de Transporte é responsável pela criação ou corte da ligação entre dois dispositivos da rede. O tipo de conexão utilizado depende da Qualidade de Serviço (QoS) requerida. Uma aplicação que envolva a transferência de ficheiros entre duas máquinas requer um serviço sem erros. Esta aplicação deverá utilizar uma ligação orientada à conexão. Este tipo de ligação garante que os pacotes de dados chegam ao transmissor sem erros e pela ordem com que foram enviados. Contudo, este tipo de serviço introduz um atrasado provocado pelo *overhead*³ que providencia uma ligação livre de erros. Este *overhead* deve-se ao facto de algum dos dados de saída serem utilizados para reconhecimentos e retransmissões de tramas [35].

Uma aplicação que esteja a enviar dois canais de áudio está mais preocupada em ter baixa latência, podendo também tolerar a existência de alguns erros. Em sistemas áudio e vídeo, um atraso alongado é mais depressa detectado pelo utilizador comparativamente à existência de alguns erros. Para este tipo de aplicações, deverá ser utilizado uma ligação não orientada à conexão. Uma ligação não orientada à conexão é menos fiável que uma ligação orientada à conexão atendendo ao facto de não serem asseguradas garantias para prevenir a ocorrência de erros. Contudo, a latência é menor face às ligações orientadas à conexão devido à diminuição do *overhead* [35].

³ Num sistema de comunicação, o *overhead* é a informação adicional transmitida e utilizada para o controlo e verificação de erros.

5.1.5. Camada de Aplicação

A camada de Aplicação está localizada no topo da pilha protocolar preocupando-se com os protocolos utilizados pelos diferentes softwares de aplicações. O protocolo mais comum utilizado na camada de Aplicação é o HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*). O HTTP é utilizado para fazer a conexão a servidores Web na Internet ou numa rede local (Intranet).

5.2. Ethernet

A rede de comunicação de dados dos SPCC das subestações de distribuição toma como base a as especificações da norma CEI61850 [29]. Esta norma especifica quais os protocolos a utilizar para assegurar a troca de informação entre todos os equipamentos da rede, nomeadamente entre os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs). A título de exemplo, a norma CEI61850 define que para a sincronização do tempo entre os IEDs é feita através de UDP/IP. Por sua vez, as mensagens MMS (*Manufacturing Message Specification*) utilizam o protocolo TCP/IP. As mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) e os Valores Amostrados (*Sampled Values*) são directamente mapeados para uma trama Ethernet. Os conceitos relativos à Ethernet, TCP (*Transmission Control Protocol*), UDP (*User Datagram Protocol*) e IP (*Internet Protocol*) serão abordados nas secções seguintes.

Nos últimos anos, a tecnologia Ethernet foi alvo de notáveis avanços. Durante a década de 90, utilizava-se um cabo partilhado como meio físico (10Base5 e 10Base2), sendo que a velocidade máxima era 10 Megabit por segundo (Mbps). Actualmente, a Ethernet é baseada numa rede de comunicação com *switches* capazes de comunicar a 100 ou 1000 Mbps. Refira-se que os *switches* de rede também se tornaram mais sofisticados, começando a suportar novas funcionalidades, entre as quais se destacam a atribuição de prioridades a pacotes de dados e redes virtuais (*Virtual Local Area Networks* - VLANs) [36].

A Ethernet, IEEE 802.3, é uma tecnologia standard utilizada em Redes de Área Locais (LANs). A Ethernet toma como base o modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) embora não utilize as suas sete camadas. De referir que esta tecnologia não é o único standard definido para LANs. O Token Bus (IEEE 802.4) e o Token Ring (IEEE 802.5) são outras tecnologias definidas na norma IEEE802. Contudo, a Ethernet foi a que teve maior proliferação pelo facto de ter sido a primeira a ser desenvolvida e das restantes serem suas variantes com algumas limitações, tais como o facto de serem proprietárias dos fabricantes (e.g. Token Ring da IBM) [11].

A Ethernet utiliza a camada física e a camada de ligação de dados do modelo OSI - Figura 5.3. A camada de ligação de dados está dividida em duas sub-camadas: a camada de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) e a de Controlo de Ligação Lógica (LLC) - Figura 5.3.

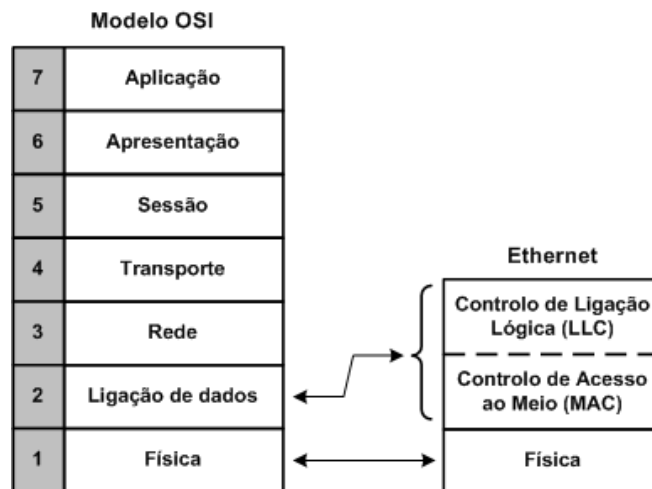


Figura 5.3 - Relação entre o modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) e a Ethernet [37].

5.2.1. Ethernet: Camada Física

A camada Física da Ethernet suporta vários meios de transmissão, entre os quais se destacam o cabo de par entrelaçado (Unshielded Twisted Pair - UTP) e a fibra óptica. O facto de a Ethernet suportar vários meios físicos de transmissão e diferentes velocidades, levou à criação de várias variantes, genericamente representadas como na Figura 5.4.

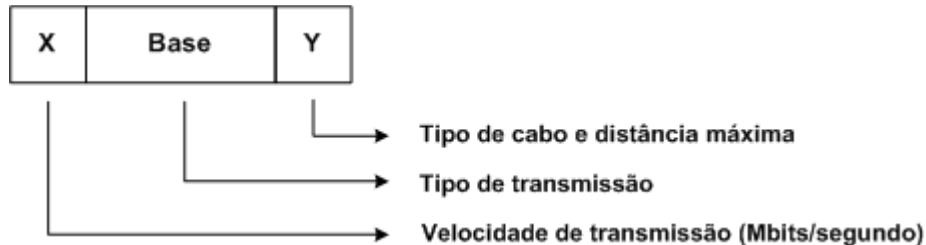


Figura 5.4 - Representação genérica da camada Física da Ethernet.

Segundo a representação genérica utilizada para caracterizar a camada Física da Ethernet - Figura 5.4 - são utilizados três campos. O primeiro (X) indica a velocidade de transmissão máxima do canal de comunicação, em Megabits por segundo. O segundo campo diz respeito ao tipo de transmissão, sendo que no caso desta ser digital (banda base) se utiliza a designação “Base”. Refira-se, contudo, que a transmissão também pode ser analógica (banda larga), caso em que utiliza a designação “Broad”. Por último, surge o campo relativo à designação do tipo de cabo e distância máxima admissível, sem que haja atenuação do sinal [11].

As primeiras variantes da Ethernet que surgiram foram a 10Base5 e a 10Base2. Ambas utilizavam cabo coaxial, sendo que a ligação aos equipamentos era feita através de derivações, com conectores específicos, do cabo principal. Todavia, estas soluções caíram em desuso, tendo dado lugar à 10Base-T e 10Base-F, que utilizam cabo de par entrelaçado e cabo de fibra óptica, respectivamente. A velocidade de transmissão é comum a estas quatro variantes, sendo o seu valor 10 Mbps [11].

Tabela 5.1 - Especificações técnicas de várias tecnologias Ethernet [11].

Nome	Cabo	Comprimento máximo (por segmento)	Equipamentos por segmento
10Base5	Coaxial	500 metros	100
10Base2	Coaxial	185 metros	30
10Base-T	Par entrelaçado	100 metros	1024
10Base-F	Fibra óptica	2000 metros	1024

Com a utilização da Ethernet 10Base-T deixou de haver partilha de cablagem para ligação de mais do que um equipamento, passando-se a utilizar ligações individuais para cada um dos equipamentos da rede de comunicação. A tecnologia 10Base-T utiliza um *hub* ao qual são ligados todos os equipamentos da rede. Uma das principais vantagens de o utilizar passa pelo facto de a introdução e/ou remoção de equipamentos da rede ser muito simples e não afectar a ligação dos restantes equipamentos. A detecção de potenciais problemas, como a ruptura dos cabos, também se torna mais eficaz [11].

Um *hub* ou concentrador é um dispositivo que opera a nível da camada física do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI), concentrando a ligação entre os diversos equipamentos instalados numa Rede de Área Local (LAN). Refira-se que apesar da topologia física ser em estrela, logicamente equipara-se a uma topologia em barramento. Sempre que um equipamento envia uma mensagem, todas os outros equipamentos ligados na mesma rede irão recebê-la. No caso de dois equipamentos transmitirem uma mensagem ao mesmo tempo, ocorrerá uma colisão na rede. O hub não tem capacidade para identificar os equipamentos que estão ligados em rede, sendo que desta forma não tem capacidade para encaminhar a mensagem transmitida do equipamento de origem apenas para o equipamento de destino. Com a utilização de um hub toda a capacidade do meio é partilhada por todos os equipamentos. Desta forma, quanto maior o número de equipamentos instalados na rede menor será a largura de banda disponível para cada um [37].

Um *switch* ou comutador é um equipamento que trabalha a nível da camada de ligação de dados do modelo OSI. No caso da rede de comunicação das subestações, os *switches* permitem que as tramas de dados enviadas por um Dispositivo Electrónico Inteligente (IED) sejam comutadas com base no endereço MAC (*Medium Access Control*) para o IED de destino. Os *switches* permitem a comutação simultânea de várias portas, sendo que para isso é necessário que possua um mecanismo de comutação suficientemente rápido de forma a permitir transmissões simultâneas em todas as suas portas. Os *switches* com esta capacidade designam-se *switches* sem bloqueio (*Non-Blocking Switches*). De referir que a largura de banda disponibilizada para uma porta do *switch* não é partilhada com as restantes portas, ao contrário do que acontecia com os *hubs* [38].

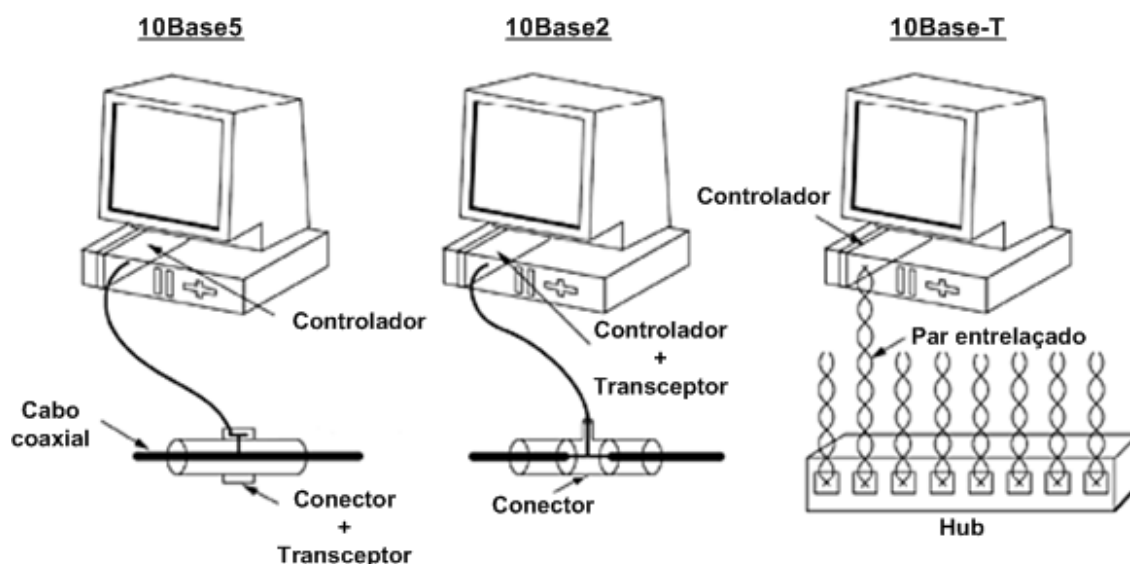


Figura 5.5 - Topologias de ligação das tecnologias Ethernet 10Base5, 10Base2 e 10Base-T [11].

Na Figura 5.5 apresentam-se as topologias de ligação física dos equipamentos à rede de comunicação utilizadas pelas versões 10Base5, 10Base2 e 10Base-T. Com a utilização de 10Base-T, a ligação a cada equipamento passou a ser individual. Pelo contrário, com 10Base5 e 10Base2 o canal de comunicação era partilhado e as ligações a cada equipamento eram efectuadas por intermédio de conectores próprios. Uma das principais desvantagens de utilização de um canal de comunicação comum a todos os equipamentos é que caso haja algum problema ou corte físico, a comunicação entre todos os equipamentos é colocada em risco.

A tecnologia 10Base-F utiliza a fibra óptica como meio físico de transmissão. A utilização de uma rede com cabo de fibra óptica, embora apresente custos mais elevados comparativamente a uma rede com cabo de par entrelaçado (UTP), apresenta como principais vantagens a elevada imunidade ao ruído electromagnético e permitir a ligação de equipamentos separados por longas distâncias, sem que haja perda da qualidade do sinal [11].

Como foi apresentado na Tabela 5.1, cada versão da Ethernet tem um máximo de comprimento de cabo por segmento. Para que se consiga ter redes com distâncias superiores é necessário utilizar repetidores. Um repetidor é um dispositivo físico que recebe, amplifica e retransmite os sinais enviados através do meio de transmissão. Uma série de segmentos de cabo ligados através de repetidores é semelhante à utilização de um único cabo, a menos do atraso introduzido pelos repetidores.

5.2.2. Ethernet: Camada de Ligação de dados

A camada de Ligação de dados está dividida em duas sub-camadas: a de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) e a de Controlo de Ligação Lógica (LLC). A sub-camada MAC assume especial importância pois é esta que contém os protocolos que controlam o acesso ao meio de transmissão e faz o encapsulamento dos dados em tramas.

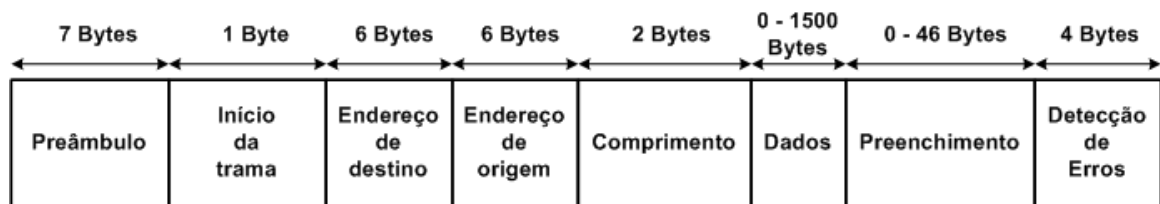


Figura 5.6 - Formato de uma trama Ethernet [11].

Uma trama Ethernet - Figura 5.6 - é composta por oito campos, sendo que cada um tem uma função específica. Cada trama começa com um Preâmbulo de sete Bytes. O Preâmbulo utiliza a sequência padrão de bits 10101010, que é utilizada para sincronizar os equipamentos receptores e transmissores. O “Início da trama” utiliza um Byte com a sequência de bits 10101011. Esta sequência indica o actual início da trama, permitindo que o equipamento receptor localize o primeiro bit do resto da trama. O “Endereço de destino” especifica o ou os receptores a que se destina a trama, utilizando seis Bytes. O receptor pode ser um único endereço físico, um grupo de endereços ou um endereço global. O “Endereço de origem” especifica qual a estação que envia a trama. Tal como acontece com o endereço de destino, também este utiliza seis Bytes. O “Comprimento” utiliza dois Bytes para indicar o número de Bytes de dados que serão enviados pelo transmissor. No campo “Dados” são colocados os dados que serão enviados pelo transmissor. O número de Bytes máximo para os dados é mil e quinhentos [11].

Uma trama Ethernet tem de ter um tamanho mínimo de sessenta e quatro Bytes. O campo “Preenchimento” é utilizado para garantir o tamanho mínimo da trama, sempre que o número total de Bytes relativos a todos os outros campos da trama não atinge os sessenta e quatro Bytes. O último campo da trama Ethernet utiliza quatro Bytes para o código de detecção de erros. O algoritmo de detecção de erros utilizado consiste no método de Verificação de Redundância Cíclica (CRC) [11].

A intercomunicação entre dispositivos torna-se mais difícil numa rede de difusão (*broadcast*). Neste tipo de redes os dispositivos partilham o mesmo meio de transmissão para comunicar. Assim, sempre que um dispositivo envia uma trama, todos os outros dispositivos existentes na rede podem saber que esta foi enviada. Durante o processo de fabrico cada equipamento recebe um endereço único, designado endereço MAC. Através deste endereço, disponível no cabeçalho da trama Ethernet, cada dispositivo sabe quais as tramas que lhe são destinadas [11].

A utilização de um protocolo para controlo de acesso ao meio de transmissão partilhado visa evitar a ocorrência de colisões. Uma colisão ocorre quando mais do que um dispositivo tenta transmitir simultaneamente, danificando as tramas que cada um tenta enviar. Quando ocorre uma colisão todas as tramas envolvidas têm de ser retransmitidas. O protocolo de controlo de acesso ao meio utilizado é o *Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect* (CSMA/CD) [11].

5.2.3. Ethernet Comutada (Switched Ethernet)

O número de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) que é possível instalar na subestação de forma a comunicarem através da Rede de Área Local (LAN) não é ilimitado.

Sempre que se introduz um novo IED na rede o tráfego de dados aumenta, pelo que é necessário garantir que o correcto funcionamento do Sistema de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) da subestação não é afectado. Uma solução passaria por aumentar a velocidade de transferência de dados para 100 Megabits por segundo ou 1 Gigabit por segundo, compensando desta forma o facto do fluxo de informação ser maior devido à instalação de um novo IED. Contudo, independentemente de se aumentar a velocidade de comunicação, existe outra solução que permite minimizar o impacto provocado pelo acréscimo do número de equipamentos na rede de comunicação. Esta solução é a utilização de uma tecnologia designada por Ethernet Comutada (*Switched Ethernet*).

A Ethernet Comutada tem como base a utilização de *switches*. Estes *switches* têm um bastidor que assegura uma comunicação a alta velocidade entre todas as suas portas. As portas dos switches podem ter conectores, divididos por várias cartas (ver Figura 5.7), para a ligação de cabo de par entrelaçado sem blindagem (UTP) ou fibra óptica [11]. Refira-se que o cabo UTP e o cabo de fibra óptica são os meios físicos para a transmissão de dados mais usados no sistema de comunicação da subestação.

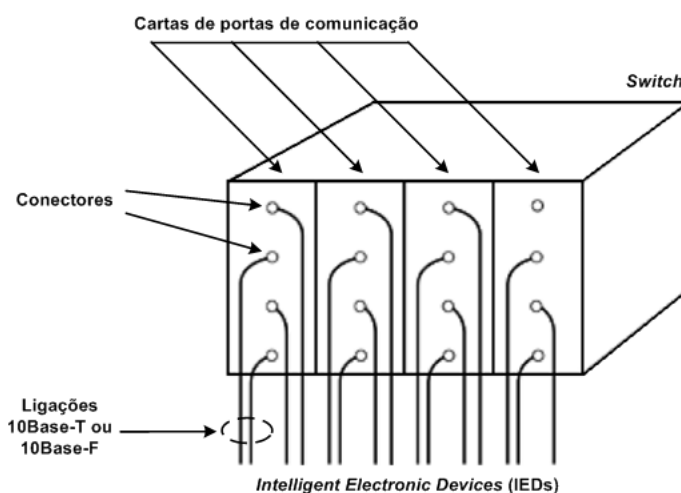


Figura 5.7 - Esquemática de um switch Ethernet com várias portas de comunicação [11].

Sempre que um IED pretende transmitir dados, envia uma trama Ethernet (ver Figura 5.6) normalizada para o *switch*. O *switch* verifica se a trama que recebeu se destina a alguma das portas pertencentes à mesma carta da porta de comunicação que recebeu a trama proveniente do IED. Se ambas as portas se encontram na mesma carta, a trama é copiada para a porta de destino que, por sua vez, está ligada ao IED a que se destina a informação. No caso do endereço de destino pertencer a um IED ligado a uma porta de outra carta do switch, a trama é enviada através de um bastidor de alta velocidade para a carta onde se encontra a porta de saída da informação. O bastidor garante a ligação entre todas as cartas de portas de comunicação do *switch* com uma velocidade de comunicação tipicamente na ordem dos Gigabits por segundo [11].

O interesse em utilizar Ethernet Comutada deve-se ao facto desta tecnologia garantir uma optimização geral da informação processada e trocada entre equipamentos por unidade de tempo, isolamento de tráfego de dados e redução do impacto das características não determinísticas do mecanismo de acesso ao meio - o CSMA/CD. A rede de comunicação dos SPCC tem de garantir os requisitos temporais impostos pelos tempos máximos de funcionamento das suas funções críticas, definidas em [39]. Para além destas características

relativas à utilização de Ethernet Comutada, existem outras três: a restrição dos domínios de colisão, criação de filas de espera e utilização de mensagens com prioridade.

A utilização de mensagens com prioridade será abordada mais na secção relativa às Redes Locais Virtuais (VLANs) atendendo a que ambas estão relacionadas. Numa rede de comunicação, um domínio de colisão diz respeito a uma área, com vários equipamentos interligados, onde os pacotes de dados podem colidir quando dois ou mais equipamentos tentam transmitir simultaneamente através da rede de comunicação. Com a utilização de switches, os domínios de colisão terminam em cada uma das suas portas [38]. Desta forma, o switch segmenta a rede de comunicação em vários domínios de colisão.

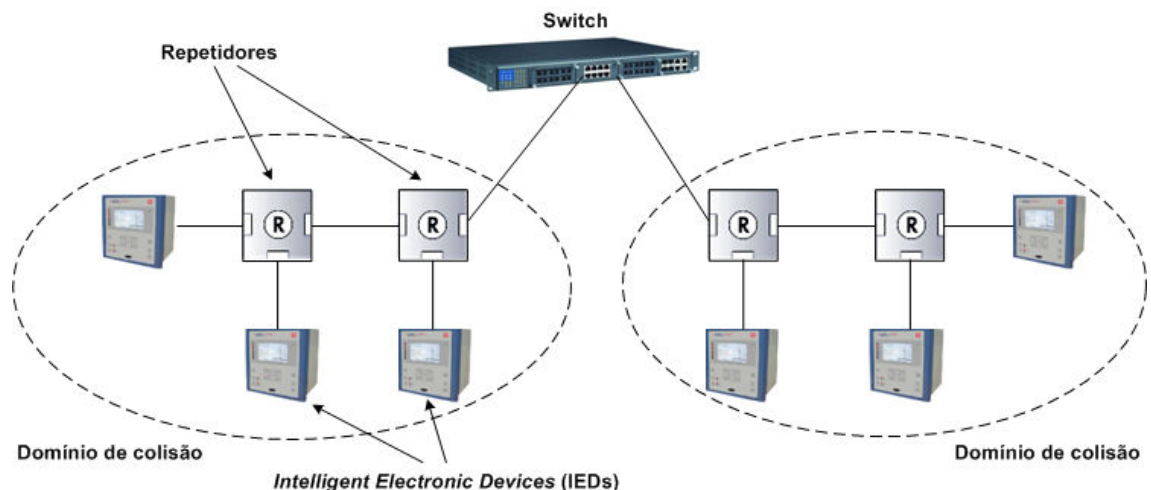


Figura 5.8 - Domínios de colisão numa rede de comunicação com um switch [38].

Na Figura 5.8 apresentam-se dois domínios de colisão separados devido à existência de um switch. De salientar que a utilização de repetidores não restringe os domínios de colisão. Um repetidor é um dispositivo que opera a nível da camada física do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI), amplificando e transmissão dos pacotes de dados que recebe para todas as suas restantes portas. Desta forma, não evita que haja colisão de pacotes de dados caso dois equipamentos transmitam simultaneamente para a rede [40].

Quando a taxa de chegada de mensagens de dados a cada porta de um switch é superior à taxa de saída, as mensagens são armazenadas em filas de espera. Actualmente, a maior parte dos switches são suficientemente rápidos para que as filas de espera de mensagens não cresçam nas portas de entrada. Contudo, as filas podem crescer nas portas de saída dos switches quando chegam muitas mensagens num curto espaço de tempo e são todas encaminhadas para a mesma porta de saída. Nestes casos, as mensagens em fila de espera são transmitidas sequencialmente, normalmente pela ordem FCFS (*First Come First Served*), em que a primeira mensagem que chega é a primeira a sair. Esta política de gestão das filas pode causar atrasos significativos na rede de comunicação uma vez que as mensagens com maior prioridade podem ficar bloqueadas na fila de espera enquanto que as mensagens de menor prioridade estão a ser transmitidas. Por esse motivo, a utilização de várias filas em paralelo com diferentes níveis de prioridade foi proposta na norma IEEE802.1p [36].

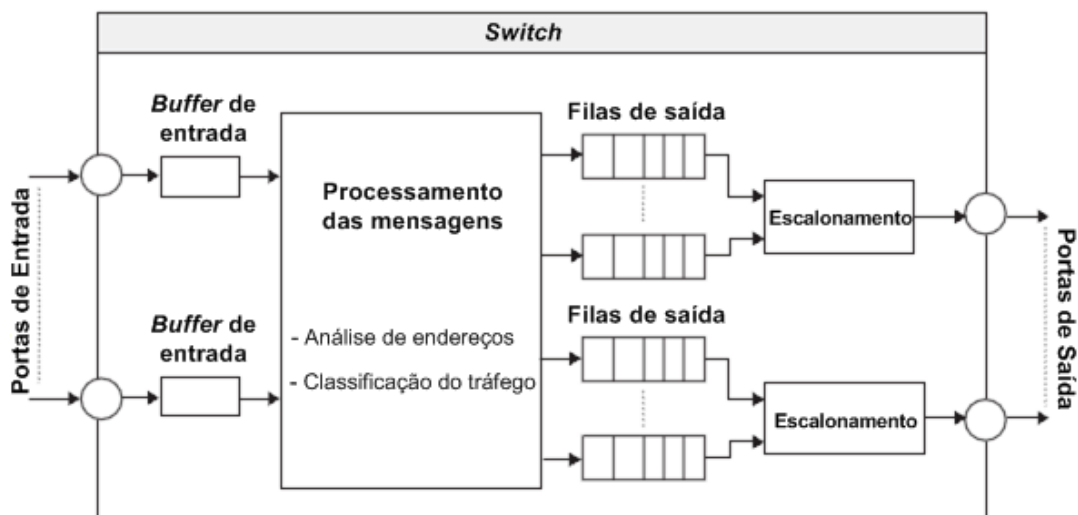


Figura 5.9 - Estrutura interna de um switch [36].

A Figura 5.9 apresenta de forma simplificada a estrutura interna de um switch. Quando uma mensagem chega à porta de entrada do switch fica no *buffer*⁴ de entrada, antes de passar pelo bloco de processamento das mensagens. Neste bloco as mensagens são analisadas no que toca aos endereços de destino e à sua prioridade. O bloco de escalonamento organiza o envio dos dados, armazenados em várias filas de saída, através das portas de saída. A política de escalonamento utilizada para manipular as mensagens em fila de espera em cada porta pode ter um grande impacto no comportamento temporal da rede de comunicação [36].

Quando o tipo de tráfego predominante na rede é *broadcast* (difusão dos dados para todos os equipamentos da rede) ou *multicast* (difusão dos dados para alguns equipamentos da rede) é expectável que haja um aumento substancial do tráfego em cada porta do switch. Consequentemente, a probabilidade de a capacidade limite das filas de espera do switch ser ultrapassada aumenta causando a degradação da performance da rede de comunicação.

5.2.3.1. Ethernet com prioridade (IEEE802.1p)

A Ethernet Comutada (*Switched Ethernet*) não providencia um mecanismo de transferência de dados com prioridade nos sistemas de comunicação das subestações de energia eléctrica. Tipicamente, os dados que não são gerados em tempo real ocupam tramas de dados grandes, passíveis de criar filas de espera significativas nos switches. Quando chegam dados com requisitos de tempo real, os switches têm uma grande quantidade de dados à espera de serem processados e encaminhados para os equipamentos de destino. Desta forma, gera-se um atraso na entrega dos dados em tempo útil para as funções, pelo que o correcto funcionamento do sistema poderá ser colocado em risco [41].

A norma IEEE802.1p introduziu o conceito de escalonamento das tramas de dados com base nos seus níveis de prioridade. Sem o escalonamento prioritário dos dados, todas as

⁴ Um *buffer* é um segmento de memória reservado para armazenar pequenos pacotes de dados antes de serem processados.

tramas que chegavam aos switches eram colocadas na mesma fila de espera, aguardando pela sua vez para serem encaminhadas para o equipamento de destino. Pelo contrário, com a utilização da norma IEEE802.1p, foi possível começar a escalonar as tramas de chegada em diferentes filas com base na sua prioridade, garantindo-se, desta forma, um melhor tempo de resposta para as tramas com maior prioridade relativamente às de menor prioridade [41].

Para tornar possível a atribuição de níveis de prioridade às tramas de dados, definidos na norma IEEE802.1p, procedeu-se a uma adaptação da trama Ethernet, introduzindo-se mais um campo. Assim, na norma IEEE802.1q é definido o novo formato da trama Ethernet contemplando a introdução de uma etiqueta de 4 Bytes (32 bits). Esta etiqueta é introduzida entre os campos de endereço de origem e comprimento dos dados, da trama original da Ethernet, apresentada na Figura 5.6. Na Figura 5.10 é apresentado o formato da trama Ethernet definida pela norma IEEE802.1q. Os primeiros 16 bits são identificativos do tipo de etiqueta da norma IEEE802.1q. Os restantes 16 bits são relativos ao controlo da informação, e estão divididos em três campos: Prioridade (3 bits), Indicador de Formato Canónico (CFI) (1 bit) e Identificação da VLAN (12 bits). A prioridade é definida pela norma IEEE802.1p e pode ir até 8 níveis. A Identificação da Rede de Área Local Virtual (VLAN) identifica uma VLAN particular à qual se destinem os dados [41].

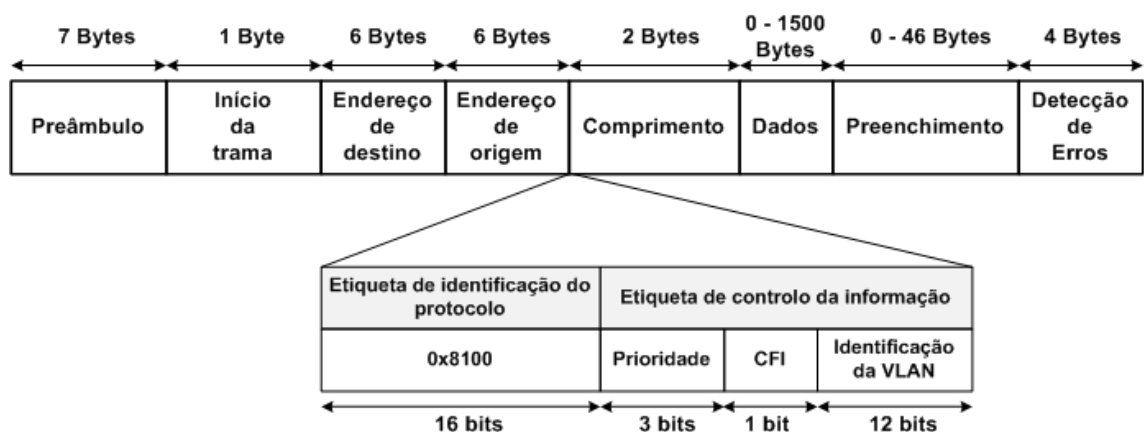


Figura 5.10 - Formato da trama Ethernet definida na norma IEEE802.1q [41].

O dimensionamento do Sistema de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) deverá ter em consideração os tempos de propagação da informação na Rede Local de Comunicações (RLC), de forma a garantir tempos máximos de actuação para as funções críticas do sistema. Na

Tabela 5.2 são indicadas para as funções críticas do SPCC, os tempos máximos admitidos, desde a ocorrência de um evento no processo físico até à actuação na bobina de disparo dos disjuntores ou à inibição de ordens, no caso de encravamentos, considerando as situações mais desfavoráveis [39].

Tabela 5.2 - Funções críticas dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo e respectivos tempos máximos de actuação [39].

Função	Painéis afectados	Tempos máximos de actuação
Deslastre de frequência	Saída de Linha MT, Bateria de Condensadores MT, Transformador de Serviços Auxiliares, Acoplamento de Barras MT	50 ms (Tempo máximo decorrente entre a ocorrência do mínimo de frequência e a execução de Ordens de Disparo aos Disjuntores)
Regime Especial de Exploração (REE)	Saída de Linha MT	50 ms (Tempo máximo decorrente entre a actuação do DTR e a execução de Ordens de Disparo aos Disjuntores)
Arco interno	Transformador de Potência AT, Chegada MT, Bateria de Condensadores MT, Transformador de Serviços Auxiliares e Regime de Neutro, Seccionamento de Barras MT	50 ms (Tempo máximo decorrente entre o aparecimento da informação do defeito de arco interno e a execução de Ordens de Disparo aos Disjuntores e respectivo encravamento)
Lógica de encravamentos	Todos os painéis	50 ms (Tempo máximo decorrente entre o aparecimento da informação a alteração do estado e inibição de Ordens de Abertura/Fecho sobre o equipamento)
Deslastre de Tensão de Alta Tensão(AT) e Média Tensão (MT)	Linha AT, Transformador de Potência AT, Chegada MT, Saída de Linha MT, Bateria de Condensadores MT	200 ms (Tempo máximo decorrente entre a ocorrência do mínimo de tensão e a execução de Ordens de Disparo aos Disjuntores)

5.2.4. Ethernet Rápida (IEEE802.3u)

Na Rede de Área Local (LAN) dos Sistemas SPCC instalados nos edifícios de comando das subestações de distribuição a velocidade máxima de comunicação é 100 Megabits por segundo

(Mbps). O padrão original da Ethernet assegurava uma velocidade de comunicação máxima entre equipamentos de 10 Megabit por segundo. Todavia, o aumento do tráfego de dados na rede de comunicação dos SPCC devido à implementação de novas funcionalidades e serviços, para além da existência de funções de protecção críticas para o sistema motivou que se procedesse ao aumento da velocidade de comunicação da rede local da subestação para 100 Mbps. A Ethernet Rápida (Fast Ethernet) é uma tecnologia baseada na Ethernet caracterizada por operar a uma velocidade de comunicação máxima de 100 Mbps. Refira-se que a Fast Ethernet (IEEE 802.3u) é compatível com o padrão original da Ethernet (IEEE 802.3).

Tabela 5.3 - Especificações técnicas da tecnologia Fast Ethernet [11].

Nome	Cabo	Comprimento máximo (por segmento)
100Base-T4	Par entrelaçado	100 metros
100Base-TX	Par entrelaçado	100 metros
100Base-FX	Fibra óptica	2000 metros

O funcionamento da Ethernet Rápida é optimizado numa rede de comunicação onde são utilizados *switches*. A principal vantagem reside no facto de com a utilização de switches o modo de transmissão poder ser *full-duplex*. No modo *full-duplex* dois Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) podem trocar informação entre si simultaneamente, isto é, existem canais de comunicação independentes para recepção e transmissão dos dados. Para além disso, com a utilização de Ethernet Rápida assegura-se uma velocidade de comunicação de Mbps para cada um dos canais. Desta forma, considera-se que uma das virtudes da utilização da Ethernet Rápida e de switches é duplicar a velocidade de comunicação da rede de 100 Mbits por segundo para 200 Mbps, dado que em cada instante é possível ter equipamentos a intercomunicar entre si utilizando dois canais independentes, cada um com uma velocidade de 100 Mbps [11].

5.2.5. Gigabit Ethernet (IEEE802.3z)

Gigabit Ethernet é a designação utilizada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) para descrever a tecnologia para transmissão de dados numa rede de comunicação com uma velocidade de um Gigabit por segundo. A migração das tecnologias Ethernet (IEEE802.3) e *Fast Ethernet* (IEEE802.3u) para Gigabit Ethernet (IEEE802.3z) tem um baixo impacto a nível de investimento uma vez que as especificações técnicas definidas na norma IEEE802.3 são mantidas, nomeadamente a nível da trama Ethernet. São utilizados 48 bits (6 Bytes) para o endereçamento dos equipamentos, sendo que o tamanho mínimo e máximo de trama também são iguais ao definido no padrão IEEE802.3 [11].

Tabela 5.4 - Especificações técnicas da tecnologia Gigabit Ethernet [11].

Nome	Cabo	Comprimento máximo (por segmento)
1000Base-SX	Fibra óptica	550 metros
1000Base-LX	Fibra óptica	5000 metros
1000Base-CX	2 pares de cabo STP (Shielded Twisted Pair)	25 metros
1000Base-T	4 pares de cabo UTP (Unshielded Twisted Pair)	100 metros

A Ethernet Gigabit suporta dois modos de transmissão: o *full-duplex* e o *half-duplex*. O modo mais comum é o full-duplex, que permite que a comunicação dos dados ocorra simultaneamente nos dois sentidos, isto é, um IED pode receber e enviar dados ao mesmo tempo. Por sua vez, no modo de transmissão em half-duplex a comunicação pode ocorrer nos dois sentidos, isto é, cada equipamento pode transmitir e receber dados, embora que em instantes diferentes de tempo. Na comunicação em half-duplex, cada equipamento da rede de comunicação não pode enviar e receber dados simultaneamente [11].

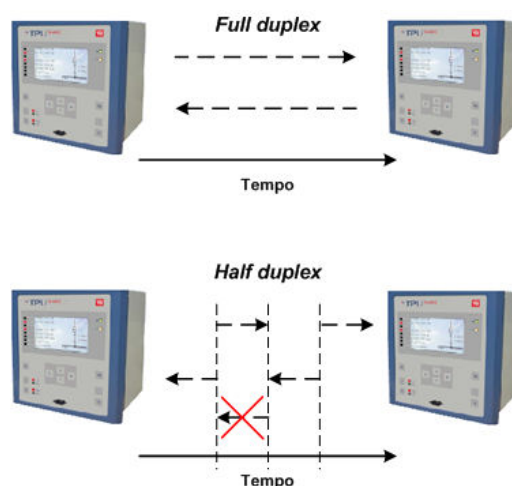


Figura 5.11 - Modos de transmissão *half duplex* e *full duplex* entre dois equipamentos.

O desenvolvimento da arquitetura de comunicações para o sistema de automação das subestações (SAS) é um dos desafios e tarefas subtis que visa integrar as subestações no mundo digital. O paradigma das comunicações para o SAS exige uma importância crítica por duas razões: a tecnologia das comunicações está a mudar e evoluir de dia para dia pelo que é conveniente optar pelas que sejam simples de desenvolver e que impliquem um menor custo em termos de tempo e configuração, aquando da migração para sistemas e tecnologias mais modernas. Por outro lado, o aumento das variáveis, quantidade de informação e do número de equipamentos do sistema de automação e protecção das subestações exige uma maior largura de banda da rede de comunicação. Contudo, apesar da necessidade de proceder à expansibilidade do SAS, a interoperabilidade entre todos os equipamentos é um dos requisitos básicos que tem de se verificar e garantir de acordo com a norma CEI61850 [29]. De acordo

com a norma CEI61850, a Ethernet é o protocolo a utilizar no sistema de comunicação da subestação. Desta forma, é viável considerar a Ethernet como a solução mais promissora para a arquitectura de comunicações do SAS. A tecnologia Ethernet mudou a tendência das redes de comunicação devido à sua elevada disponibilidade, eficiência e relação custo-eficácia. Para além destas vantagens, a intercomunicação entre os equipamentos é garantida uma vez que a Ethernet é um protocolo normalizado e utilizado em grande escala em aplicações industriais [42].

O desenvolvimento e aplicação da Ethernet Gigabit na rede de comunicação das subestações pode ajudar a tornar o sistema de automação baseado nesta tecnologia numa solução a longo prazo. Na área das comunicações, a Ethernet é actualmente considerada uma tecnologia universal e standard em variadas aplicações, nas quais se integram os sistemas de energia. Aliada a esta proliferação da Ethernet, surge a norma CEI61850, que teve um papel preponderante na migração do sistema de automação da subestação para a tecnologia digital. Para além disso, a norma CEI61850 teve um impacto significativo em termos da rentabilidade e eficiência das arquitecturas para sistemas de energia. Com a aplicação da norma CEI61850, os Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações irão não só aumentar o seu desempenho, como garantir uma plataforma universal e normalizada capaz de manter e actualizar a subestação com custos controlados. Desta forma, o objectivo principal é usar a Ethernet como protocolo padrão da rede de comunicação para atingir os requisitos de desempenho definidos pela norma CEI61850 para o SAS, para além de assegurar uma arquitectura da rede de comunicação eficiente e fiável no intuito de se conseguir o funcionamento pretendido para o sistema [42].

5.2.5.1. Gigabit Ethernet nas subestações

O paradigma dos sistemas de comunicações tem de ter em conta aspectos como a capacidade, performance, fiabilidade, precisão, segurança, disponibilidade e interoperabilidade entre os equipamentos do sistema de automação da subestação (SAS). Garantindo-se estes atributos relativos ao sistema de comunicação, é possível implementar uma arquitectura de comunicações robusta com base nas especificações da norma CEI61850. Com o significativo avanço da Ethernet, que evoluiu a partir das tradicionais redes de área local (LANs) para as redes de longa distância (WANs), esta tecnologia passou a ser impulsionada pela taxa de transferência de dados a alta velocidade, para além do facto de ser uma tecnologia dominante na área das comunicações industriais. Neste sentido, a Ethernet tornou-se numa das tecnologias mais viáveis a aplicar no SAS. Para além disso, a Ethernet é o protocolo de comunicação mais apropriado para o SAS porque pode operar nos três níveis especificados pela norma CEI61850 para a subestação. Os níveis em questão são o nível do processo, o das unidades de painel e o da estação. Refira-se que também já começa a ser considerada a possibilidade de utilizar a Ethernet como protocolo para comunicação entre subestações [42].

A tecnologia Ethernet suporta taxas de transferência de dados muito elevadas. Actualmente, já existem disponíveis no mercado *switches* Ethernet com capacidade para comunicar a uma velocidade até 10 Gigabit por segundo (Gbps), sendo que já decorrem trabalhos de investigação e desenvolvimento para que num futuro próximo se atinja o

patamar dos 100 Gbps. Atendendo à sua elevada taxa de transferência de dados, a tecnologia Ethernet manteve a sua performance ao longo da sua evolução. Com o contributo da evolução da indústria electrónica, reflectido no desenvolvimento de novos e melhores equipamentos, é expectável que irá manter o seu ímpeto no sentido de continuar a garantir uma elevada taxa de transferência de dados e desempenho eficiente [42].

5.2.5.2. Ethernet: Principais vantagens

A tecnologia Ethernet é eficiente em termos de custos uma vez que exige um número reduzido de equipamentos e permite também transportar energia eléctrica através da rede de comunicação, conforme especificado na norma IEEE802.3af. A Ethernet permite, assim, implementar uma rede de comunicação económica e segura capaz de assegurar a instalação dos Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) de forma rápida e flexível no edifício de comando da subestação. A Ethernet também permite que o sistema de comunicação seja tolerante a erros provocados pela ocorrência de falhas ocorridas durante o tempo de operação da rede, minimizando assim o tempo durante o qual o sistema de comunicação da subestação está indisponível (*downtime*) [42].

Entre as vantagens da tecnologia Ethernet também se destaca a possibilidade de classificar o tráfego com base na prioridade das mensagens e filtrar dinamicamente as mensagens enviadas para vários dispositivos da rede (*multicast*), através das especificações da norma IEEE802.1p. Fazendo uso deste atributo da Ethernet, é possível atribuir uma prioridade superior aos dados críticos da aplicação face aos dados não críticos, para além de providenciar um mecanismo eficiente de difusão das mensagens para vários equipamentos. Este é um dos avanços mais significativos no sentido de se ter Ethernet determinística, sendo que o controlo em tempo real da subestação pode ser otimizado fazendo uso desta mesma tecnologia [42]. As mensagens com prioridade podem ser utilizadas, por exemplo, para garantir que os dados das funções críticas dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) - Tabela 5.2 - são entregues num espaço de tempo que permita a actuação destas mesmas funções dentro dos tempos estipulados.

No seguimento da evolução da tecnologia Ethernet surge a Gigabit Ethernet, sendo que já começa a ser analisado qual o seu potencial para satisfazer os requisitos para o sistema de comunicação da subestação, especificados na norma CEI61850. Falta analisar que arquitecturas poderão ser adoptadas para o sistema de comunicação da subestação com base na utilização da tecnologia Gigabit Ethernet. De acordo com a norma CEI61850, as funcionalidades do SAS foram alocadas logicamente a três níveis distintos: nível da estação, nível das unidades de painel e nível do processo. O nível da estação é constituído por uma unidade central de processamento com base de dados, uma Interface Homem-Máquina (HMI) para interface com o operador, interface para comunicações remotas com o centro de controlo e uma unidade de processamento de reserva (*backup*) para assegurar a continuidade de serviço em caso de falha da unidade central [42].

Todos os equipamentos instalados no nível da estação providenciam as funções para controlar e proteger toda a subestação. Por sua vez, o nível das unidades de painel é constituído por equipamentos, tipicamente os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs), responsáveis pelo controlo, protecção e monitorização dos vários painéis da subestação. Por

último, o nível do processo é constituído por unidades de entradas e saídas, sensores inteligentes e actuadores, ou seja, o nível de processo é composto por unidades que providenciam uma interface com os equipamentos primários da subestação. Com base neste três níveis lógicos é proposta a arquitectura da Figura 5.12 para um sistema de comunicações baseado em Gigabit Ethernet. Esta arquitectura tem em linha de conta aspectos como a normalização, interoperabilidade, simplicidade e facilidade em efectuar tarefas de manutenção aos equipamentos [42].

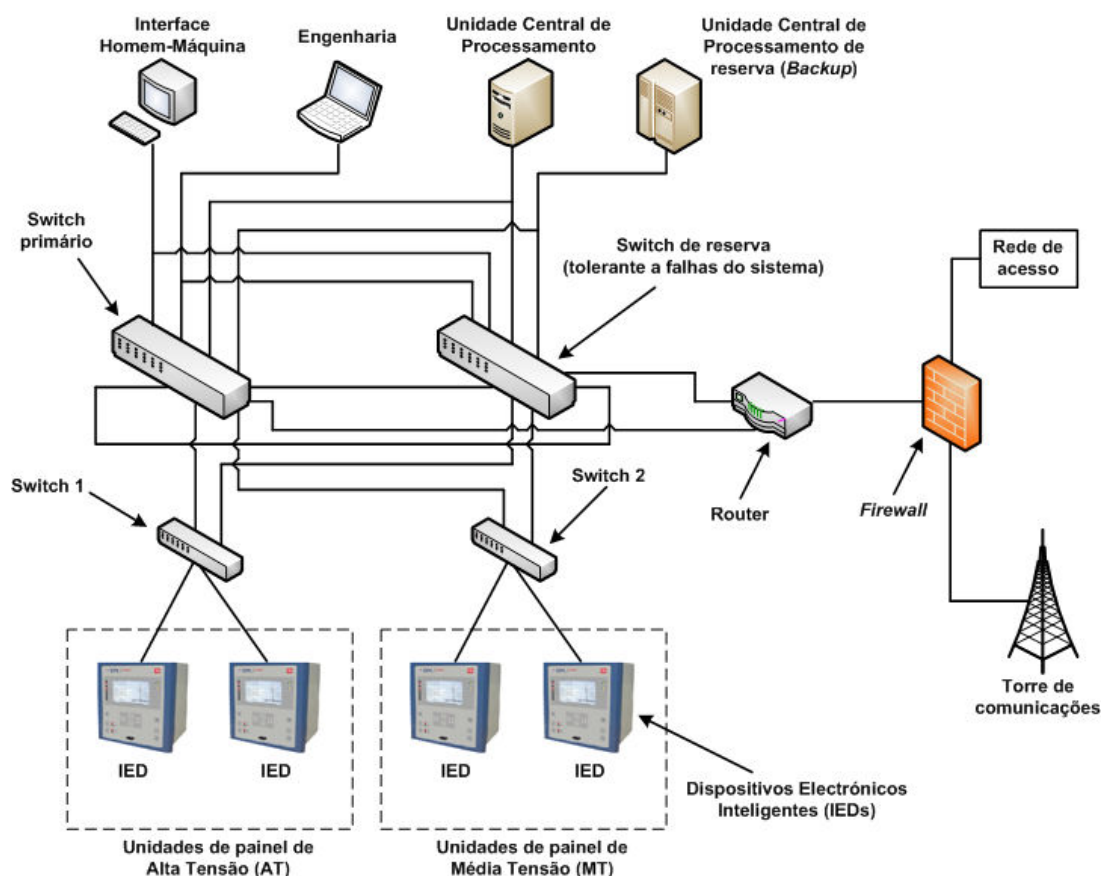


Figura 5.12 - Arquitectura da rede de comunicação, baseada em Ethernet Gigabit, para o nível da estação do sistema de automação da subestação [42].

A Figura 5.12 apresenta a arquitectura de comunicação proposta para o nível da estação. Segundo esta arquitectura, são utilizados *switches* Ethernet como interface entre o nível da estação e o nível das unidades de painel e entre o nível das unidades de painel e o nível do processo. A interface entre o nível das unidades de painel e o nível do processo é representado na Figura 5.13. A Gigabit Ethernet no nível da estação providencia a ligação entre as unidades de painel e a HMI, equipamento para tarefas de engenharia, unidade central de processamento e unidade central de processamento de reserva (*backup*), bem como com a rede de acesso, que garante a comunicação com o exterior (tipicamente com o centro de controlo) [42].

Os switches com tecnologia Gigabit Ethernet são instalados em dois níveis. No nível das unidades de painel são utilizados para ligar as diferentes unidades de painel de Alta Tensão e Média Tensão. No nível da estação, os switches com Gigabit Ethernet asseguram a ligação entre todas as unidades de painel e os equipamentos instalados no nível da estação (HMI,

equipamento para tarefas de engenharia, unidade central de processamento e unidade central de processamento de reserva). O switch de reserva (tolerante a falhas) representado na Figura 5.12 é utilizado no sentido de garantir a conectividade entre todos os equipamentos no caso de ocorrer algum problema com o switch primário. A conexão do sistema de comunicações da subestação ao exterior tem em vista os seguintes objectivos: permitir a monitorização a partir de um local remoto ao da subestação, nomeadamente a partir do Sistema de Supervisão, Controlo e Aquisição de Dados (SCADA) do centro de controlo e assegurar a comunicação com outras subestações. De forma a garantir estas ligações, os switches primário e de reserva são ligados a um router⁵ que faz o encaminhamento dos pacotes de dados da subestação e através de uma comunicação com *firewall*⁶ é ligado à rede de acesso. No caso da conexão com a rede de acesso estar indisponível, as comunicações com o exterior são feitas a partir da torre de comunicações que assegura uma ligação sem fios (*wireless*). Assim, a conectividade com o SCADA do centro de despacho é garantida [42].

A arquitectura apresentada na Figura 5.12 é implementada sobre uma rede em fibra óptica. A fibra óptica é o meio físico preferencial nas subestações atendendo à sua elevada capacidade, eficiência, cobertura, segurança e imunidade ao ruído electromagnético.

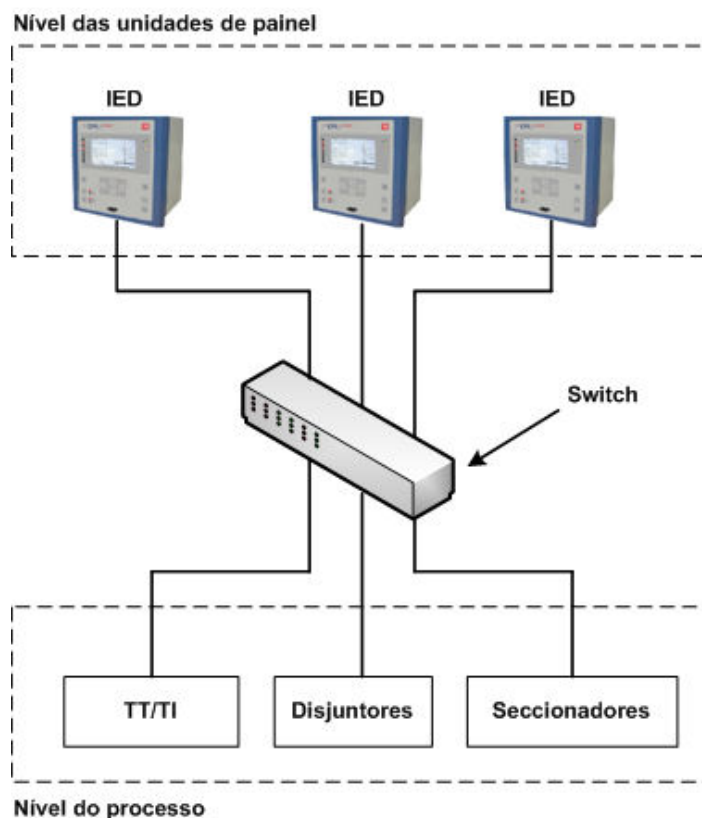


Figura 5.13 - Arquitectura de comunicação entre o nível das unidades de painel e o nível do processo, numa rede baseada em Ethernet Gigabit [42].

⁵ Um router é um equipamento com capacidade para interconectar redes de comunicação através da Internet.

⁶ Uma firewall é uma tecnologia que permite controlar todo o tráfego da rede de comunicação e bloquear a tentativa de intrusão por parte aplicações maliciosas.

Na Figura 5.13 é representada a arquitectura de comunicação entre o nível das unidades de painel e o nível do processo, numa rede baseada em Gigabit Ethernet. Segundo esta arquitectura, os vários Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) existentes no nível das unidades de painel são conectados aos equipamentos primários da subestação (Transformadores de Tensão (TTs), Transformadores de Intensidade (TIs), Disjuntores, Seccionadores, entre outros) através de um *switch* Ethernet [42]. Contudo, esta arquitectura para ligação destes dois níveis do SAS exige que seja utilizado o barramento do processo (*process bus*), definido na norma CEI61850. Segundo a norma CEI61850, o barramento do processo permite que a comunicação entre os equipamentos primários da subestação (nível do processo) e os IEDs (nível das unidades de painel) seja feita através de uma rede de comunicação - ver secção 3.5 do capítulo 3.

5.3. Transmission Control Protocol e Internet Protocol (TCP/IP)

O TCP/IP é um conjunto de protocolos de comunicação utilizado para ligação de equipamentos através de uma rede de comunicação. A pilha de protocolos TCP/IP toma esta designação devido ao nome de dois protocolos: o Protocolo de Controlo da Transmissão (TCP) e o protocolo de Internet (IP). Nesta secção será dada maior ênfase ao protocolo IP dado que é este o protocolo que se começa a utilizar nas subestações de distribuição para comunicação com o centro de controlo.

O Protocolo de Internet (IP) assume actualmente uma posição relevante na indústria das tecnologias da informação. O Sistema de Automação de uma Subestação (SAS) exige a instalação de uma rede de comunicação, uma vez que este é constituído por uma grande diversidade de equipamentos, aplicações e serviços. No passado, o SAS estava dependente de protocolos de comunicação proprietários de cada fabricante de equipamentos. Porém, as comunicação baseadas em IP são normalizadas e não proprietárias, suportando simultaneamente múltiplas aplicações sobre a mesma rede de comunicação. Refira-se que os avanços da tecnologia IP e a sua aceitação por parte da indústria são acompanhados por uma redução de custos económicos [43].

Os fabricantes dos equipamentos do SAS apresentaram alguma relutância, numa fase inicial, à utilização de comunicações por IP. Os fabricantes alegavam razões como a falta de confiança no IP para aplicações críticas, os elevados custos relativos à substituição dos sistemas mais antigos utilizados nas subestações, falta de sensibilização para os avanços tecnológicos e falta de casos de estudo que fundamentassem o sucesso de projectos reais [43].

O IP é o protocolo utilizado para a camada de rede do modelo TCP/IP. Uma das funções da camada de rede é dividir os dados em pacotes chamados datagramas. Teoricamente, cada datagrama pode ter 64 kBytes, sendo que na prática o seu tamanho é inferior a 1500 Bytes, para que possam ser encaixados numa trama Ethernet. Cada datagrama é transmitido através da Internet, podendo ser fragmentado em unidades mais pequenas. Quando todas as unidades chegam ao equipamento de destino, são reagrupadas de forma a reconstituir o datagrama original. A camada de rede também tem como função fazer a entrega dos pacotes de dados com o melhor esforço possível (*best effort*), sendo que não há estabelecimento de uma conexão entre os equipamentos de origem e destino. Assim, não há garantia que a transmissão dos dados seja bem sucedida e que todos os dados chegarão correctamente ao

destino. Refira-se, no entanto, que a fiabilidade da comunicação é assegurada por outras camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI). Uma das principais mais-valias do protocolo IP é o facto de ter sido desenvolvido desde o início com o objectivo de interligar redes de comunicação [11].

O protocolo TCP é implementado ao nível da camada de transporte do modelo OSI. A camada de transporte tem como principal função assegurar a fiabilidade e transmissão dos dados desde o equipamento de origem até ao de destino independentemente do meio físico utilizado. A utilização do protocolo TCP permite que se estabeleçam ligações orientadas à conexão entre os equipamentos. Neste sentido, é possível efectuar ligações ponto a ponto directamente entre as aplicações dos equipamentos de origem e destino e garantir que o modo de transmissão entre os equipamentos seja em full-duplex - Figura 5.11. Para além destas vantagens, o protocolo TCP também garante que não há perda de pacotes de dados durante a transmissão, os dados chegam ordenados ao destino e o controlo sobre o fluxo de dados. Refira-se que para além do protocolo TCP, pode ser o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) na camada de transporte do modelo OSI [11].

O protocolo UDP tem uma qualidade de serviço semelhante ao protocolo IP. A comunicação é feita sem estabelecer conexão, pode haver perda de pacotes de dados, os pacotes de dados podem chegar desordenados ao destino e não há controlo do fluxo de dados nem retransmissão dos dados no caso de falha na comunicação. Para além disso, o protocolo UDP é mais adaptado ao tráfego que não exige uma elevada qualidade de serviço, sendo mais rápido que o protocolo TCP. Desta forma, o protocolo UDP é mais adequado ao tráfego de dados em tempo real, desde que não uma elevada qualidade de serviço não seja requisito [11].

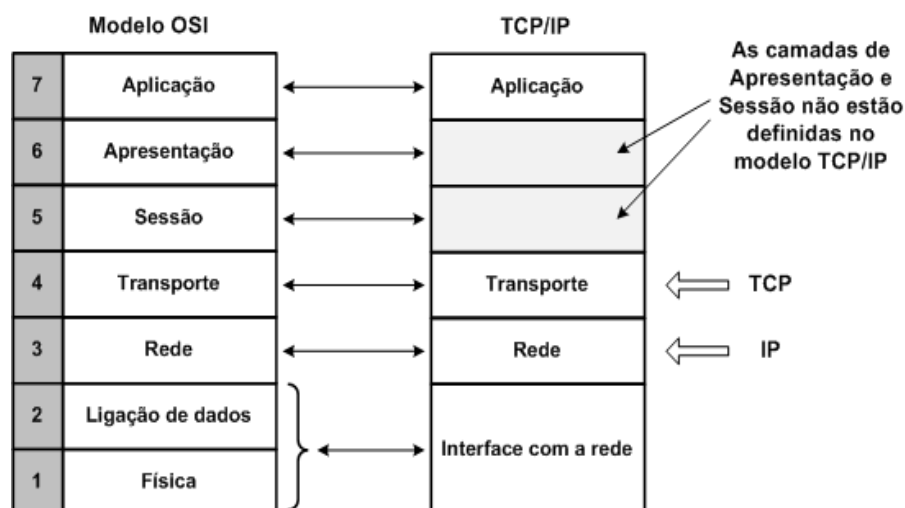


Figura 5.14 - Relação entre o modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) e o modelo TCP/IP [11].

5.3.1. Protocolo de Internet (IP)

Na Figura 5.15 é apresentado o formato da trama do protocolo de internet (IP). Entre os campos que compõe a trama do protocolo IP, destacam-se a versão, o tipo de serviço, o

comprimento total, a identificação, os endereços de origem e destino e os dados. Atualmente, a versão utilizada para o protocolo IP é o IPv4. Porém, refira-se que começa a ser equacionada a passagem da versão do IPv4 para o IPv6 na Internet de próxima geração. O IPv6 representa uma abordagem completamente distinta do IPv4, sendo que estas duas versões são incompatíveis. As vantagens de utilização do IPv6 passam pela diminuição do número de campos constituintes da trama IP para sete (com o IPv4 eram utilizados treze campos), maior número de bytes disponível para os endereços, suporte para autenticação e encriptação dos dados e suporte para qualidade de serviço em aplicações de tempo real. Apesar das suas inúmeras vantagens, a utilização do IPv6 implica custos de implementação consideráveis para além de requerer a aquisição de novos routers e reconfiguração dos servidores de internet existentes. Por estes motivos, o IPv4 continua ainda a ser o protocolo de internet utilizado [36].

No campo relativo ao tipo de serviço pode-se definir o tipo de qualidade de serviço que se pretende. Desta forma, pode-se optar entre minimizar o atraso, maximizar a taxa de transferência dos dados ou maximizar a fiabilidade dos dados. O comprimento total da trama IP é 64 kBytes. O campo de identificação é utilizado no caso de uma trama ser dividida em vários fragmentos, servindo para identificar a que trama pertence cada fragmento. Os endereços de origem e destino são endereços de 32 bits que indicam o número da rede e do servidor [11].

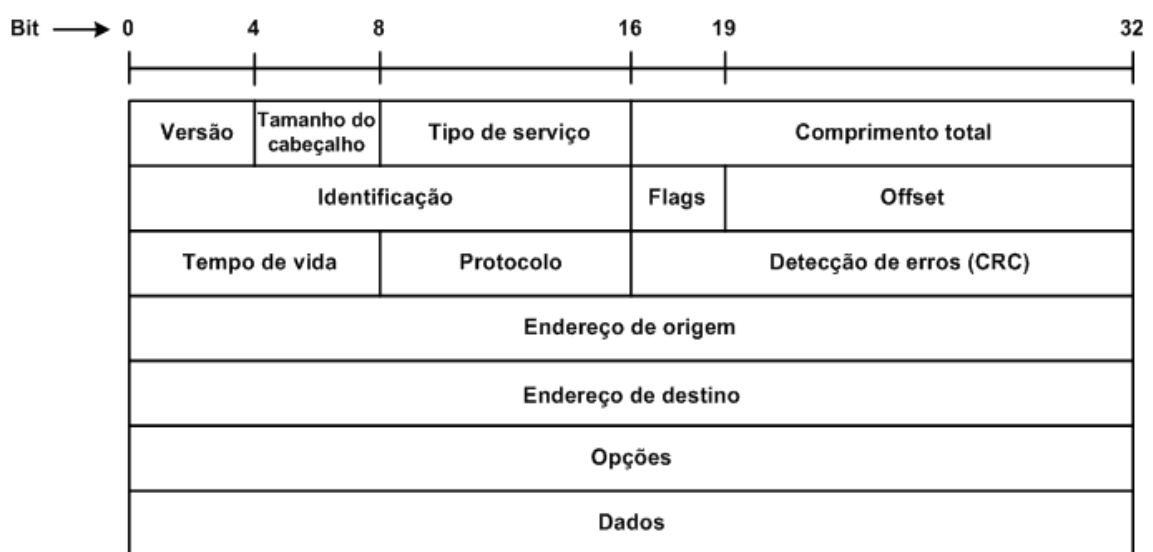


Figura 5.15 - Formato da trama utilizada pelo protocolo de internet (IP) [11].

5.3.1.1. Formato dos endereços IP

Os endereços do protocolo IP (versão IPv4) têm 32 bits. Cada endereço identifica uma interface, isto é, ligação a uma rede. A divisão dos endereços IP em classes é feita com o intuito de tornar a gestão dos equipamentos da rede de comunicação mais eficiente. A Figura 5.16 apresenta o formato dos endereços IP.

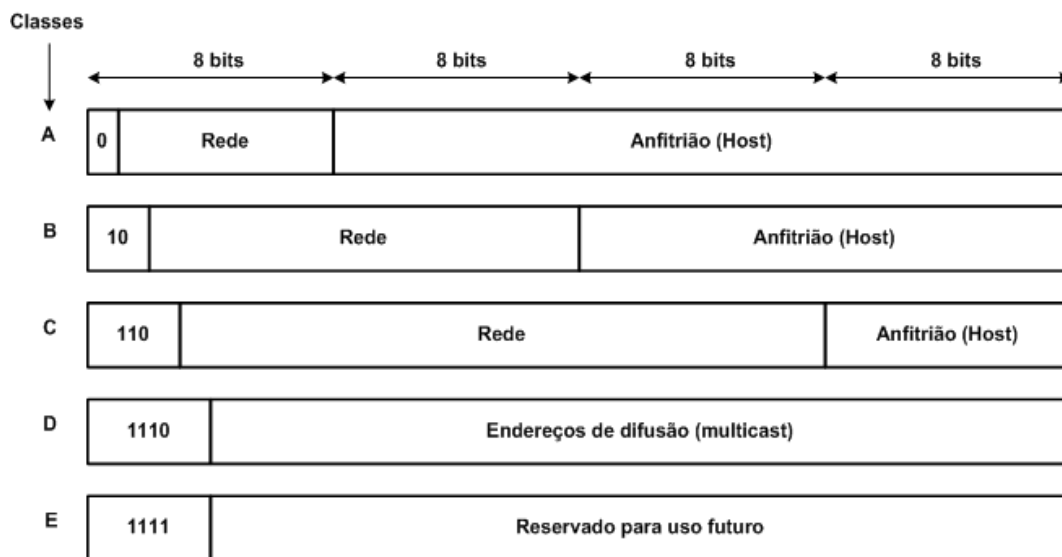


Figura 5.16 - Formato dos endereços do protocolo de Internet (IP), versão IPv4 [11].

Todos os equipamentos ligados à mesma rede de comunicação têm de ter o mesmo valor no campo “Rede” do endereço IP. No caso da subestação, a rede de comunicação é considerada como sendo o conjunto de equipamentos (switches, IEDs, computadores) interligados entre si sem a utilização de um router. O router, por sua vez, pode ser utilizado para ligar as diferentes redes entre si através da Internet. Cada rede apresentada na Figura 5.17 constitui uma rede de área local (LAN) que usa a Ethernet como protocolo de comunicação entre todos os seus equipamentos.

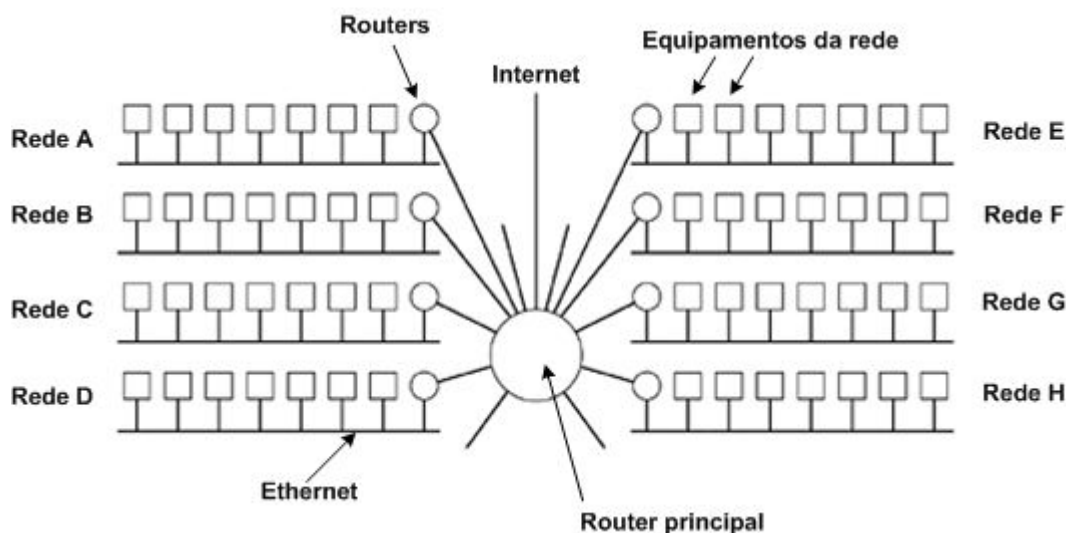


Figura 5.17 - Interligação entre diferentes redes de comunicação [11].

5.3.1.2. Configuração de um equipamento da rede de comunicação

Quando um equipamento, nomeadamente um Dispositivo Electrónico Inteligente (IED), é instalado na rede de comunicação é necessário proceder à sua configuração. Na Figura 5.18

apresentam-se os principais parâmetros associados à configuração de um equipamento da rede de comunicação. Estes parâmetros são o endereço IP, máscara de sub-rede e o gateway predefinido.

Endereço IP:	192 . 168 . 107 . 76
Máscara de sub-rede:	255 . 255 . 255 . 0
Gateway predefinido:	192 . 168 . 107 . 254

Figura 5.18 - Parâmetros de configuração de um equipamento da rede de comunicação.

No campo “Endereço IP” (*IP Address*) é introduzido o endereço IP do IED, instalado na rede de comunicação do edifício de comando da subestação, que se está a configurar. O campo “Máscara de sub-rede” (*Subnet Mask*) corresponde a uma máscara que é aplicada ao Endereço IP, permitindo a cada IED saber qual o conjunto de endereços que podem ser acedidos directamente. A configuração da máscara de sub-rede está relacionada com a utilização de sub-redes dentro da rede de comunicação. A utilização de sub-redes permite que uma rede de comunicação de grande dimensão seja dividida em redes de menor dimensão, garantindo-se, desta forma, uma redução do tráfego de dados na rede e optimização da performance da rede. Para se criarem as sub-redes cada equipamento tem que ter uma máscara de sub-rede que define qual é a parte do seu endereço IP que será usada como identificador da sub-rede e do equipamento anfitrião (*host*). Por último, o campo “Gateway predefinido” (*Default Gateway*) representa o endereço de rede para onde devem ser encaminhados todos os pacotes de dados, cujos equipamentos a que se destinam não podem ser acedidos directamente. O “Gateway predefinido” normalmente representa o endereço de rede do switch ao qual estão ligados os vários IEDs [11].

5.4. *Virtual Local Area Network (VLAN)*

Numa arquitectura com várias redes de comunicação interligadas surge a necessidade de separar o tráfego de informação proveniente de diferentes origens. A motivação para proceder a esta separação lógica de informação entre redes de comunicação passa pela existência de três problemas fundamentais. O primeiro tem a ver com segurança e o acesso indevido a certos dados. O segundo problema está relacionado com a carga de informação na rede. Existem redes que são mais utilizadas que outras, pelo que a quantidade de informação também será diferente. No limite a LAN pode ficar saturada, sendo que a rede com maior carga terá de diminuir a quantidade de informação que está a impor para que as outras redes também assegurem a comunicação dos seus equipamentos entre si. O terceiro problema tem a ver com a difusão (*broadcast*) e com o consequente número de mensagens na rede. Grande parte das LAN suporta difusão dos dados para todos os equipamentos nela instalados. Por exemplo, quando um equipamento quer mandar um pacote de dados para um determinado endereço IP, necessita de saber qual o endereço MAC que deverá colocar na trama Ethernet. Assim, o equipamento que difunde envia uma trama que pergunta a cada um dos restantes equipamentos quem é que tem o IP pretendido, aguardando, posteriormente, pela resposta. Neste sentido, quantas mais redes estiverem interligadas maior será a tendência para que o

número de mensagens difundidas aumente linearmente com o número de equipamentos instalados na rede de comunicação. Se estas mensagens difundidas forem em grande número, toda a largura de banda da rede de comunicação pode ser ocupada [11].

As Redes de Área Local Virtuais (VLANs) podem ser comparadas a um grupo de equipamentos, possivelmente dispostos em múltiplos segmentos físicos da LAN, que não estão constrangidos pela sua localização física e podem comunicar como se estivessem todos na mesma LAN. Existem três tipos de VLANs que se podem considerar:

- Baseadas em grupos de portas;
- Baseadas no endereço de Controlo de Acesso ao Meio (MAC);
- Baseadas no protocolo de comunicação;

5.4.1. VLANs baseadas em grupos de portas

As Redes de Área Local Virtuais (VLANs) definidas a partir de grupos de portas dependem da configuração manual dos switches Ethernet, isto é, a associação de um novo equipamento à rede virtual é feita com base numa configuração manual. As primeiras implementações de Redes de Área Local Virtuais eram suportadas apenas na utilização de um switch. Assim, segundo este tipo de implementação, as diferentes VLANs eram definidas com base nas várias portas de um único switch. Um exemplo deste tipo de implementação seria considerar os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) ligados às portas 1, 2, 3, 7 do switch constituindo a VLAN A, enquanto que os IEDs ligados às portas 4, 5 e 6 do switch constituiriam a VLAN B - Figura 5.19 [36].

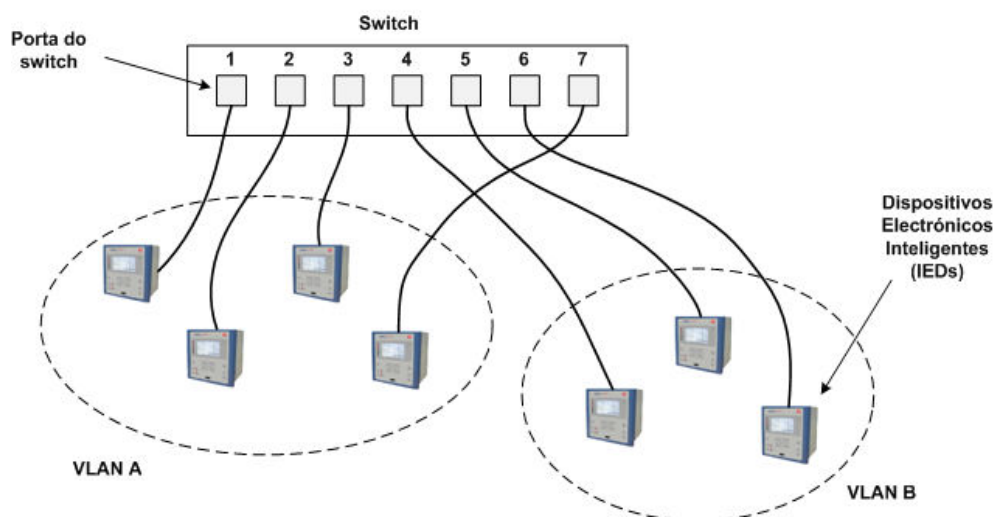


Figura 5.19 - Exemplo de duas Redes de Área Local Virtuais (VLANs) implementadas com base num único switch.

Uma segunda geração de implementação de VLANs baseadas em grupos de portas começou a utilizar mais do que um switch. Neste caso, as VLANs podem ser formadas por equipamentos ligados a portas de switches diferentes. Um exemplo deste tipo de implementação seria considerar os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) ligados às

portas 1, 2 e 4 do switch 1 e à porta 1 do switch 2, constituindo a VLAN A, enquanto que os IEDs ligados à porta 3 do switch 1 e às portas 2, 3 e 4 do switch 2 constituiriam a VLAN B - Figura 5.20 [36].

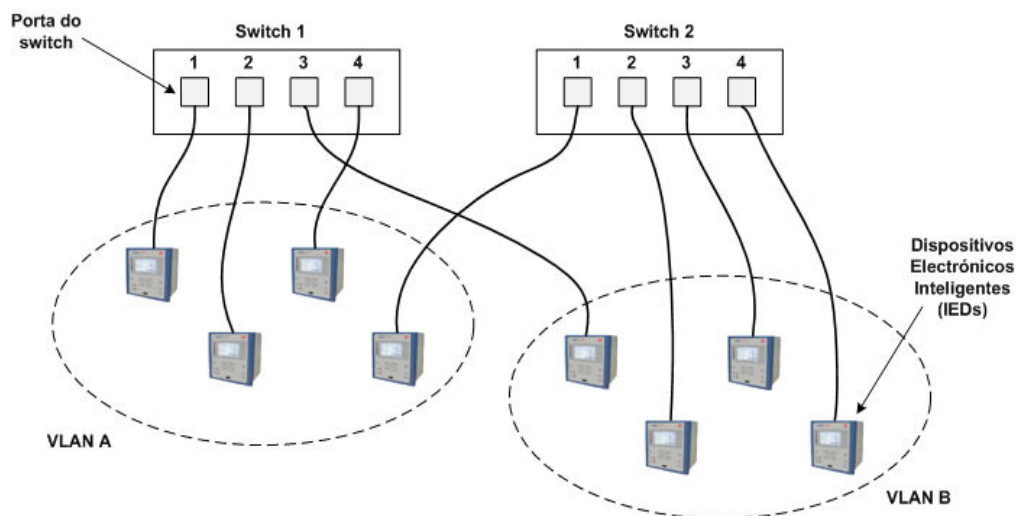


Figura 5.20 - Exemplo de duas Redes de Área Local Virtuais (VLANs) implementadas com base em dois switches.

As VLANs baseadas em grupos de portas dos switches é dos métodos mais comuns utilizados para definir a filiação de cada rede virtual. O facto de definir as VLANs unicamente pelo grupo de portas dos switches não permite que diferentes VLANs partilhem o mesmo segmento físico, isto é, não permite que partilhem a mesma porta de um switch. Contudo, a principal desvantagem de definir as VLANs através das portas dos switches é o facto do operador responsável pela gestão da rede de comunicação ter de reconfigurar toda a filiação da rede virtual sempre que um equipamento é movido de uma porta para a outra [36].

5.4.2. VLANs baseada no endereço MAC

As VLANs definidas com base no endereço de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) utilizam, como a própria designação indica, o endereço MAC de cada equipamento da rede de comunicação. Refira-se que o endereço MAC de cada equipamento é único, pelo que não existem dois equipamentos com o mesmo endereço dentro da mesma rede. Segundo o modo de filiação dos equipamentos de uma VLAN com base no endereço MAC, é feita uma correspondência entre o endereço MAC de cada equipamento e a VLAN à qual se pretende associá-lo. Desta forma, os switches localizam os endereços MAC que pertencem a cada VLAN. Neste sentido, mesmo que um equipamento seja movido, não é necessário proceder à reconfiguração da rede no sentido de garantir que esse mesmo equipamento continue a pertencer à mesma VLAN. Esta é uma das principais vantagens face à utilização de VLANs definidas com base nas portas do switch, em que a tabela com a associação entre as redes virtuais e as portas dos switches tinha de ser reconfigurada, sempre que se pretendia associar um equipamento a outra VLAN [36].

Tabela 5.5 - Definição das Redes de Área Locais Virtuais (VLANs) com base no endereço de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) dos equipamentos.

Endereço MAC	VLAN
00:00:5E:00:01:03	1
00:00:6E:00:03:02	2
00:00:4E:00:01:04	1
00:00:3E:00:03:03	2

5.4.3. VLANs baseadas no protocolo de comunicação

As VLANs definidas com base no protocolo da rede de comunicação utilizam informação disponível nos vários campos (fields) definidos para cada protocolo. Assim, através da análise desta informação, as tramas são encaminhadas apenas para os equipamentos que partilham o mesmo atributo e que constituem a mesma rede virtual. Considera-se como sendo o atributo a informação que é examinada num dos campos do protocolo de comunicação. Por exemplo, se o protocolo utilizado for o TCP/IP um dos campos que se poderia examinar seria o endereço de sub-rede. Assim, seria feita uma atribuição de cada endereço de sub-rede à VLAN à qual se pretende associá-lo, sendo que os equipamentos com o mesmo endereço de sub-rede constituiriam uma VLAN [36].

Tabela 5.6 - Definição das Redes de Área Locais Virtuais (VLANs) com base no endereço de Controlo de Acesso ao Meio (MAC) dos equipamentos.

Endereço de sub-rede	VLAN
23.2.24	1
26.21.35	2
26.21.30	1
23.2.29	2

5.5. Fiabilidade da rede de comunicação

O correcto funcionamento dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição está dependente da fiabilidade e qualidade de serviço garantida pela rede de comunicação. Atendendo a que todos os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) estão interligados através da rede de comunicação, torna-se necessário arranjar mecanismos que assegurem a continuidade de serviço da rede de comunicação em caso de ocorrência de alguma falha. As falhas na rede podem estar relacionadas, por exemplo, com o corte físico do cabo de fibra óptica. Desta forma, é necessário garantir a redundância da rede de comunicação no sentido de, logo que seja detectada qualquer falha na rede, as

comunicações entre todos os equipamentos continue a estar estabelecida. Assim, existem protocolos que asseguram a reconfiguração da rede de comunicação perante a ocorrência de alguma falha, criando um caminho alternativo que assegure que todos os equipamentos continuem a intercomunicar. O STP (Spanning Tree Protocol), RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) e MSTP (Multiple Spanning Tree Protocol) são protocolos que visam garantir a continuidade e fiabilidade da rede de comunicação.

A disponibilidade de uma rede Ethernet pode ser aumentada através de ligações e nós redundantes. Contudo, muitas das especificações da Ethernet submetidas ao Comité Electrotécnico Internacional (IEC) não divulgam métodos que permitam implementar redes de comunicação redundantes. A redundância depende da planta do sistema, isto é, da forma como o sistema está estruturado e da própria rede de comunicação. Por exemplo, para alguns processos com requisitos temporais pouco críticos a redundância pode ser garantida apenas com a utilização de ligações alternativas, que entram em funcionamento quando as ligações principais falham. Por sua vez, uma aplicação com requisitos temporais bastante estritos pode exigir duplicação total da rede de comunicação e redundância paralela das operações do sistema, isto é, paralelamente com o ciclo de operações definidas para o sistema é executado um outro ciclo com uma cópia destas operações. No caso de ocorrer alguma falha no ciclo principal, o ciclo que corre em paralelo assegura a continuidade de funcionamento do sistema [44]. No âmbito da fiabilidade da rede de comunicação dos SPCC das subestações, torna-se fundamental perceber de que forma pode ser garantida a redundância da rede de comunicação que suporta estes mesmos sistemas.

5.5.1. Redundância da rede de comunicação

Considerando um único equipamento instalado na rede de comunicação da subestação, a redundância pode ser introduzida em qualquer camada da pilha protocolar baseada no modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI). As diferentes soluções distinguem-se através do endereço IP ou do endereço MAC, que devem ser geridos adequadamente.

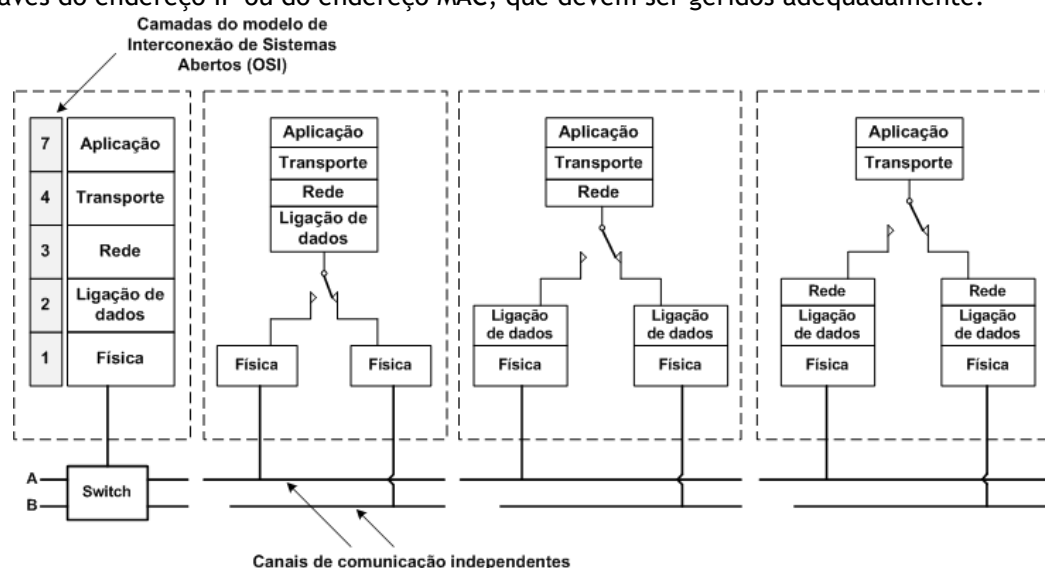


Figura 5.21 - Redundância da rede de comunicação com base nas várias camadas do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI).

Em sistemas que exigem operação contínua, como é o caso das subestações de energia eléctrica, será utilizada redundância funcional. Neste tipo de redundância existe um segundo equipamento capaz de executar as mesmas funções que o equipamento que falhou. Neste sentido, existem dois tipos fundamentais de redundância funcional: o dinâmico e o estático.

5.5.1.1. Redundância dinâmica

O elemento que garante a redundância funcional da rede está normalmente desocupado (em *stand-by*), sendo que só entra em funcionamento quando é necessário, isto é, quando ocorre alguma falha no equipamento principal. A entrada em funcionamento do equipamento redundante é feita através de uma transição lógica que recebe informação proveniente de um bloco de detecção de erros [44].

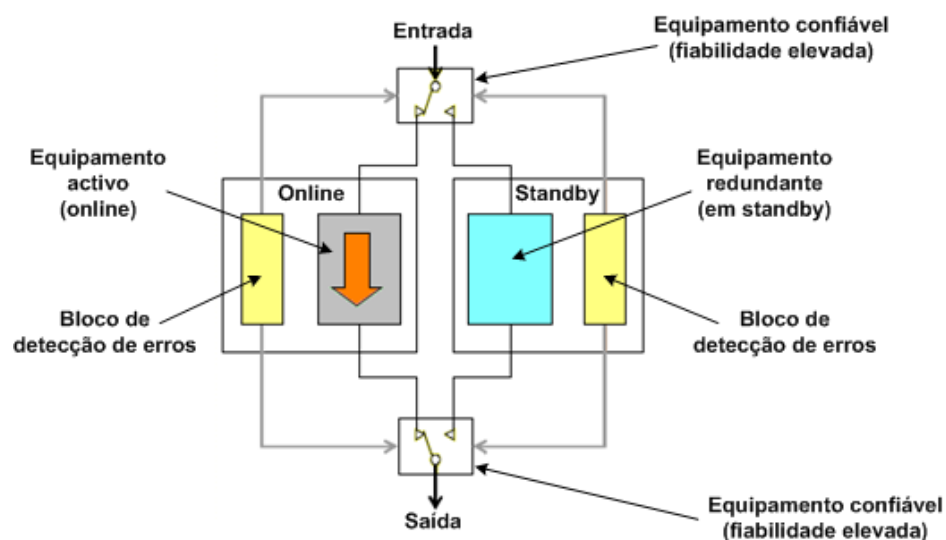


Figura 5.22 - Arquitectura de um sistema com redundância cíclica [44].

5.5.1.2. Redundância estática

O elemento que garante a redundância funcional do sistema executa simultaneamente as mesmas funções que o elemento principal, ao contrário do que acontecia no caso da redundância dinâmica em que só um dos elementos estava activo (on-line). Desta forma, com redundância estática ambos os elementos (principal e redundante) estão on-line simultaneamente. Assim, o sistema escolhe o canal de comunicação confiável, isto é, o que não apresentar erros.

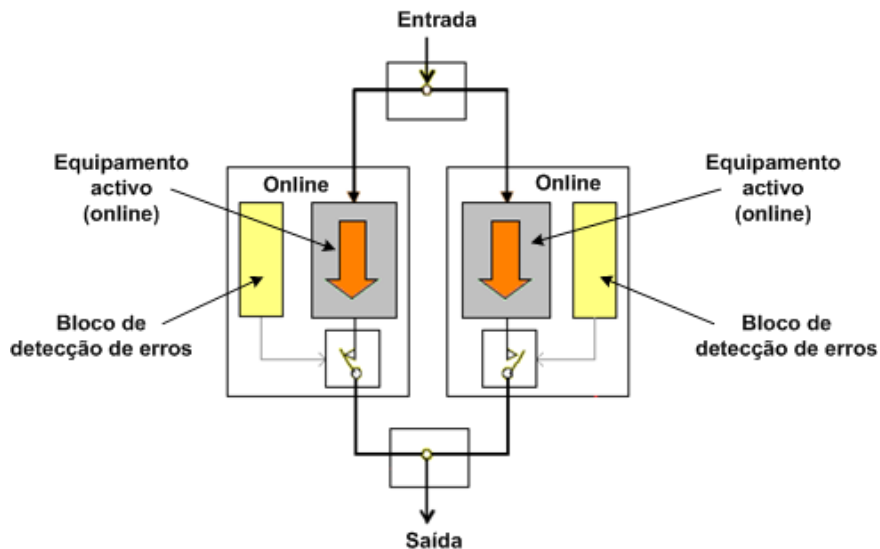


Figura 5.23 - Arquitectura de um sistema com redundância estática [44].

Abordados os conceitos de redundância dinâmica e estática, falta analisar de que forma é que estes métodos podem assegurar a redundância da rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações. O principal objectivo passa por garantir a continuidade de serviço perante a ocorrência de qualquer falha na rede de comunicação. Na Figura 5.24 apresenta-se o exemplo de uma rede de comunicação com redundância na ligação entre switches e na qual ocorre um corte na ligação que estabelecia a comunicação entre dois *switches*.

O corte ocorrido na rede de comunicação da Figura 5.24 faz com que os switches reencaminhem os pacotes de dados através das ligações restantes que não foram afectadas. Esta operação é tipicamente desempenhada de acordo com o protocolo RSTP (*Rapid Spanning Tree Protocol*), definido na norma IEEE802.1D. O protocolo RSTP suporta várias topologias existentes para as redes de comunicação, sendo que o tempo de recuperação da rede pode ser da ordem das centenas de milissegundos [44].

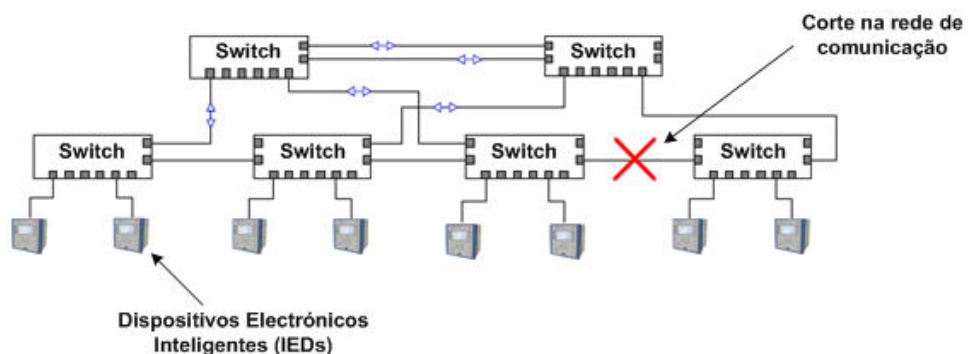


Figura 5.24 - Rede de comunicação com ligações redundantes entre switches [44].

Numa aplicação real, como é o caso da rede de comunicação dos SPCC das subestações, pode ser utilizada uma rede com uma topologia em duplo anel (Figura 5.25), que apresenta maior simplicidade relativamente à apresentada na Figura 5.24. O tipo de redundância funcional desta topologia é o dinâmico. De forma a prevenir a potencial falha num dos

switches, na rede da Figura 5.25 cada IED está ligado a dois *switches*, para além do switch a que é primeiramente ligado. Refira-se que, desta forma, esta topologia assegura um tempo de recuperação da rede inferior à da Figura 5.24.

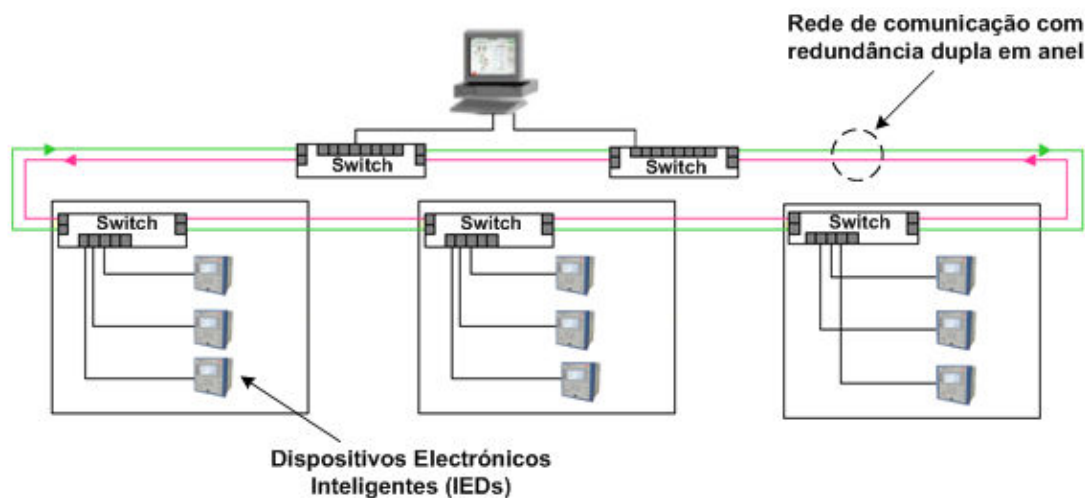


Figura 5.25 - Rede de comunicação com uma topologia em duplo anel [44].

Na Figura 5.26 apresenta-se uma topologia com uma redundância funcional do tipo estática. Para garantir um tempo de recuperação da rede em caso de falha muito rápido é necessário que existam duas redes redundantes a operar em paralelo. Neste caso, os IEDs têm de escolher a rede que está a funcionar correctamente caso a outra falhe. Se ambas as redes estiverem a funcionar sem problemas, os IEDs descartam as tramas de dados provenientes de uma das Redes de Área Local (LAN A ou LAN B). Porém a utilização de uma topologia de rede com redundância estática pode ter custos muito elevados relativos à duplicação de todos os equipamentos da rede de comunicação, pelo que só é utilizada em situações muito específicas [44].

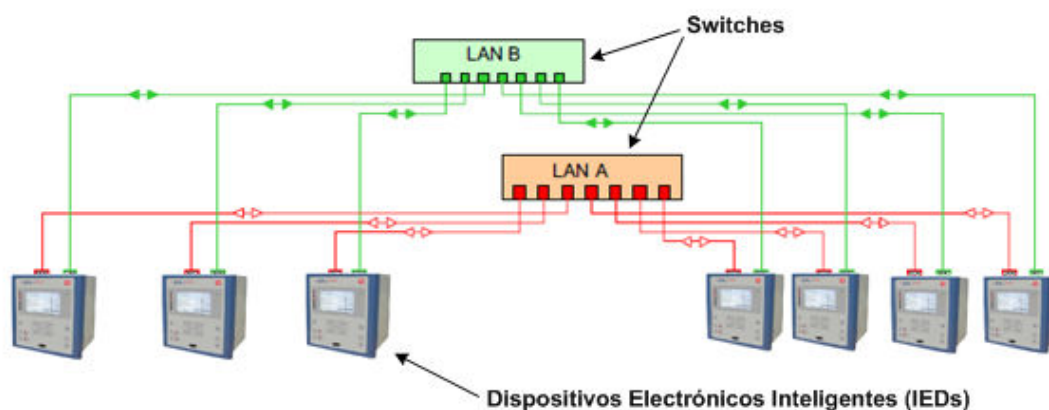


Figura 5.26 - Rede de comunicação com duas Redes de Área Local (LANs) [44].

5.5.2. Algoritmos de árvores de abrangência (*spanning tree protocols*)

O funcionamento dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações é consideravelmente dependente da rede de comunicação de dados que assegura a comunicação entre todos os equipamentos. Assim, existe a necessidade de se implementarem algoritmos que assegurem a continuidade de serviço mesmo perante a ocorrência de falhas na rede de comunicação. Neste sentido, considerando uma falha nos cabos de comunicação como a avaria mais comum, a solução que se propõe passa pela redundância dos cabos. Esta redundância é conseguida através da configuração da rede em anel ou com caminhos paralelos. Desta forma, se um dos caminhos de rede falhar, a comunicação continua a ser realizada a partir dos caminhos paralelos ou em torno da porção do anel que não foi afectada pela avaria. A redundância dos cabos introduz laços (*loops*) na topologia da rede. Para evitar estes *loops* é necessário utilizar uma topologia em árvore que consiste de uma raíz, uma sucessão de segmentos e dos equipamentos terminais [45].

5.5.2.1. Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP)

O *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) começou por ser introduzido na norma IEEE802.1w em 2001, tendo sido posteriormente ratificada na norma IEEE802.1d em 2004. O RSTP é o protocolo de árvores de abrangência (*spanning trees*) mais utilizado em redes Ethernet, sendo que o sucessor do protocolo STP (*Spanning Tree Protocol*). O protocolo STP é definido como o protocolo standard para resolução de loops na rede de comunicação. O STP calcula, configura e mantém uma topologia em árvore na rede de área local (LAN) com tecnologia Ethernet Comutada (Switched Ethernet), evitando a formação de *loops* - Figura 5.27.

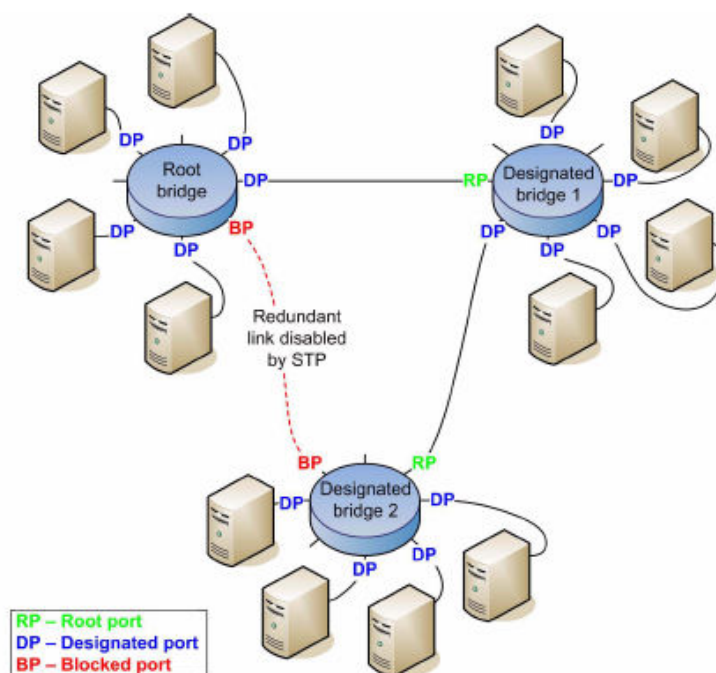


Figura 5.27 - Exemplo de uma rede de área local (LAN) com 3 bridges (switches) [46].

Um switch é declarado como a raiz da árvore e para cada ligação da LAN, um *switch* é responsável pelo encaminhamento do tráfego de informação da raiz para a ligação em questão. Este *switch* toma a designação de “Designated Switch”. Se cada *Designated Switch* tiver duas portas para a mesma ligação apenas uma das portas é utilizada, sendo esta intitulada “Designated Port” para essa mesma ligação. A árvore de abrangência é completamente definida como o conjunto dos *Designated Switches* e das *Designated Ports*.

Na Figura 5.28 aparecem associados a cada porta dos switches representados (Root, A, B e C) quatro designações: Primária (*Root*), Designada (*Designated*), Suplente (*Alternate*) e Reserva (*Backup*).

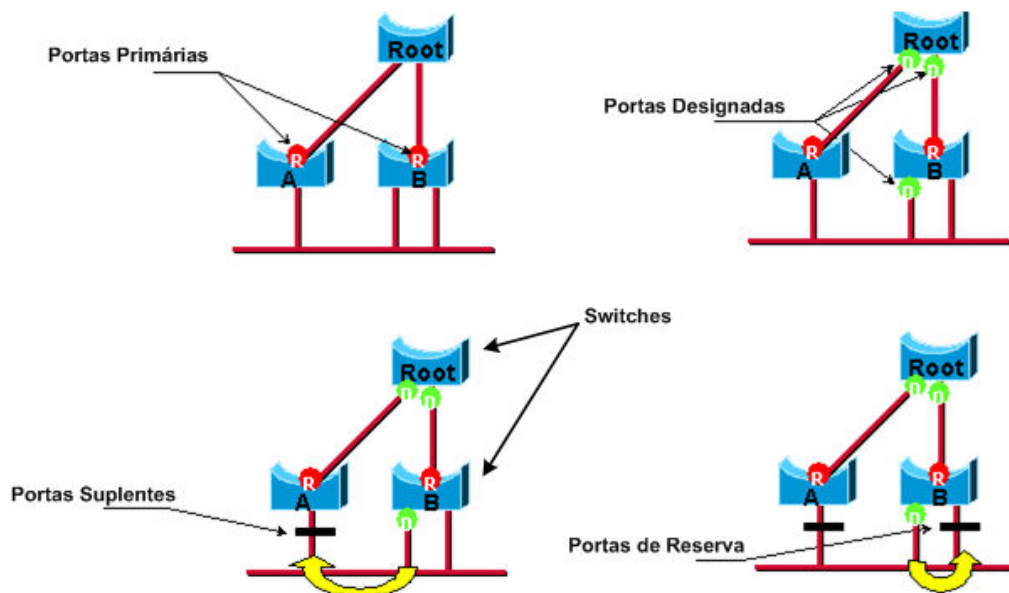


Figura 5.28 - Definições das portas dos switches constituintes de uma árvore de abrangência [47].

A porta primária (*root port*) é a porta que está mais perto da bridge primária (*root bridge*) para os switches que não são primários. Apenas pode existir uma porta primária por cada switch. Cada segmento tem pelo menos uma porta designada (*designated port*) para esse segmento. Numa topologia activa o switch recebe as tramas do segmento que são destinadas à bridge primária. Todos os switch ligados a um segmento disputam entre si o estado *designated* escutando todos os BPDUs e determinam entre si qual a porta designada do segmento. Uma porta suplente (*alternative port*) é uma porta que oferece um caminho alternativo para a bridge primária. A porta suplente acontece num switch não designado do segmento e transita para designado caso o switch designado falhe. Uma porta de reserva (*backup port*) é uma porta adicional num switch que é *designated* de um segmento e corresponde a uma ligação redundante para esse segmento. A porta *backup port* tem um identificador *port ID* maior que a porta *designated port*. Todas as outras portas estão bloqueadas, não fazendo o encaminhamento das tramas de dados [47].

Durante o funcionamento da rede de comunicação, os switches trocam informação entre si através de mensagens chamadas BPDUs (*Bridge Protocol Data Units*). A informação enviada através das mensagens BPDUs permite detectar novas bridges na rede e recalcular a árvore de abrangência no caso da topologia da rede se alterar [48]. Refira-se que a topologia da rede de comunicação se altera quando ocorre uma avaria no cabo ou switch que interliga dois equipamentos - Figura 5.24.

Um dos principais objectivos do protocolo RSTP era superar o longo tempo de convergência do protocolo STP que era cerca de cinquenta segundos. Com o protocolo STP cada ponte (bridge) mantém apenas um único caminho da árvore de abrangência, sendo que não existem caminhos alternativos (*backup paths*). Em contraste, com o protocolo RSTP cada bridge processa caminhos alternativos da árvore de abrangência utilizando ligações redundantes que não estão incluídos na topologia de reencaminhamento activa. Estes caminhos alternativos são usados para uma rápida recuperação da rede quando o caminho primário da árvore de abrangência falha. Para eliminar o longo atraso gerado pelo protocolo STP para garantir a convergência do estado das bridges da árvore de abrangência, as bridges configuradas com o protocolo RSTP utilizam um mecanismo de negociação designado “sync” que permite sincronizar explicitamente o estado entre todas as bridges da rede [49].

5.5.2.2. Multiple Spanning Tree Protocol (MSTP)

A exigência de garantir a fiabilidade e disponibilidade das redes Ethernet tem vindo a aumentar principalmente por dois motivos. O primeiro está relacionado com a velocidade das redes Ethernet, que já atingem a ordem dos Gigabit por segundo. Com velocidades desta ordem, mesmo um tempo de indisponibilidade da rede muito pequeno pode levar à perda de uma grande quantidade de dados, sendo que o funcionamento do sistema pode ficar em risco. O segundo motivo está relacionado com o tipo de aplicações em que é utilizada a Ethernet. A Ethernet é um protocolo cada vez mais utilizado em aplicações com requisitos temporais estritos. Consequentemente, as redes de comunicação que suportam este tipo de aplicações têm de estar implementadas com mecanismos de recuperação rápida aquando da ocorrência de falhas. Para além disso, existem algumas limitações relativas aos protocolos STP e RSTP. A principal desvantagem dos protocolos STP e RSTP é o facto de apenas usarem uma árvore de abrangência (*spanning tree*). Em redes de comunicação com topologia redundante, a utilização de apenas uma árvore de abrangência impede a utilização de ligações redundantes. Para além disso as ligações que ficam próximas da raiz ficam facilmente sobrecarregadas. Neste sentido, surge a motivação para a utilização do protocolo MSTP [50].

O protocolo MSTP foi criado para suportar o balanceamento da carga de informação dentro de uma rede de comunicação com múltiplas redes de área local virtuais (VLANs). O MSTP é uma versão melhorada do protocolo RSTP. Com o MSTP, a rede de comunicação é dividida em regiões. Em cada região podem ser apresentadas diversas instâncias das árvores de abrangência múltiplas (MSTIs). As MSTIs podem ter diferentes raízes e podem seguir diferentes caminhos na rede de comunicação. As árvores pretendidas podem ser conseguidas através da configuração das prioridades das bridges, das prioridades das portas e dos custos das portas para diferentes MSTIs. Para além disso, o MSTP também providencia um mecanismo de rápida recuperação da rede [50].

5.6. Segurança da rede de comunicação

O nível de segurança da rede de comunicação é um dos pontos críticos do Sistema de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações, englobado no Sistema de Automação

da Subestação (SAS). Os equipamentos do SAS com funções de remoto controlo são um dos alvos de ataques provenientes de pessoal não autorizado (*hackers*). A avaliação da vulnerabilidade da rede de comunicação do SAS ainda não é um problema resolvido, pelo que a área da segurança de redes de comunicação continua a ser uma área de estudo e desenvolvimento [51]. Como requisitos de segurança de uma rede de comunicação surgem conceitos como a “confidencialidade”, “integridade”, “disponibilidade” e “Não-repudição”. A confidencialidade diz respeito à prevenção de acessos não autorizados aos dados do processo. A integridade está relacionada com a prevenção contra roubo ou modificação não autorizada dos dados. Por sua vez, a disponibilidade refere-se à prevenção contra a não rejeição do serviço e garantia de acesso autorizado aos dados. A não-repudição é relativa à prevenção contra a negação de uma acção que já foi tomada ou reivindicação de uma acção que não ocorreu [52]. Neste sentido, existem diversas tecnologias desenvolvidas especificamente de forma a aumentar os índices de segurança de uma rede de comunicação, através da encriptação dos dados e bloqueio de tentativas de acesso às aplicações de gestão da rede. Entre as tecnologias mais comuns surgem os antivírus, as firewall e as redes privadas virtuais (VPNs).

Na indústria de energia, um dos principais requisitos está na implementação de equipamento capaz de manter o sistema eléctrico de energia como um sistema confiável. Até bem pouco tempo atrás, as comunicações e o fluxo de informação eram aspectos aos quais se davam pouca importância. Contudo, com o aumento das infra-estruturas de informação de suporte à monitorização e controlo do sistema de energia, tornou-se crítico garantir a fiabilidade dos sistemas de comunicação. Dentro dos sistemas de comunicação dos sistemas de energia, os protocolos utilizados assumem uma crucial importância uma vez que são responsáveis por receber informação proveniente dos equipamentos e enviar, como resposta, comandos de controlo. Porém, para além das funções chave, estes protocolos de comunicação raramente incorporam quaisquer medidas de segurança, nas quais se incluem segurança contra erros inadvertidos, funcionamento erróneo dos equipamentos do sistema de energia, falha dos equipamentos de comunicação ou sabotagem deliberada. As primeiras medidas de segurança implementadas passavam por só autorizar operadores especializados a controlar os equipamentos primários da subestação a partir de um centro de despacho altamente protegido. Todavia, estas medidas eram insuficientes pelo que foi necessário proceder ao desenvolvimento de tecnologias e protocolos capazes de manter a segurança do sistema de energia e, nomeadamente, das subestações. Atendendo ao facto da indústria de energia depender cada vez mais das tecnologias de informação, leva à consideração de duas infra-estruturas que devem ser geridas: a infra-estrutura do sistema de energia e a infra-estrutura da informação [52].

5.6.1. Sistemas de comunicação: Requisitos de segurança e ameaças

No início desta secção foram apresentadas quatro conceitos básicos relativos a ameaças passíveis de pôr em risco a segurança do sistema de comunicação. Estes conceitos são a confidencialidade (*confidentiality*), integridade (*integrity*), disponibilidade (*availability*) e não-repudição (*non-repudiation*). As ameaças podem resultar de diferentes tipos de ataques. Na Figura 5.29 apresentam-se alguns tipos de ataques que podem constituir uma ameaça para o sistema de comunicação e, consequentemente, para o sistema de energia. Da

mesma forma que existem vários tipos de ataques, também terão de existir vários métodos de segurança que evitem esses mesmos ataques e protejam o sistema de comunicação - Figura 5.30.

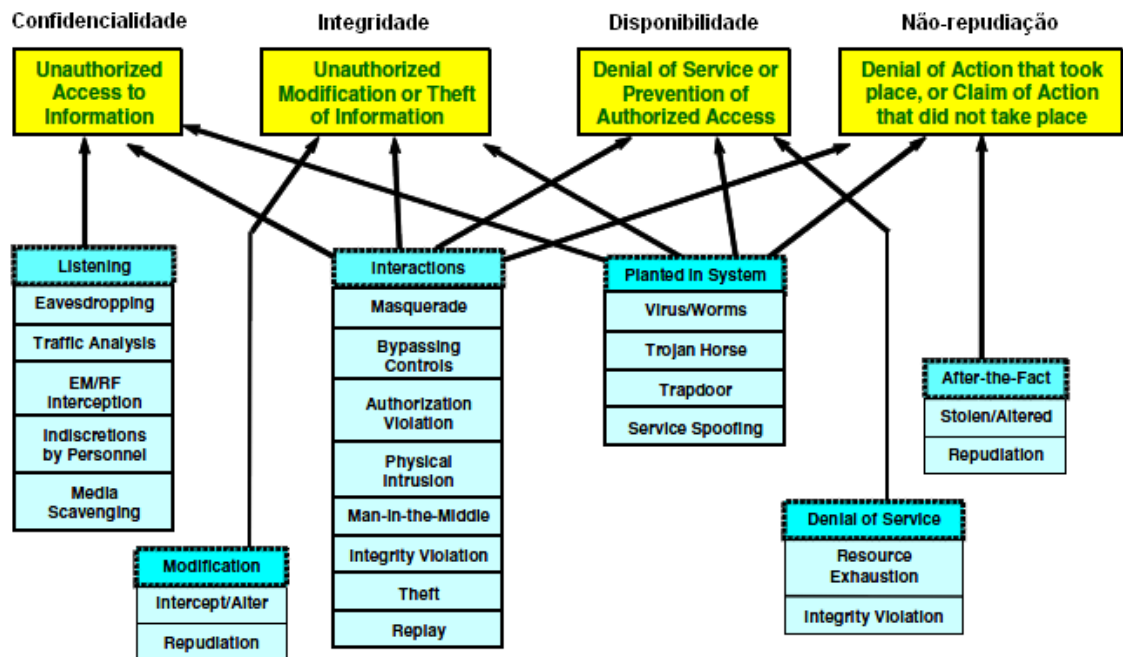


Figura 5.29 - Ameaças de segurança ao sistema de comunicação da subestação [52].

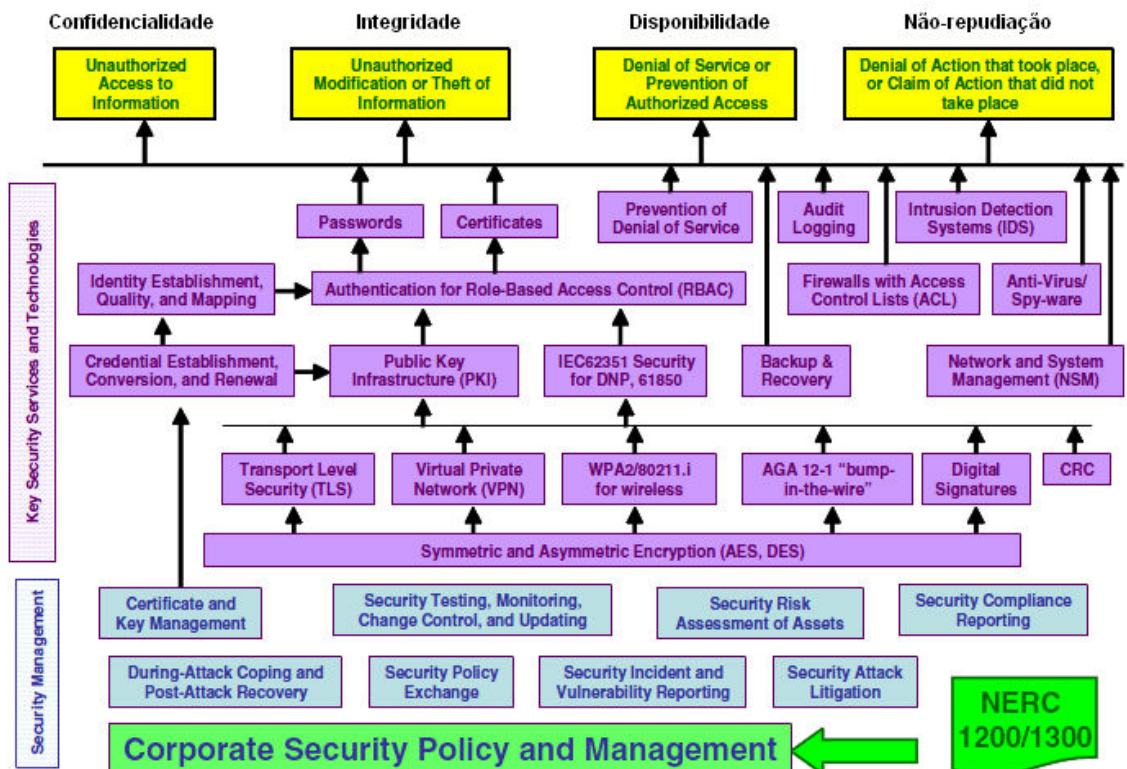


Figura 5.30 - Medidas contra as ameaças de segurança ao sistema de comunicação da subestação [52].

Em 1997, o Conselho Técnico 57 (TC57) da Comissão Electrotécnica Internacional (CEI) reconheceu que era necessário incluir funcionalidades de segurança nos seus protocolos. Neste sentido, foi criado um grupo de trabalho para estudar as questões de segurança e desenvolver soluções específicas para os sistemas de energia. O resultado deste trabalho de investigação e desenvolvimento culminou com a publicação da norma CEI62351. A norma CEI62351 está dividida em sete partes. Em cada uma das partes da norma CEI62351 é especificada a segurança das comunicações e dados para os protocolos utilizados, principalmente, pelas normas CEI61850 e CEI60870-5. Relembre-se que a norma CEI61850 é utilizada no sistema de comunicação da subestação, enquanto que a norma CEI60870-5 é bastante utilizada na comunicação entre o sistema de supervisão, controlo e aquisição de dados (SCADA) do centro de despacho e a unidade terminal remota (RTU) da subestação [52].

As medidas de segurança para a rede de comunicação da subestação devem ser consideradas desde a fase de projecto da instalação, atendendo à sua importância para o correcto funcionamento dos SPCC. A segurança da rede inclui a encriptação dos dados, autenticação, controlo de acesso, prevenção contra a rejeição de serviços, monitorização da infra-estrutura de informação e políticas de segurança, que servem de suplemento e reforço às medidas de segurança [52].

5.6.2. Redes Privadas Virtuais (VPNs)

As Redes Privadas Virtuais (VPNs) são redes de comunicação privadas e seguras implementadas sobre redes de comunicação públicas, como é o caso da Internet. A utilização desta tecnologia fornece a confidencialidade, autenticação e integridade dos dados, garantindo desta forma a privacidade das comunicações entre o centro de despacho e as subestações de distribuição. Uma rede pública é uma rede que pode ser acedida e controlada por várias pessoas e organizações. Uma rede privada é uma rede que pertence a uma empresa ou organização específica e está apenas acessível a membros autorizados dessa mesma empresa ou organização. Por último, as redes virtuais são redes que utilizam ligações lógicas sobre as ligações físicas, sendo que as aplicações encaminham o tráfego de forma segura sobre a rede pública com a mesma segurança que numa rede privada, sem conhecimento do estado da ligação física. A privacidade das VPNs é assegurada através do uso de mecanismos e serviços de segurança, baseados em protocolos de *tunneling* [36]. As tecnologias chave que garantem as componentes de segurança das VPNs são:

- Controlo de acesso para garantir a segurança das ligações de rede;
- Encriptação (confidencialidade) para proteger a privacidade dos dados;
- Autenticação para verificar a identificação dos utilizadores e a integridade dos dados;

5.6.2.1. Métodos de instalação de Redes Privadas Virtuais

A ligação de uma rede privada à Internet exige a existência de um gateway VPN. O gateway pode ser um dispositivo físico dedicado ou um componente de software integrado em

dispositivos já existentes, como é o caso das firewall e routers. No caso do acesso remoto, os utilizadores tipicamente correm a aplicação de software de VPN nos seus computadores. A utilização de gateways VPN dedicados para além de serem especificamente para suportarem protocolos de tunneling, encriptação e autenticação de utilizadores, são mais fáceis de instalar relativamente à modificação das firewalls e routers para que suportem o acesso por VPN. Para além disso, os gateways dedicados são mais eficientes face às soluções baseadas em software [36].

Principais vantagens das Redes Privadas Virtuais:

- Utilizar a infra-estrutura existente: a Internet elimina a necessidade de utilizar redes de longa distância (WANs) baseadas em linhas de comunicação alugadas.
- Conexão simples: é muito mais simples e barato ligar duas instalações utilizando a Internet que instalar linhas de comunicação alugadas e dedicadas.
- Disponibilidade: por norma, a disponibilidade da Internet é muito maior que a das linhas de comunicação dedicadas. Mesmo que ocorra uma falha de ligação é imediatamente disponibilizada outra ligação para garantir o transporte do tráfego de informação.
- Manutenção: o custo, tempo e recursos necessários para manter e administrar uma VPN são maiores quando se utilizam linhas de comunicação alugadas relativamente à Internet

Existem alguns protocolos para a criação de VPNs sobre a Internet. Aqui serão analisadas as principais vantagens do protocolo de segurança IP (IPSec), uma vez que este protocolo é uma extensão do protocolo de Internet (IP). O protocolo IPSec resultou dos esforços que visavam criar pacotes IP seguros, quando o IPv6 estava na sua fase de desenvolvimento, sendo que actualmente pode funcionar também com o IPv4. O IPSec é considerado a melhor solução para VPNs que utilizam comunicações baseadas no protocolo IP, uma vez que providencia fortes medidas de segurança a nível da encriptação, autenticação e gestão das chaves de acesso [36].

5.7. Sumário

Com a evolução das tecnologias de comunicação, a Ethernet e o TCP/IP tornaram-se em protocolos de comunicação bastante utilizados em aplicações industriais. Para além disso, com a criação da norma CEI61850, estes começaram a ser os protocolos utilizados nos sistemas de comunicação utilizados nos sistemas de comunicação das subestações de energia eléctrica. Quando surgiu a tecnologia Ethernet, os equipamentos da rede de comunicação eram ligados a um cabo de comunicação comum, sendo que a velocidade máxima da rede não ultrapassava os 10 Megabit por segundo (Mbps). Com a tecnologia Ethernet Rápida (*Fast Ethernet*) assistiu-se a uma mudança considerável na forma como eram arquitectadas as redes

de comunicação. Caiu em desuso a utilização de um canal de comunicação único e comum a todos os equipamentos da rede, passando-se a utilizar *switches*. Os *switches* permitiam que as ligações dos equipamentos à rede de comunicação fossem feitas através de ligações individuais e independentes. Desta forma, a introdução ou remoção de equipamentos na rede de comunicação tornou-se mais simples e menos morosa. A utilização dos switches também trouxe outras vantagens como o encaminhamento dos dados apenas para os equipamentos a que se destinam e restrição dos domínios de colisão. A Ethernet Rápida é actualmente a tecnologia utilizada na rede de comunicação de suporte aos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações, garantindo uma velocidade de transferência dos dados até 100 Mbps. Actualmente, já decorrem alguns trabalhos de investigação relativos à utilização de Ethernet Gigabit nas subestações. Refira-se que esta tecnologia permite uma velocidade de comunicação até 1 Gigabit por segundo (Gbps), sendo que é expectável que esta velocidade atinja os 40 e 100 Gbps num futuro próximo.

A utilização do Protocolo de Internet (IP) começa também a ter cada vez maior aplicação e aceitação como um protocolo de referência no sistema de comunicação das subestações. Actualmente, este começa a ser o protocolo utilizado para comunicação com o centro de controlo remoto da subestação. Para além disso, o IP também pode ser usado para outras aplicações como voz e vídeo. A título de exemplo, o sistema de videovigilância da subestação pode ser suportado por este protocolo.

A utilização de Redes de Área Local Virtuais (VLANs) permite que sejam criadas sub-redes virtuais de equipamentos, isto é, as VLANs permitem agrupar os equipamentos em grupos independentemente da forma como estão ligados fisicamente. A principal finalidade passa por distribuir o fluxo de informação total da rede de comunicação por pequenos grupos de equipamentos, optimizando-se assim a troca de dados entre os mesmos. Outro aspecto importante relativamente ao sistema de comunicação dos SPCC é o da fiabilidade. É fundamental garantir que o normal funcionamento da rede de comunicação não é posto em risco perante a ocorrência de uma falha, como pode ser o caso de um corte físico no cabo de comunicação. Neste sentido, utilizam-se protocolos de árvores de abrangência como o STP, RSTP e mais recentemente o MSTP. Perante a ocorrência de uma falha na rede de comunicação, a utilização destes protocolos permite que os equipamentos troquem mensagens entre si de forma a reconfigurar a rede e garantir o restabelecimento entre todos os equipamentos.

Por último, a segurança da rede de comunicação é outro dos aspectos que tem de ser levado em conta durante a fase de implementação do sistema de comunicação da subestação. É crucial garantir a protecção contra o acesso à rede e aos dados por parte de entidades não autorizadas. Desta forma, utilizam-se tecnologias como as de encriptação dos dados e autenticação de utilizadores. As Redes Privadas Virtuais (VPNs) asseguram a segurança dos dados em redes não seguras (Internet), podendo ser utilizadas para estabelecer ligações seguras entre a subestação e o centro de controlo remoto.

Capítulo 6

Sistemas de Protecção, Comando e Controlo: Estudo e optimização das soluções actuais do sistema de comunicação

Neste capítulo será feito um estudo centrado nas soluções e tecnologias actualmente aplicadas na rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição. O objectivo é perceber, numa fase inicial, de que forma é que o sistema de comunicação está organizado do ponto de vista dos equipamentos que o constituem e dos constrangimentos da instalação, nomeadamente a nível da distribuição física dos equipamentos. Posteriormente, definir-se-ão quais os aspectos críticos inerentes à rede de comunicação, quer a nível funcional quer a nível da topologia física. Por último, será feito um estudo de mercado relativo às soluções comerciais de equipamentos, desenvolvidos por diferentes fabricantes, para a rede de comunicação dos SPCC das subestações de distribuição. Dentro dos fabricantes de equipamentos para a rede de comunicação, irão ser analisadas as soluções propostas pela Ruggedcom, Moxa e Cisco.

6.1. Rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo

A rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição assegura a intercomunicação entre os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs), a Unidade Central de Processamento (UCP) e o Posto de Comando Local (PCL) do edifício de comando. A comunicação entre estes equipamentos é intermediada por *switches* Ethernet. O número de IEDs instalados no edifício de comando varia de subestação de subestação porque depende essencialmente dos equipamentos primários existentes no parque exterior, principalmente do número de linhas de chegada de Alta Tensão (AT) e de transformadores de potência. Assim, para o estudo e análise das arquitecturas das redes de comunicação actuais considerar-se-á uma simplificação do esquema geral unifilar de uma

subestação de distribuição tipo, apresentado em [30]. Com base nesse esquema unifilar apresentar-se-á a respectiva arquitectura da rede de comunicação.

O esquema unifilar simplificado considerado é constituído por dois painéis de linha de chegada AT, um painel de Potencial (tensão) de Barras (PB) e Interbarras (IB) AT, dois painéis de transformador de potência, dois painéis do transformador de serviços auxiliares (TSA), regime de neutro (RN) e potencial de barras MT (Média Tensão) e 8 linhas de saída MT. Na Figura 6.1 apresenta-se a arquitectura física da rede de comunicação dos SPCC da subestação correspondente ao esquema unifilar considerado e descrito acima. No Armário de Comando e Controlo (ACC) da Unidade Central de Processamento (UCP) existe um *switch* ao qual estão ligados a Unidade Central (UC), o Posto de Comando Local (PCL), o Modem e o GPS (*Global Positioning System*) através de cabo de par entrelaçado sem blindagem (UTP). O IED instalado no ACC dos Serviços Auxiliares e de Corrente Contínua também é ligado ao *switch* do ACC da UCP, sendo o cabo utilizado a fibra óptica com dois canais independentes para transmissão e recepção dos dados. No Armário de Reagrupamento de Cabos de Baixa Tensão (ARCBT) do Quadro Metálico de Média Tensão (QMMT) 1 são instalados dois *switches* aos quais são ligados os IEDs de chegada do transformador de potência (Cheg. TP), transformador de serviços auxiliares e potencial (de tensão) de barras MT (TSA/PB), bateria de condensadores (B.C. MT) e linhas de saída MT. No ARCBT do QMMT2 também são instalados dois *switches*, sendo a única diferença relativamente ao ARCBT do QMMT1 a existência do IED do painel de interbarras MT (IB MT).

Do lado dos ACC existem mais cinco *switches*. Um instalado em cada um dos armários de chegada de linha AT, ao qual são ligados dois IEDs. Nos ACCs dos transformadores de potência um e dois (ACC do TP1 e TP2) também é instalado um *switch*. Ao *switch* de cada ACC do transformador de potência são instalados três IEDs: um responsável pela regulação de tensão (TP AT (RT)), um pela protecção diferencial (TP AT (PD)) e outro pelas restantes funções de protecção e automatismos (TP AT). Por último, no ACC de interbarras e potencial (de tensão) de barras AT um e dois (ACC de IB e PB1 e PB2) também existe um *switch* ao qual são ligados dois IEDs, sendo que cada um está associado a um dos semibarramentos AT.

A arquitectura da rede de comunicação apresentada na Figura 6.1 corresponde à solução que é actualmente utilizada nos SPCC das subestações de distribuição. Esta arquitectura é baseada na utilização de *switches* que são instalados em vários armários do edifício de comando. Por sua vez, os *switches* recebem ligações provenientes de cada IED. No que toca à topologia da rede de comunicação, a ligação dos *switches* entre si segue uma topologia em anel, enquanto que a ligação entre os IEDs e os *switches* é feita segundo uma topologia em estrela. Refira-se que a arquitectura da rede de comunicação que era utilizada anteriormente à actual não utilizava *switches*, sendo que os IEDs eram ligados entre si segundo uma topologia em anel. A desvantagem é que no caso de ocorrer alguma falha num IED e este sair de funcionamento, o correcto funcionamento da rede de comunicação pode ser posto em causa, uma vez que o anel é interrompido. Para além deste caso em que é considerada a avaria de um dos IEDs, também se poderá considerar um outro em que se pretende substituir ou adicionar um novo IED à rede de comunicação. Sem a utilização de *switches* este processo pode ser mais moroso. Desta forma, a vantagem de utilização de *switches* na rede de comunicação dos SPCC ganha ênfase, no sentido em que garante que a instalação ou substituição de IEDs exija o menor esforço possível em termos de tempo de instalação e configuração.

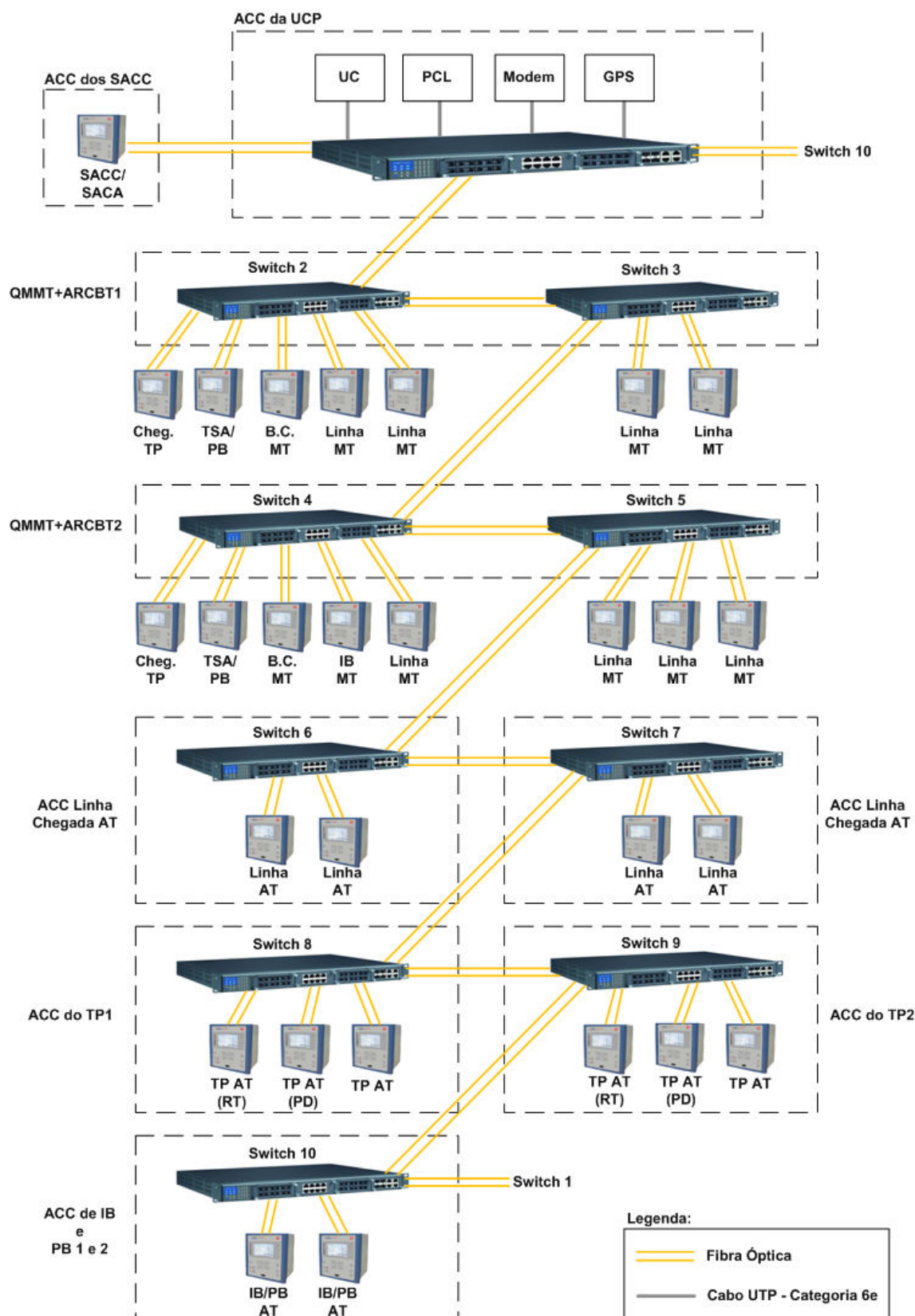


Figura 6.1 - Arquitectura actual das redes de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição.

6.1.1. Rede de comunicação: optimização da arquitectura física actual

A optimização proposta para a rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) terá como base a arquitectura apresentada na Figura 6.1. A nível físico as alterações a realizar sobre a arquitectura actual poderão passar pela diminuição do número de *switches* utilizado e pela utilização de uma rede dupla em anel de fibra óptica. O motivo pelo qual se referiu a diminuição do número de switches como um possível melhoramento passa por aproveitar o número de portas de comunicação disponibilizadas por estes equipamentos. Por exemplo, em cada Armário de Comando e Controlo (ACC) das linhas de chegada de Alta Tensão são instalados dois Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs), sendo que em cada um destes ACCs se instala um *switch*. Caso se utilize um switch com oito portas de comunicação, apenas serão utilizadas duas destas portas (uma por cada IED), pelo que ficarão seis portas livres. Neste sentido, em vez de se utilizar um switch por ACC de chegada de linha AT, podia-se optar por ligar os IEDs de cada ACCs de chegada de linha AT a um switch comum. Esta redução do número de switches utilizados é importante porque, para além de passar por uma melhor rentabilização do número de portas de comunicação disponibilizado por cada um destes equipamentos, assegura outras vantagens:

- Redução do custo total da rede de comunicação;
- Menor impacto em futuras remodelações dos equipamentos da rede de comunicação;
- Diminuição do atraso, imposto pelos switches, na comunicação dos dados entre IEDs.

Os *switches* Ethernet utilizados actualmente nas subestações utilizam a tecnologia *Fast Ethernet*, que garante velocidades de comunicação até 100 Mbps. No entanto, já decorrem trabalhos de investigação no sentido de se introduzir a tecnologia Gigabit Ethernet no sistema de comunicação das subestações, sendo que os *switches* utilizados ainda não suportam esta tecnologia. Assim, no caso de se avançar para a introdução da Gigabit Ethernet nas subestações será necessário proceder a uma remodelação dos *switches* existentes. Consequentemente, quanto maior for o número de *switches* maior será o custo de investimento relativo à instalação, remodelação e configuração do sistema de comunicação suportado na tecnologia Gigabit Ethernet. Na Figura 6.2 apresenta-se uma arquitectura da rede de comunicação baseada na utilização de *switches*.

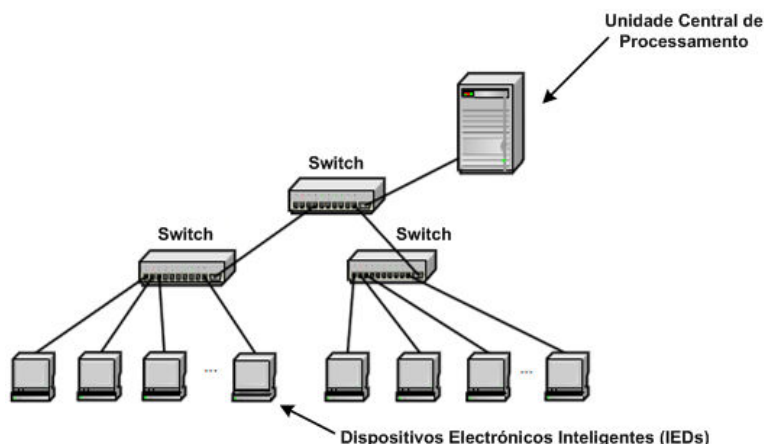


Figura 6.2 - Arquitectura da rede de comunicação baseada em switches [41].

Os *switches* introduzem um atraso na rede de comunicação provocado pelo processamento das tramas Ethernet. Assim, quantos mais switches existirem entre a Unidade Central de Processamento da subestação e os IEDs, maior poderá ser o atraso introduzido na entrega dos dados. Desta forma, o número de *switches* utilizados na rede de comunicação poderá ter impacto do ponto de vista dos requisitos temporais relativos à entrega das mensagens.

A proposta de utilização de uma rede de comunicação em fibra óptica com duplo anel visa garantir a diminuição do tempo de recuperação do sistema perante a ocorrência de um defeito nos canais de comunicação. Refira-se que os fabricantes de equipamentos de comunicação, como a Moxa e a Ruggedcom, têm protocolos proprietários para assegurar a redundância da rede de comunicação. Neste sentido, a solução para assegurar a redundância da rede de comunicação poderá não passar obrigatoriamente pela utilização de uma rede dupla em anel de fibra óptica.

6.2. Rede de comunicação: soluções comerciais

Os fabricantes de equipamentos para redes de comunicação começaram a desenvolver soluções integradas de acordo com os requisitos e funcionalidades do sistema de automação e protecção das subestações. O estudo das soluções dos vários fabricantes permite compreender as principais valências das suas arquitecturas com base nalgumas especificações técnicas, para além de quais as novas tecnologias que começam a aplicar nos seus sistemas. Entre os fabricantes de equipamentos para redes de comunicação destacam-se a Moxa e a RuggedCom. Ambos os fabricantes têm soluções desenvolvidas especificamente para os sistemas de automação das subestações. Os próprios equipamentos são desenvolvidos com base nas especificações das normas CEI61850 e na IEEE1613. A norma CEI61850 define uma plataforma de comunicações e os requisitos para a estrutura da rede, componentes, modelos de dados, interoperabilidade entre equipamentos e engenharia do processo. Por sua vez, a norma IEEE1613 define os requisitos ambientais e de teste para os equipamentos da rede de comunicação em subestações de energia eléctrica. A utilização da norma CEI61850 visa garantir uma comunicação sem erros entre os equipamentos instalados na rede de comunicação das subestações, enquanto que a norma IEEE1613 tem como principal objectivo garantir a imunidade dos equipamentos às interferências electromagnéticas [53].

O nível de segurança e a fiabilidade da rede de comunicação da subestação é um dos pontos críticos do Sistema de Protecção, Comando e Controlo (SPCC). Desta forma, analisar de que forma é que os fabricantes de equipamentos da rede de comunicação estão sensibilizados para esta questão é fundamental. Atendendo ao facto que ainda existem equipamentos mais antigos nas subestações, principalmente os relés de protecção, a possibilidade de os integrar nos sistemas de comunicação modernos é um requisito. Assim, também será feita uma análise acerca da possibilidade das soluções propostas pelos vários fabricantes de equipamentos para a rede de comunicação permitirem a integração entre equipamentos modernos e equipamentos mais antigos.

6.2.1. Rede de comunicação: solução da Moxa

A Moxa é um dos fabricantes de equipamentos para redes de comunicação que actualmente apresenta uma solução comercial desenvolvida especificamente para as subestações de energia eléctrica. Como características principais dos seus equipamentos e soluções, a Moxa destaca a certificação dos seus *switches* Ethernet pelas normas CEI61850 e IEEE1613, existência de uma rede em anel redundante com um tempo de recuperação da rede em caso de falha de vinte milissegundos para um total de duzentos e cinquenta *switches* instalados, funcionamento dentro de uma gama de temperaturas compreendida entre menos -40 e +85 graus Célsius e alimentação redundante dos equipamentos a 24 ou 48 Volt, no caso da alimentação por corrente contínua e 110 ou 220 Volt no caso de alimentação por corrente contínua ou alternada [53]. Para além destas características, destaca-se ainda o facto da Moxa ter *switches* com funcionalidades específicas da camada três do modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI), designados *switches* de camada três (Figura 6.4) que também já possuem algumas portas para utilização de Ethernet Gigabit através da rede em fibra óptica. Refira-se que os *switches* standard (*switches* de camada 2 - Figura 6.3) só contemplam as especificações e funcionalidades das camadas um e dois do modelo OSI. A utilização de *switches* de camada três permite utilização de protocolos de encaminhamento dos dados, através do endereço do Protocolo Internet (IP), para as diferentes Redes de Área Locais (LANs) e Redes de Área Locais Virtuais (VLANs).

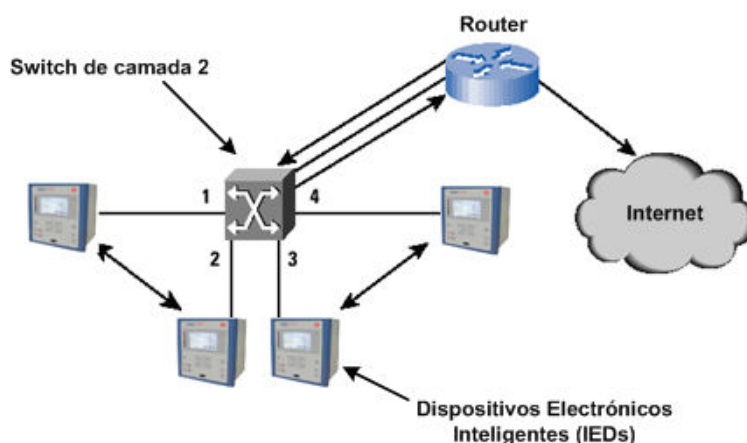


Figura 6.3 - Switch de camada 2 [54].

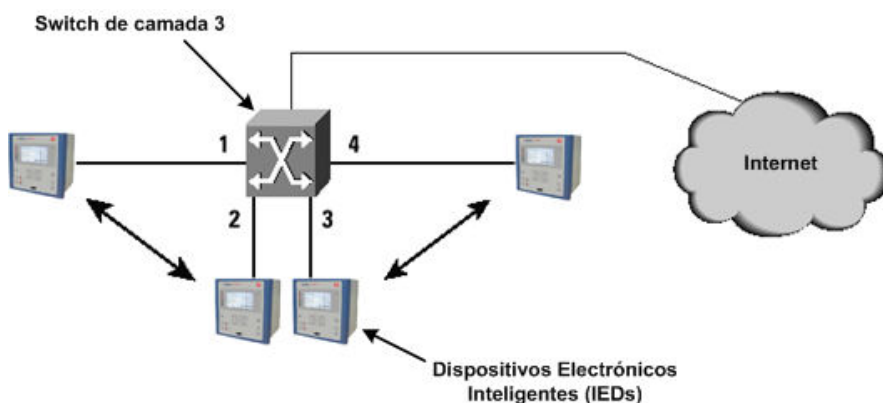


Figura 6.4 - Switch de camada 3 [54].

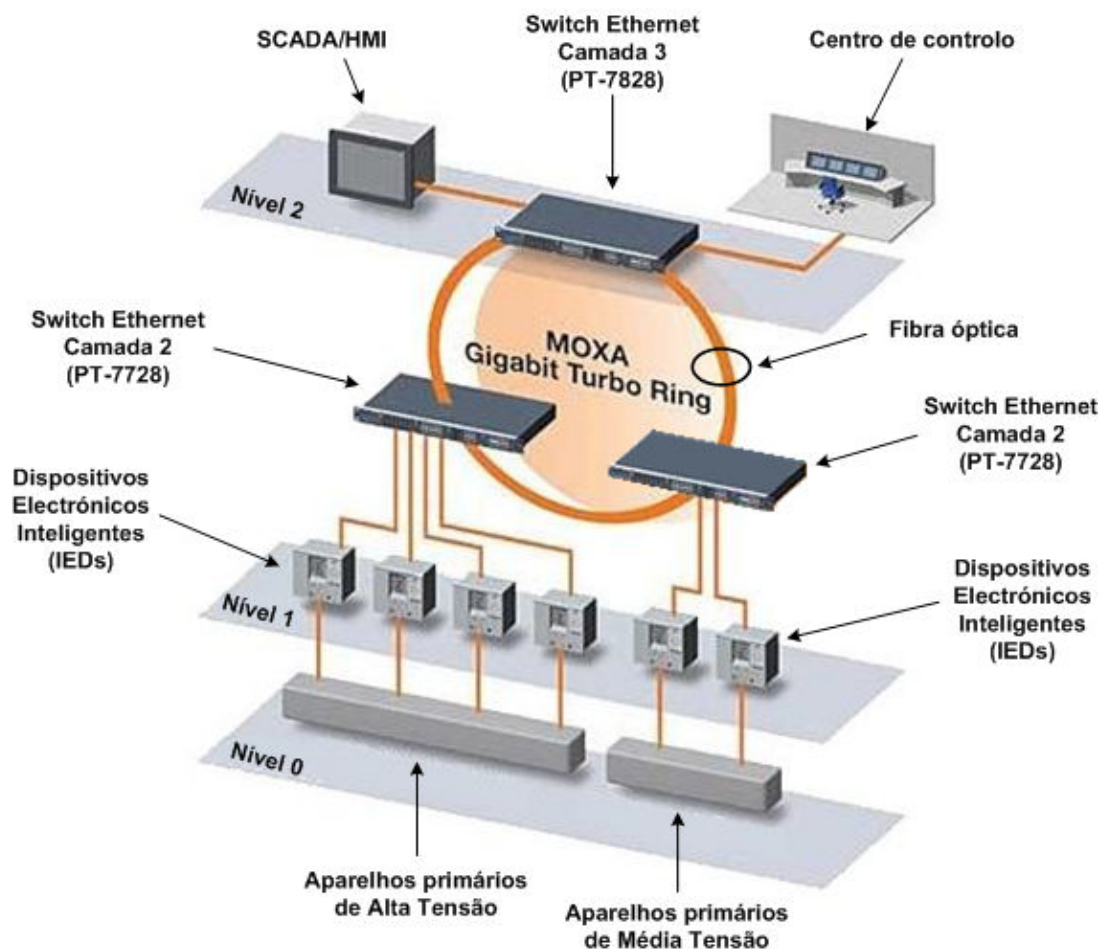


Figura 6.5 - Arquitectura para a rede de comunicação dos sistemas de protecção, comando e controlo proposta pelo fabricante Moxa [53].

A Figura 6.5 apresenta a arquitectura proposta pela Moxa para a rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição. Esta arquitectura está dividida em três níveis que estão de acordo com os definidos no projecto tipo das subestações de distribuição, descrito em [13]. No nível zero são dispostos os equipamentos primários da subestação, constituintes do sistema eléctrico de energia. A comunicação entre o nível zero e o nível um, onde são dispostos os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs), é feita por intermédio de fibra óptica, ao contrário do que acontece actualmente nas subestações de distribuição portuguesas, em que são utilizadas ligações eléctricas fio a fio entre os equipamentos primários e os IEDs. Por sua vez, o nível dois é constituído por um *switch* Ethernet de camada três (Modelo PT-7828) e pela unidade referente à Interface Homem-Máquina (HMI) e sistema de supervisão, controlo e aquisição de dados (SCADA). Na Tabela 6.1 apresenta-se os modelos de switches da Moxa e algumas características, tais como número de portas de comunicação, protocolos de redundância e tecnologias Ethernet suportadas.

Tabela 6.1 - Características gerais dos switches Ethernet da Moxa [34].

Modelo	Portas Gigabit Ethernet (1 Gbps)	Portas Fast Ethernet (100 bps)	Turbo Ring	STP/RSTP	VLAN
PT-7828	4	24	Sim	Sim	Sim
PT-7728	4	24	Sim	Sim	Sim
PT-7710	2	8	Sim	Sim	Sim
PT-7324	2	22	Não	Não	Sim

6.2.2. Rede de comunicação: solução da Ruggedcom

A Ruggedcom é outro dos fabricantes de equipamentos para redes de comunicação que actualmente apresenta soluções especificamente desenvolvidas para subestações de energia eléctrica. Entre as principais características dos seus produtos e soluções, a Ruggedcom destaca o facto dos seus equipamentos estarem em conformidade com as normas CEI61850 e IEEE1613, operarem numa gama de temperaturas compreendida entre -40 e +85 graus Célsius, terem fonte de alimentação integrada (com opção de redundância dupla da alimentação), rápida recuperação e reconfiguração da rede de comunicação em caso de ocorrência de alguma falha, num tempo inferior a cinco milissegundos. Os equipamentos da Ruggedcom estão ainda equipados com suporte para ligações de fibra óptica através de longas distâncias, tecnologia de entrega dos pacotes de dados sem perdas (*Zero-Packet-Loss technology*) e soluções integradas para segurança da rede de comunicação [55].

A Ruggedcom tem vindo a desenvolver as suas soluções de acordo com as tecnologias e arquitecturas que os Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) têm vindo a adoptar no decorrer das últimas décadas. A análise dessas mesmas soluções permite que melhor se compreenda em que sentido têm vindo a evoluir os sistemas de comunicação que asseguram o funcionamento dos SPCC das subestações. Enquanto que os primeiros sistemas de comunicação das subestações utilizavam, por exemplo, a linha telefónica para a comunicação com o centro de controlo e comunicações série de baixa velocidade para a comunicação entre os equipamentos constituintes da rede da subestação, os sistemas mais recentes utilizam a tecnologia *Fast Ethernet* sobre fibra óptica para a comunicação na rede local do edifício de comando da subestação. A fibra óptica também é o meio físico preferencial para a comunicação com o centro de controlo [55].

6.2.2.1. Evolução das arquitecturas dos sistemas de comunicação da Ruggedcom

Nos primeiros sistemas de comunicação de suporte aos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) - Figura 6.6 - a comunicação entre os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) era tipicamente assegurada através de cablagem rígida e protocolos de comunicação série, com baixa velocidade de comunicação, como é o caso do RS232 e RS485. A

comunicação de dados entre os IEDs era sempre feita ligando as saídas de um IED às entradas de outro. A natureza inflexível desta arquitectura limitava o funcionamento do sistema do ponto de vista do controlo. A aplicação de arquitecturas de controlo e protecção mais sofisticadas exigia a utilização de um maior número de ligações entre os IEDs. Contudo, a instalação de um maior número de ligações era pouco viável o que acabava por impor bastantes limitações a nível das funcionalidades que os SPCC podiam assegurar. Por outro lado, as comunicações série, para além de terem baixa velocidade, estavam sempre limitadas a uma topologia do tipo mestre-escravo, com comunicação em *half-duplex*. A arquitectura para a rede de comunicação devia permitir a comunicação entre todos os IEDs (comunicações *peer-to-peer*). Contudo, os primeiros de comunicação não permitiam a implementação de uma arquitectura que assegurasse esse tipo de ligação entre todos os IEDs [55].

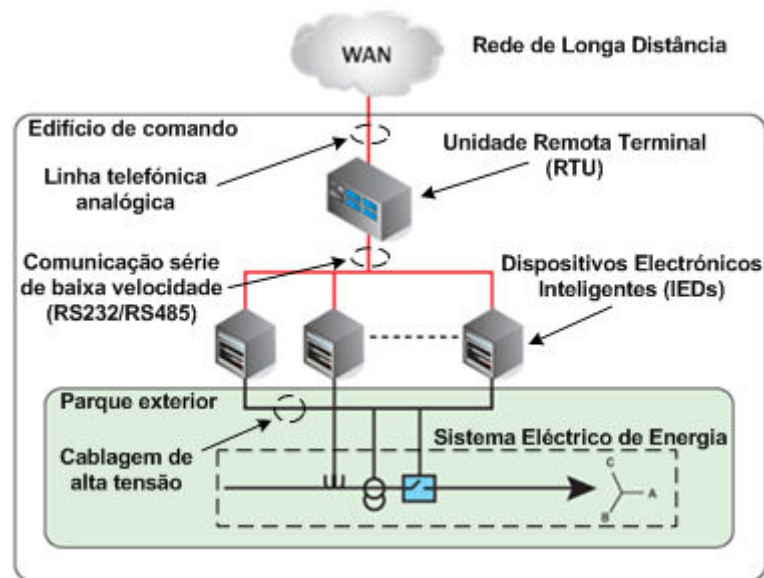


Figura 6.6 - Arquitectura dos primeiros sistemas de comunicação utilizados nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição [55].

Com a emergência e desenvolvimento da tecnologia Ethernet assistiu-se a uma reformulação relativamente à arquitectura do sistema de comunicação dos SPCC das subestações. A implementação de uma Rede de Área Local (LAN), de suporte aos SPCC das subestações, baseada na tecnologia Ethernet foi ganhando cada vez maior projecção e importância neste tipo de instalações. Entre os principais benefícios que advêm da utilização de LANs nos SPCC destacam-se os seguintes:

- Comunicação de alta velocidade entre todos os IEDs;
- Redução da cablagem de ligação entre IEDs;
- Coexistência de múltiplos protocolos de comunicação na mesma rede física de comunicação;
- Facilidade de acesso aos dados da subestação a partir do centro de despacho, através da utilização do Protocolo de Internet (IP).

A arquitectura do sistema de comunicação representada na Figura 6.7 tem como base a utilização de uma LAN com a tecnologia Ethernet. Os equipamentos que asseguram a ligação entre todos os IEDs são os *switches* Ethernet. Os *switches* Ethernet da Ruggedcom são

especificamente desenvolvidos para as LANs que suportam o funcionamento dos SPCC das subestações. Assim, no processo de fabricação destes equipamentos são considerados requisitos como a imunidade ao ruído electromagnético, performance e fiabilidade. Não é suficiente garantir apenas a fiabilidade e robustez dos equipamentos protecção, entre os quais se destacam os relés numéricos. Se os *switches* não forem desenvolvidos de acordo com alguns factores, como o ambiente da subestação (que apresenta elevado ruído electromagnético), poderá colocar em risco o funcionamento do SPCC, uma vez que são os *switches* que asseguram a comunicação entre todos os IEDs. Por exemplo, no caso dos encravamentos entre painéis é necessário que os IEDs troquem informação entre si para saber se determinada acção reúne todas as condições para que possa ser executada. Se os *switches* não forem fiáveis, esta comunicação entre os IEDs poderá ser colocada em risco [55].

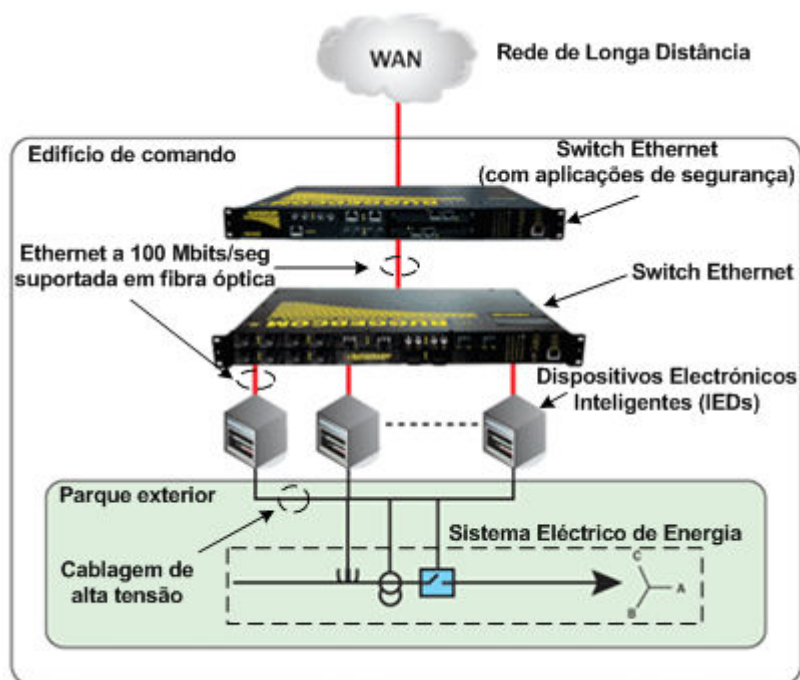


Figura 6.7- Arquitectura dos sistemas de comunicação, utilizados nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição, baseada na tecnologia Ethernet [55].

Com a criação da norma CEI61850, voltou a proceder-se a uma revisão da arquitectura do sistema de comunicação dos SPCC das subestações. A norma CEI61850 define dois barramentos de comunicação para a subestação: o barramento da estação (*Station Bus*) e o barramento do processo (*Process Bus*). O barramento da estação refere-se a um domínio de aplicação responsável por garantir a conexão entre as Unidades Terminais Remotas (RTUs) e os IEDs, associando-os à LAN da subestação. Por sua vez, o barramento do processo tem por objectivo assegurar a comunicação entre os equipamentos primários da subestação e os IEDs, através da LAN. Para isso, são utilizadas unidades de campo (*Merging Units*) às quais são equipamentos como os Transformadores de Tensão e Transformadores de Intensidade [55]. As MUs amostram os valores de tensão e corrente, enviando os valores através da rede de comunicação. Refira-se, contudo, que actualmente o barramento de processo não é utilizado nas subestações de distribuição portuguesas, sendo que a comunicação entre os equipamentos primários da subestação e os IEDs continua a ser feita por intermédio de ligações eléctricas fio-a-fio.

A norma CEI61850 motivou a Ruggedcom a desenvolver os seus *switches* Ethernet de acordo com as especificações definidos nas várias partes constituintes desta norma. Os principais objectivos passavam por satisfazer os requisitos da norma CEI61850 e possibilitar a implementação do barramento da estação e do barramento do processo na LAN da subestação. Na Figura 6.8 é apresentada uma arquitectura para a rede de comunicação dos SPCC baseada na utilização do barramento do processo e da estação, definidos pela norma CEI61850. O barramento do processo garante que a interface entre os equipamentos primários da subestação e os IEDs seja feita através da rede de comunicação de dados.

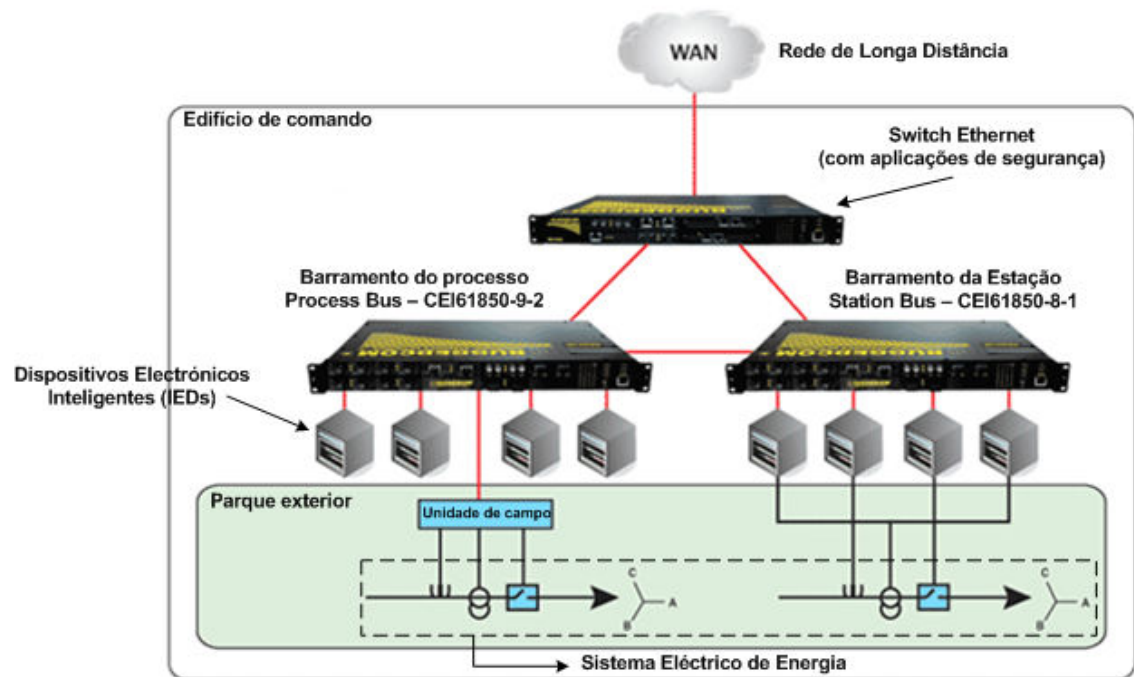


Figura 6.8 - Arquitectura dos sistemas de comunicação, utilizados nos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição, baseada nas especificações da norma CEI61850 [55].

Com base na gama de equipamentos disponibilizada pela Ruggedcom, na Figura 6.9 propõe-se uma arquitectura para a rede de comunicação dos SPCC das subestações de distribuição. Uma vez que actualmente não é utilizado o barramento do processo nas subestações de distribuição portuguesas apenas será considerado o barramento da estação na arquitectura proposta.

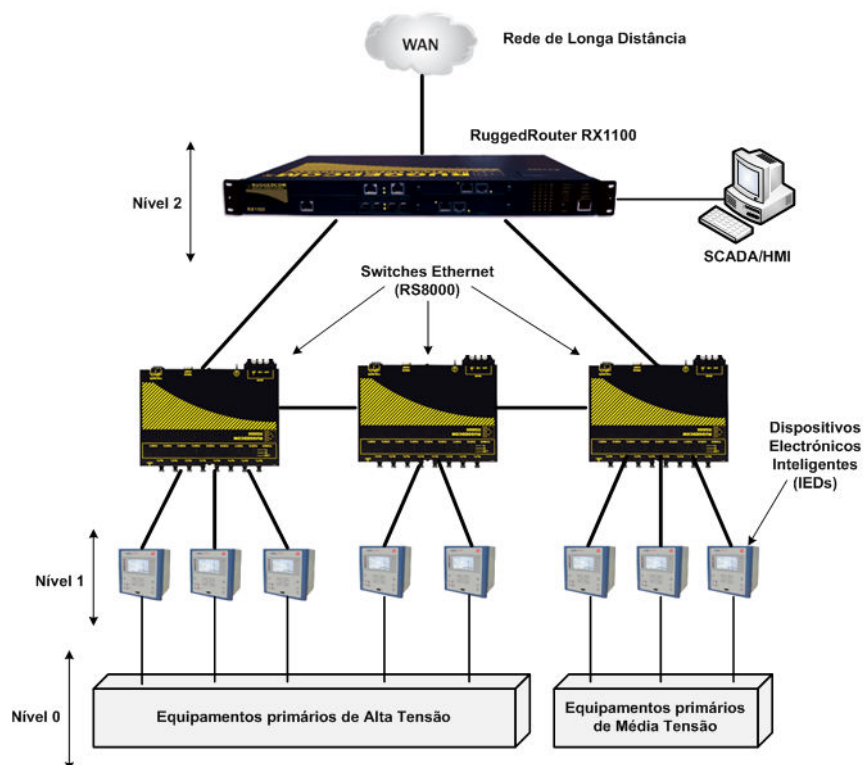


Figura 6.9 - Arquitectura para a rede de comunicação dos sistemas de protecção, comando e controlo com equipamentos da Ruggedcom.

A arquitectura da Figura 6.9 está dividida em três níveis que estão de acordo com os definidos no projecto tipo das subestações de distribuição, descrito em [13], tal como acontece com a arquitectura proposta pela Moxa para a rede de comunicação dos SPCC. Os *switches* Ethernet RS8000 asseguram a interface de comunicação entre os níveis um e dois da arquitectura da Figura 6.9. Refira-se que actualmente a velocidade máxima utilizada na rede de comunicação dos SPCC é 100 megabit por segundo (Mbps). Neste sentido, os *switches* RS8000 podem ser utilizados uma vez que asseguram uma velocidade de comunicação até 100 Mbps, sendo que esta é uma característica da tecnologia Ethernet Rápida (Fast Ethernet). Contudo, os SPCC têm vindo a evoluir no sentido de assegurarem um número cada vez maior de funcionalidades, serviços e variáveis associadas ao controlo e monitorização da subestação. Desta forma, será necessário aumentar a velocidade da rede de comunicação para que continue a ser assegurado o bom desempenho de todo o sistema. Porém, a utilização dos *switches* RS8000 da Ruggedcom poderão ser um entrave a este upgrade à velocidade de comunicação da rede de área local (LAN) da subestação, atendendo que só trabalham até 100Mbps.



Figura 6.10 - Switch Ethernet RSG2200 da Ruggedcom [56].

Na Figura 6.10 apresenta-se o *switch* Ethernet RSG2200 da Ruggedcom. A utilização do *switch* RSG2200 substituiria o RS8000 no caso de ser necessário aumentar a velocidade da

rede de comunicação dos SPCC. O RSG2200 da Ruggedcom já inclui a tecnologia Ethernet Gigabit, que assegura velocidades de comunicação até 1 Gigabit por segundo (1 Gbps), ao contrário dos 100 Mbps de velocidade máxima assegurados pelo *switch* RS8000.

No nível dois da arquitectura é utilizado um router que assegura a comunicação com o centro de despacho, através do Protocolo de Internet (IP). Neste momento já se está a proceder à utilização do protocolo CEI60870-5-104 em detrimento do protocolo CEI61870-5-101, sendo que o objectivo passa por permitir que a comunicação entre o centro de controlo e a subestação seja feita através do protocolo IP. No capítulo 7 será analisada com maior detalhe esta questão relativa à alteração do protocolo utilizado na comunicação entre o centro de controlo e a subestação.

6.2.3. Rede de comunicação: solução da Cisco

A Cisco é um fabricante de equipamentos para redes de comunicação que já começa a apresentar algumas soluções desenvolvidas especificamente de acordo com os requisitos das subestações de energia eléctrica. Contudo, refira-se que comparativamente a fabricantes como a Moxa ou Rugged, a Cisco não tem um leque tão alargado de equipamentos e de soluções integradas para a rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações.

O *switch* IE3000 da Cisco - Figura 6.11 - é desenvolvido para ambientes e sistemas como os das subestações de energia eléctrica, sendo que para isso cumpre com as especificações das normas CEI61850 e IEEE1613. Para além disso, este *switch* da Cisco tem um design modular, que permite que possam ser adicionados módulos com portas de comunicação, consoante o número de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) que sejam precisos instalar. A nível da alimentação, o *switch* IE3000 vem equipado de forma a poder ser alimentado a 24 ou 48 Volt. Destaca-se ainda o facto destes *switches* terem aplicações de segurança que asseguram a segurança dos dados e controlo de acesso por parte de pessoal não autorizado. A gama de temperaturas de funcionamento varia entre menos -40 e +75 graus Célsius. Por último, refira-se que estes *switches* da Cisco têm uma característica que os distinguem dos *switches* da Moxa e da Ruggedcom: conterem um cartão com uma memória flash. Sempre que um *switch* avaria e tem de ser substituído o cartão é removido do *switch* avariado e colocado no *switch* novo. Todas as configurações realizadas aquando da instalação do *switch* na rede são guardadas no cartão, pelo que quando é introduzido o cartão no *switch* novo não é necessário proceder à sua configuração atendendo a que esta é feita automaticamente a partir dos dados guardados na memória flash do cartão.

Numa implementação real da rede de comunicação dos SPCC, os *switches* IE3000 seriam utilizados para assegurar a interface entre os níveis um e dois da arquitectura de três níveis (nível do processo, nível dos IEDs e nível da unidade central de processamento) definida no documento de especificação do projecto tipo de subestações. Refira-se que os *switches* IE3000 da Cisco já vêm equipados com a tecnologia Ethernet Gigabit, pelo que já garantem uma velocidade de comunicação até 1 Gbps. Porém, os módulos com portas de comunicação que se podem adicionar ao *switch* ainda só estão preparados para funcionar com a tecnologia Ethernet Rápida, sendo que, neste caso, a velocidade máxima de comunicação é 100 Mbps.



Figura 6.11 - Switch Ethernet IE3000 da Cisco [57].

6.2.4. Segurança da rede de comunicação: solução da Ruggedcom

A segurança da rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações é outra das áreas para as quais a Ruggedcom está bastante orientada. Nesta secção considera-se como referência a solução da Ruggedcom para a segurança da rede de comunicação porque, actualmente, este fabricante é o que apresenta a solução mais robusta e integrada, relativamente a fabricantes como a Moxa e a Cisco. O router Rx1100 utilizado no nível dois da arquitectura proposta com base em equipamentos da Ruggedcom - Figura 6.9 - é equipado com uma aplicação de segurança proprietária deste fabricante: a RuggedCom Gauntlet.

A Ruggedcom desenvolveu a aplicação Gauntlet para subestações que utilizam o Protocolo de Internet (IP) para comunicação com o exterior (por exemplo, com o centro de controlo). O Gauntlet é uma solução que providencia um perímetro de segurança para o sistema de comunicação da subestação contra ataques feitos por entidades sem acesso autorizado à subestação. Com a utilização do Gauntlet todas as comunicações com equipamentos da subestação são autênticas, controladas e registadas de forma a prevenir e detectar tentativas de acesso desautorizado à rede de comunicação da subestação [58].

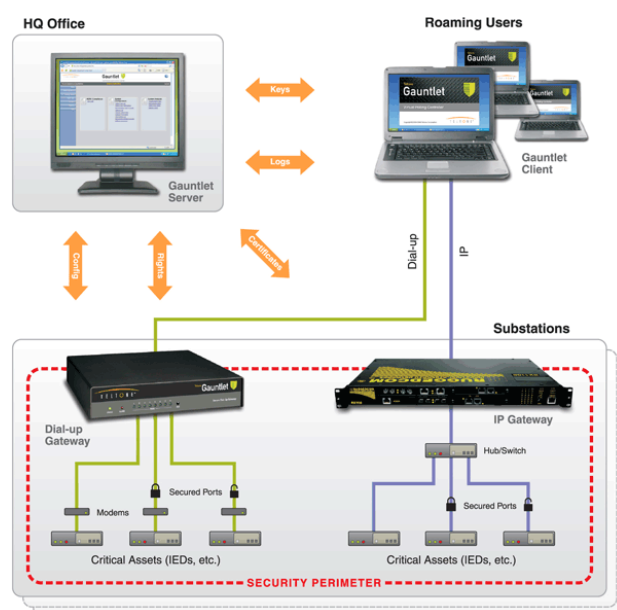


Figura 6.12 - Perímetro de segurança para a rede de comunicação da subestação assegurado pela aplicação Gauntlet desenvolvida pela Ruggedcom [58].

6.3. Sumário

A arquitectura física actual do sistema de comunicação de suporte aos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações pode evoluir no sentido de diminuir o número de switches utilizados e utilizar uma rede redundante, com duplo anel em fibra óptica. Com a diminuição do número de switches utilizados diminuem-se os custos associados a uma futura remodelação dos equipamentos. Para além disso, também se optimiza o tempo de entrega das tramas de dados, atendendo a que as tramas não atravessam tantos switches. Desta forma, o tempo total relativo ao processamento das tramas em cada switch diminui. Relativamente aos fabricantes de equipamentos para as redes de comunicação das subestações destacam-se a Ruggedcom e a Moxa, sendo que a Cisco também começa agora a entrar nesta área de mercado.

A Moxa e a Ruggedcom apresentam soluções integradas que permitem architectar as redes de comunicação das subestações de acordo com a norma CEI61850. A Cisco ainda não apresenta uma solução integrada que abranja todos os níveis que constituem o sistema de comunicação da subestação, estando, contudo, a evoluir nesse sentido. No que concerne à segurança da rede de comunicação, a Ruggedcom apresenta uma solução proprietária que garante um perímetro de segurança contra tentativa de acessos desautorizados realizados através da Internet. A solução de Gauntlet da Ruggedcom é implementada em equipamentos como routers, no sentido de garantir que o acesso a todos os equipamentos da subestação é feito de forma segura e confiável.

Capítulo 7

Novas tendências tecnológicas aplicáveis aos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações de distribuição

Neste capítulo será feita um breve estudo relativo às novas tendências tecnológicas aplicáveis ao sistema de comunicação de suporte aos Sistema de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição. Começar-se-á por apresentar algumas tecnologias capazes de assegurar a comunicação entre subestações, sendo que também será feita uma pequena referência à aplicação da norma CEI61850 para a comunicação com o exterior da subestação. Posteriormente, apresentar-se-á uma análise acerca da possibilidade de utilizar sensores sem fios (*wireless*) na subestação. Por último, será abordada a possibilidade de implementar o barramento de processo, definido pela norma CEI61850, nas subestações de distribuição portuguesas.

7.1. Estudo de tecnologias de comunicação entre subestações

No domínio da automação da subestação, a infra-estrutura de comunicação assume um papel determinante na interface entre o mundo físico e virtual da subestação. A especificação da forma como é feita a troca de informação através de protocolos de comunicação normalizados é um ponto fundamental no que concerne à interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos. Para além disso, as tecnologias de comunicação estão a mudar de dia para dia, procurando-se soluções cada vez mais eficientes e fiáveis capazes de suportar a infra-estrutura do Sistema de Automação da Subestações (SAS). Neste sentido, uma rede de comunicação constitui o núcleo do SAS, pelo que a concepção de uma arquitectura de rede fiável e com uma relação custo-performance equilibrada representa uma tarefa crucial. Grande parte das redes de comunicação existentes não consegue satisfazer os requisitos exigidos pelas condições de funcionamento do SAS, que requer uma elevada disponibilidade por parte do sistema de comunicação que o suporta. Assim, pretende-se estudar quais os recentes desenvolvimentos relativos às tecnologias de comunicação que permitem a implementação de sistemas de controlo remoto fiáveis, com capacidade para

monitorizar em tempo real o estado de operação e performance de sistemas eléctricos de energia, nos quais se enquadram as subestações. Estas tecnologias de comunicação podem ser classificadas em quatro classes: comunicação por *power line*, comunicação por satélite, comunicação *wireless* e comunicação por fibra óptica. Cada uma destas tecnologias tem as suas vantagens e desvantagens que têm de ser avaliadas de forma a escolher a melhor infra-estrutura de comunicação para o SAS [59].

7.1.1. Comunicação por *Power Line* (PLC)

A comunicação por *power line* (PLC) é uma tecnologia que utiliza a rede de energia eléctrica como meio de transmissão. A PLC utiliza as infra-estruturas já existentes, providenciando um meio fiável e seguro para estabelecer conexão entre equipamentos e redes de comunicação. Entre as vantagens de utilização de PLC no sistema de automação das subestações destacam-se três: a ampla cobertura, elevada largura de banda e o custo económico. Ampla cobertura: A ampla cobertura garantida pela utilização de PLCs é uma das suas maiores desvantagens. As *power lines* estão disponíveis em quase todos os locais do mundo, sendo que a sua utilização também traz benefícios em áreas rurais onde as infra-estruturas de comunicação ainda não estão disponíveis. Para além disso, a PLC assegura a comunicação a distâncias superiores a 300 metros sem utilização de repetidores, ao contrário do que acontece com a *Fast Ethernet* (repetidores de sinal de 100 em 100 metros) e com as comunicações *wireless* definidas pela norma IEEE802.11b (repetidores de sinal de 50 em 50 metros). No que diz respeito à largura de banda, a tecnologia de PLC actual garante uma velocidade máxima de 45 Megabits por segundo. Os custos para o utilizador são insignificantes porque são utilizadas as linhas já existentes para transportar os sinais relativos à comunicação dos dados [59].

Como desvantagens da utilização de PLC destaca-se o ruído e a elevada atenuação. As fontes de ruído ao longo das linhas da rede eléctrica de energia podem provocar erros a nível dos bits de dados, sendo que a performance da comunicação por *power line* pode ser severamente afectada. Por seu lado, a topologia física da rede eléctrica e as flutuações das impedâncias de carga são as causas para a atenuação e distorção do sinal. Para além disso, os cabos eléctricos não são entrelaçados nem tem blindagem adequada, pelo que pode ser induzido uma quantidade considerável de ruído electromagnético nas linhas de transmissão [59].

7.1.2. Comunicação por satélite

A comunicação por satélite pode oferecer soluções inovadoras para controlo remoto e monitorização das subestações. Esta tecnologia providencia uma cobertura geográfica extensa, podendo ser uma boa alternativa para a infra-estrutura de comunicações para a automação de sistemas eléctricos poder chegar a subestações instaladas em locais onde comunicações por telefone ou comunicações móveis podem não existir. Para além disso, com os recentes avanços na automação de sistemas eléctricos, a comunicação por satélite é usada no controlo remoto e monitorização da subestação, bem como no Sistema GPS (*Global*

Posiotioning System) para sincronização do tempo entre equipamentos, com uma exactidão na ordem dos micro segundos. Assim, como vantagens de utilização de comunicações por satélite para monitorização remota das subestações destacam-se a grande cobertura geográfica e a elevada largura de banda. A largura de banda das comunicações por satélite permite que esta tecnologia seja utilizada para a transmissão de dados de importância crítica para as subestações. Contudo, o atraso gerado devido à distância a que se encontram os satélites e às características dos canais de comunicação desta tecnologia constituem desvantagens para as comunicações por satélite [59].

7.1.3. Comunicação por fibra óptica

A fibra óptica é o meio físico de comunicação mais utilizado na rede de comunicação do Sistema de Automação da Subestação (SAS). A fibra óptica assegura a transmissão de dados com uma elevada largura de banda, elevada performance e fiabilidade. Para além disso, esta tecnologia de comunicação também garante elevada imunidade ao ruído electromagnético (EMI) e às interferências por rádio frequência (RFI) presentes no ambiente da subestação. Assim, como vantagens de utilização da comunicação por fibra óptica destaca-se a sua capacidade e características de imunidade ao ruído. Os sistemas de transmissão por fibra óptica actuais garantem velocidades de comunicação até 10 Gigabit por segundo, utilizando um sinal com um comprimento de onda único. A taxa de ocorrência de erros também é muito baixa (cerca de 10^{-15}). Desta forma, a fibra óptica é o meio de comunicação físico utilizado em redes com tecnologia Gigabit Ethernet. Refira-se que a aplicação de Gigabit Ethernet começa a ser equacionada no âmbito da rede de comunicação do SAS. Por sua vez, o elevado custo económico é a principal desvantagem de utilização da fibra óptica, sendo que este custo aumenta consideravelmente no caso de se utilizar a fibra óptica como meio de acesso remoto à subestação. Todavia, as vantagens que advêm da utilização de fibra óptica sobrepõem-se ao seu custo, pelo que esta é uma das tecnologias mais aplicadas no SAS [59].

7.1.4. Comunicação sem fios (*wireless*)

Actualmente, começam a aparecer diversas tecnologias *wireless* no mercado de automação de subestações, sendo que a principal diferença entre elas passa pelo seu alcance. Quando comparadas com as redes que utilizam cabos de comunicação, as tecnologias de comunicação *wireless* apresentam potenciais benefícios no controlo e monitorização remota da subestação, poupando-se custos relativos à instalação de cablagem e tornando a infraestrutura de comunicação mais rápida e fácil de instalar. A segurança é uma das principais e crescentes preocupações das comunicações *wireless*. Esta preocupação aumentou com o desenvolvimento de equipamentos capazes de detectar os sinais *wireless* e permitirem o acesso às respectivas redes de comunicação. Este acesso desautorizado às redes de comunicação *wireless* constitui uma grande ameaça para a segurança do sistema de comunicação da subestação. Para além disso, as comunicações por *wireless* apresentam consideráveis limitações em termos de largura de banda, cobertura e vulnerabilidade perante interferências electromagnéticas. Neste sentido, referem-se como vantagens de utilização de

redes de comunicação *wireless* a sua flexibilidade, custo e rapidez de instalação. Por outro lado, questões relativas à segurança da rede de comunicação, às interferências e à sua capacidade representam as desvantagens de utilização de redes de comunicação sem fios (*wireless*). Para além das interferências devidas ao ruído electromagnético, a existência na subestação de outros equipamentos que utilizem a tecnologia *wireless* também pode interferir com a rede de comunicação, podendo levar à perda de conectividade. Relativamente à capacidade das comunicações *wireless*, tipicamente estas providenciam uma baixa qualidade de serviço (QoS) quando comparadas com as redes de comunicação que utilizam cabos, para além de que em aplicações reais [59].

7.2. Utilização da norma CEI61850 para comunicação com o exterior

A implementação de arquitecturas de comunicação inter-operáveis e eficientes é um dos principais requisitos para as redes de comunicação dos sistemas de automação da subestação (cuja especificação é feita pela norma CEI61850) e para a interconexão entre diferentes subestações. O principal objectivo passa por minimizar o custo que advém da aquisição de dados provenientes de várias subestações, no sentido de se conseguir centralizar toda a informação disponível [60].

A tecnologia Ethernet mudou drasticamente o rumo dos sistemas de comunicação devido à sua disponibilidade, eficiência, relação custo-performance, interoperabilidade e capacidade de gerir a largura de banda mediante o desenvolvimento e expansão da rede de comunicação. Para além disso, a fibra óptica é um dos meios de comunicação tecnicamente mais atractivos devido à sua elevada capacidade, eficiência e segurança. Neste sentido, a utilização da EPON (Ethernet *Passive Optical Network*) é proposta para interconectar subestações diferentes. A EPON pretende reunir a Ethernet e a fibra óptica numa única tecnologia para troca de tramas Ethernet entre estações através de uma rede de comunicação. A norma CEI61850 é o standard global para o Sistema de Automação da Subestação (SAS), pelo que para ser possível a interconexão entre subestações diferentes é necessário manter as normas utilizadas em cada subestação. Através da interconexão de duas ou mais subestações é possível desenvolver um sistema de monitorização centralizado deste tipo de instalações [60].

Como já foi referido, a norma CEI61850 normalizou o processo de automação da subestação. De acordo com esta norma, a Ethernet é o protocolo escolhido para transmitir as mensagens geradas pelos Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) dentro da subestação devido à sua performance e grande aplicabilidade. Assim, implantando a EPON para interconectar subestações, as tramas Ethernet que transitam na rede de comunicação local da subestação podem ser transmitidas para outras subestações, sem necessidade de utilizar conversores de protocolos de comunicação. Esta constitui uma das principais vantagens de utilização da EPON para interconexão de subestações. Para além disto, a utilização da fibra óptica como meio físico de comunicação garante a eficiência, elevada capacidade, cobertura e segurança da rede de comunicação. Desta forma, a EPON é a solução mais viável para interconectar subestações. Na Figura 7.1 apresenta-se o modelo de comunicações proposto pela EPON para ligar diferentes subestações. Segundo este modelo, cada subestação é ligada, através de uma ONU (*Optical Network Unit*), a uma OLT (*Optical Line Terminal*) que pode

estar igualmente localizado no sistema de SCADA ou no centro de controlo. A interface entre as várias ONUs e a OLT é assegurada por um distribuidor óptico passivo [60].

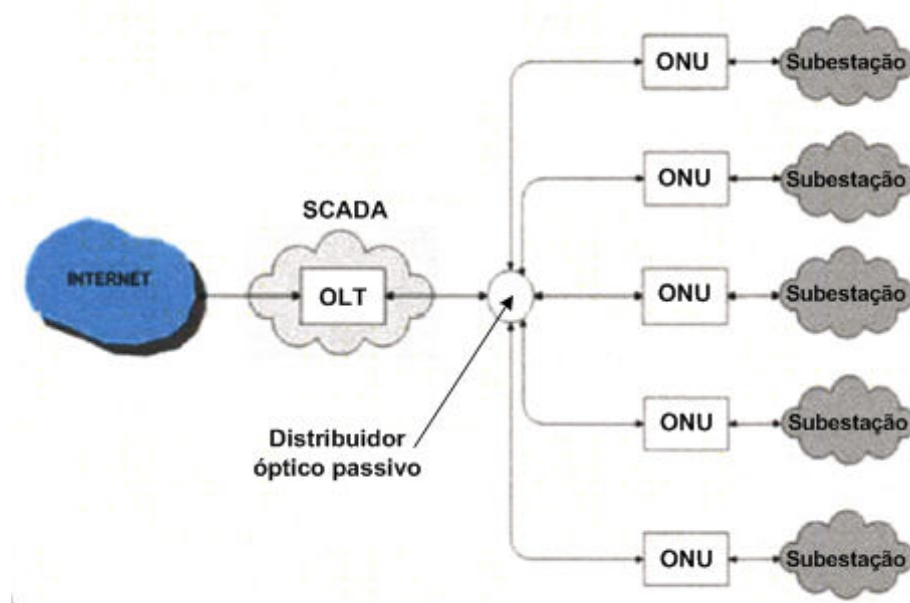


Figura 7.1 - Modelo de comunicação proposto pela EPON para a interconexão de várias subestações [60].

7.3. Utilização de um sistema de sensores *wireless* na subestação

No âmbito da monitorização remota dos equipamentos e vigilância das subestações, as redes de sensores *wireless* podem assumir um papel determinante. O rápido desenvolvimento da electrónica associada aos equipamentos de comunicação abriu caminho à utilização de redes de sensores em várias aplicações industriais. No seguimento deste desenvolvimento surgiram as redes de sensores *wireless*, caracterizadas pelo seu baixo custo, baixo consumo energético e multi-funcionalidade dos seus sensores. Estes sensores recolhem dados provenientes dos equipamentos do sistema de automação da subestação, pelo que requisitos como a eficiência, cobertura e tolerância a falhas tem de ser garantidos pelos mesmos [59]. Na Figura 7.2 é apresentado um exemplo de uma arquitectura de uma rede de comunicação da subestação baseada em tecnologia *wireless*. No caso desta arquitectura, são instalados no parque exterior da subestação Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) aos quais estão ligados alguns sensores, como é o caso de sensores de vibração e temperatura. Os IEDs são equipados com hardware que permite que possam comunicar entre si através de uma comunicação sem fios (*wireless*). A comunicação entre os IEDs instalados no parque exterior da subestação e o edifício de comando também é feita por intermédio de comunicações *wireless*. No edifício de comando existe um gateway *wireless* que assegura a interface entre os dados provenientes do parque exterior da subestação e um concentrador de dados. Este concentrador de dados, por sua vez, pode comunicar com o centro de controlo remoto da subestação através de uma rede de longa distância [61].

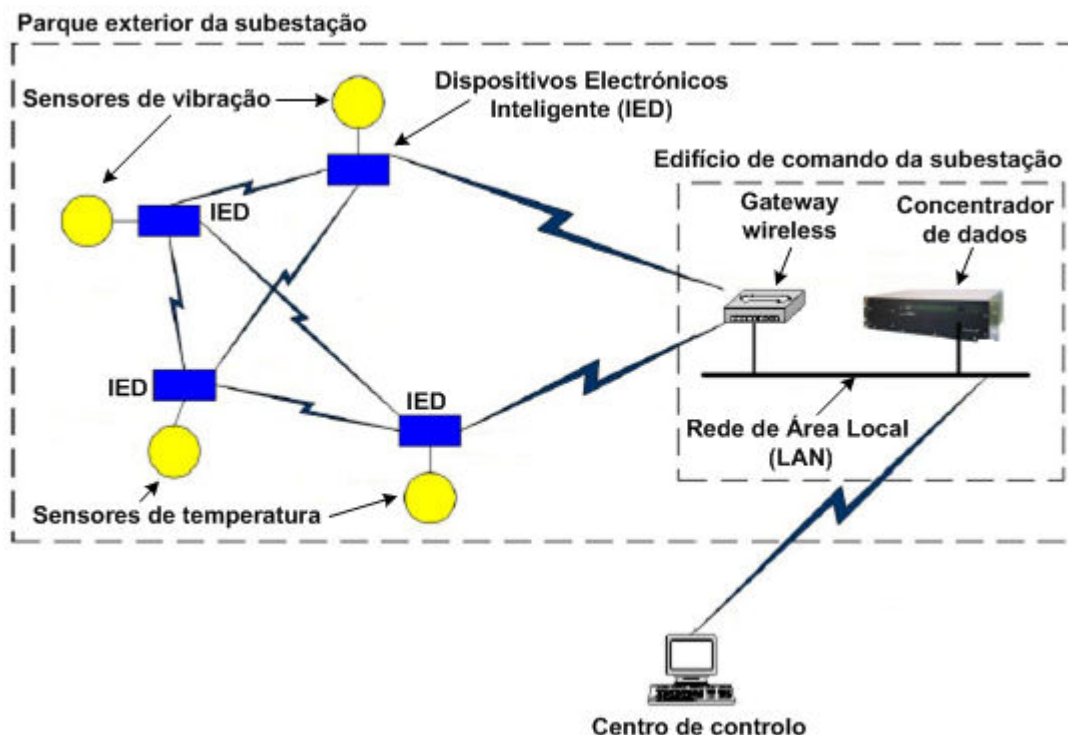


Figura 7.2 - Exemplo de uma arquitectura da rede de comunicação da subestação baseada em tecnologia *wireless* [61].

Dentro das subestações, as comunicações sem fios foram evitadas no passado devido às preocupações existentes relativamente ao impacto das interferências electromagnéticas na qualidade da transmissão dos dados. Para além disso, uma vez que as frequências de comunicação *wireless* não eram normalizadas, havia o risco de existir outro tipo de equipamentos que utilizassem a mesma gama de frequências que as do sistema de comunicação *wireless* da subestação. Assim, havia o risco da disponibilidade da rede de comunicação diminuir no caso de sobrecarga provocada pela existência de vários equipamentos a utilizar a mesma gama de frequências para comunicar. Por último, a renitência à utilização de redes de comunicações *wireless* na subestação também passava pelas preocupações relativas à segurança e integridade dos dados. Todavia, a economia a nível dos custos económicos assegurada pelas comunicações *wireless* começou a pressionar a indústria no sentido de avaliar em que tipo de aplicações é que esta tecnologia podia ser utilizada, tendo em conta o seu bom funcionamento e relação custo-performance [61].

Como foi referido, as comunicações sem fios podem ter um papel importante nas subestações. Porém, a sua utilização tem de ter em conta as vulnerabilidades associadas a esta tecnologia, sendo que estas passam por aspectos como a interferência electromagnética e congestionamento da gama de frequências utilizada. Mesmo que estes factores possam ser melhorados, apenas alguns produtos, equipados com tecnologia *wireless*, são robustos o suficiente para funcionar em ambientes adversos e ruidosos como são os das subestações de energia eléctrica. Assim, é fundamental definir sobre que condições a utilização de comunicações sem fios pode ser usada para a transmissão de dados dentro da subestação [61]. Algumas destas características são:

- Os dados transmitidos não tem requisitos de tempo real e podem tolerar atrasos;
- A transmissão dos dados através de cabos de comunicação pode ser muito cara e difícil;
- Utilização de comunicações *wireless* temporariamente, em resposta a uma situação de emergência;
- O sistema de comunicação *wireless* é redundante;
- A comunicação dos dados é feita com um dispositivo móvel.

A área de aplicação mais promissora para as comunicações *wireless* passa por assegurar a recolha de dados adquiridos por sensores. Para além dos Transformadores de Intensidade (TI) e Transformadores de Tensão que providenciam dados para muitos dos equipamentos da subestação, podem ser usados outros tipos de sensores para monitorizar a temperatura de óleo dos transformadores, vibração dos equipamentos, detecção de movimento através de câmaras de videovigilância e libertação de SF₆⁷. Na Figura 7.3 apresenta-se um exemplo de aplicação de um sensor de corrente utilizando comunicações *wireless*. Os sensores primários enviam os dados para um computador equipado com um software de análise de dados. Este software comunica simultaneamente com um equipamento de medição trifásico que está ligado aos enrolamentos secundários de um TI convencional [61].

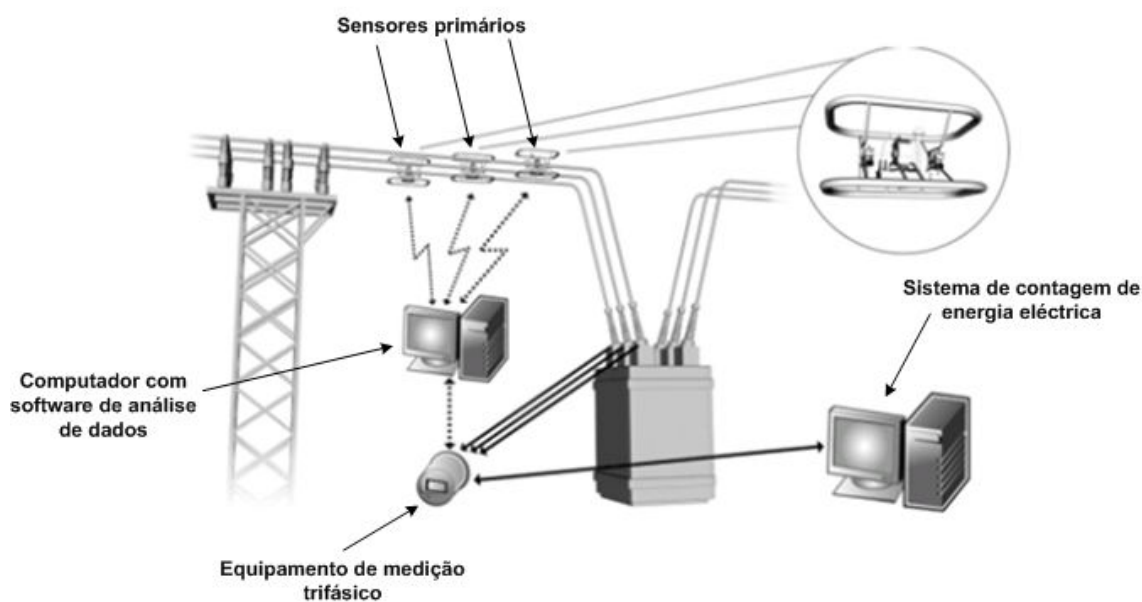


Figura 7.3 - Instalação de um sensor de corrente utilizando comunicações *wireless* [61].

⁷ O SF₆ é um gás utilizado em alguns equipamentos primários da subestação. Entre as vantagens da sua utilização destaca-se o facto deste gás permitir a rápida extinção dos arcos eléctricos.

7.4. Implementação do barramento de processo (*process bus*) definido pela norma CEI61850

A norma CEI61850 define a utilização de dois barramentos de comunicação para o sistema de comunicação da subestação: o barramento da estação (*station bus*) e o barramento do processo (*process bus*). A utilização do barramento do processo tem como objectivo principal permitir que a comunicação entre os equipamentos primários da subestação, instalados no parque exterior desta instalação, e os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) e a unidade central de processamento passe a ser feita por intermédio de uma rede de comunicação de dados. A utilização do barramento do processo pressupõe a utilização de Unidades de Campo (Merging Units) que fazem a interface entre os equipamentos primários e a rede de comunicação de dados da subestação. Refira-se que actualmente o barramento do processo não é utilizado nas subestações de distribuição portuguesas.

Uma das principais mudanças provocadas pela implementação do barramento do processo na subestação passa pela instalação de IEDs no seu parque exterior - Figura 7.4. Estes dispositivos ficam instalados em armários próximos dos equipamentos primários da subestação. Refira-se que com a utilização de equipamentos digitais no parque exterior, toda a cablagem de alta tensão que antes era utilizada para interligar os IEDs do edifício de comando aos equipamentos primários da subestação é substituída por um único cabo de comunicação em fibra óptica. Assim, uma das principais vantagens de utilização do barramento do processo passa por uma redução significativa do número de cabos eléctricos encaminhados para o edifício de comando.

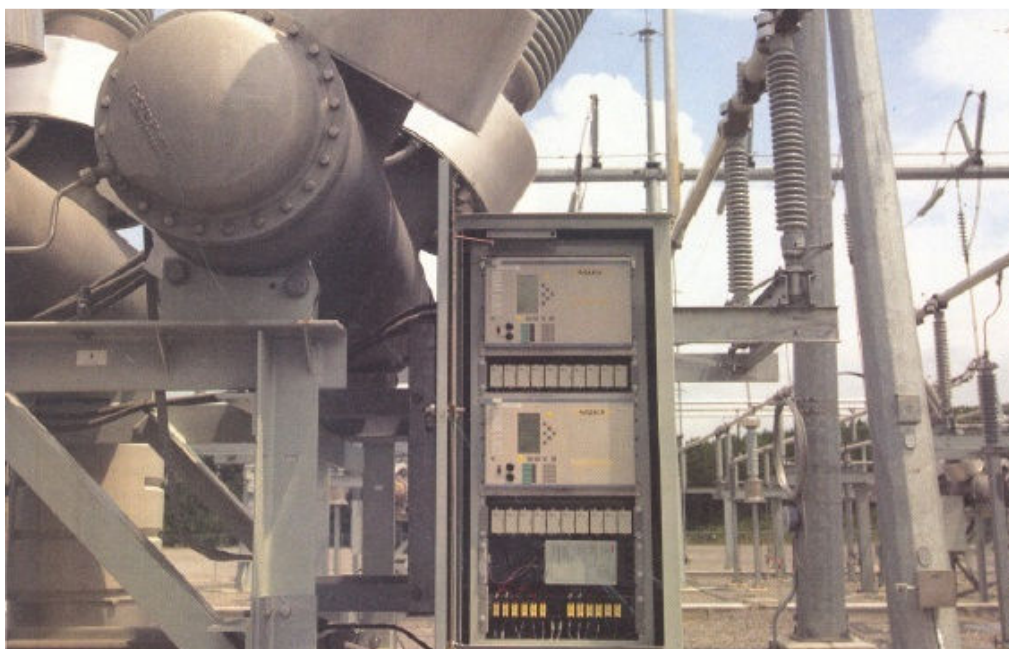


Figura 7.4 - Subestação com Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) instalados no parque exterior [62].

Na Figura 7.5 é apresentada a arquitectura do barramento do processo a nível do parque exterior de uma subestação. Esta arquitectura tem como base a utilização de *bricks*. Os *bricks* - Figura 7.6 - são dispositivos com entradas e saídas remotas que correspondem à especificação das *Merging Units* definidas pela norma CEI61850 [63].

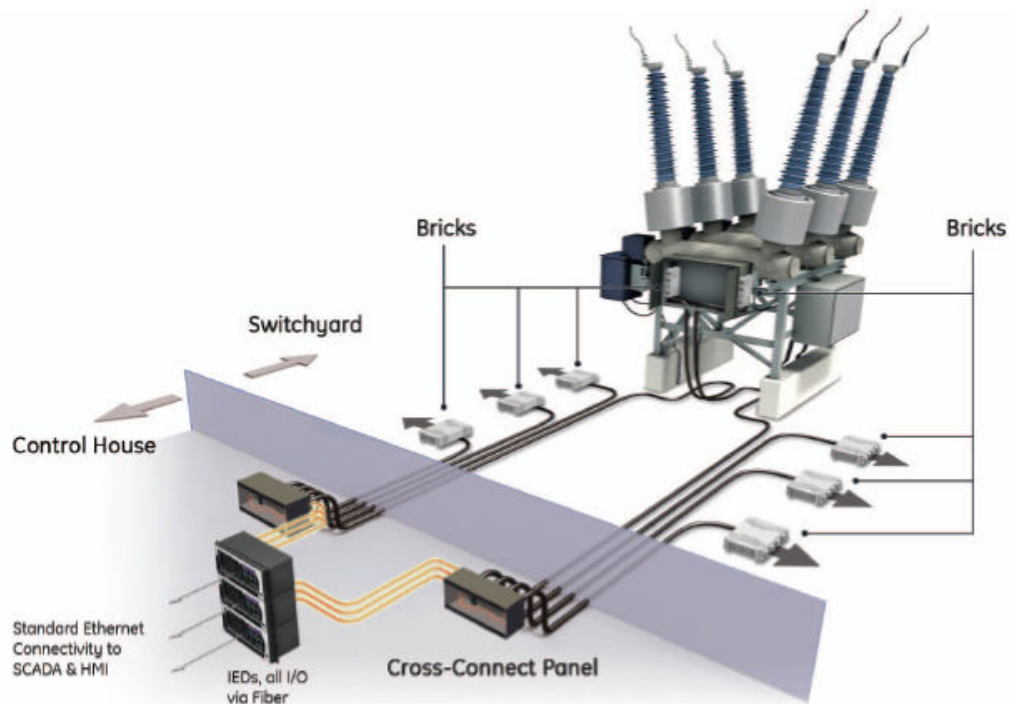


Figura 7.5 - Arquitectura do barramento do processo (*process bus*) definido pela norma CEI61850 [63].

Os *bricks* utilizados são concebidos de forma a que não tenham ficheiros de configuração individuais nem algoritmos de tratamentos de dados. A sua principal função passa por providenciar uma interface robusta e de elevada velocidade de comunicação com o parque exterior, de acordo com as especificações da norma CEI61850 [63].

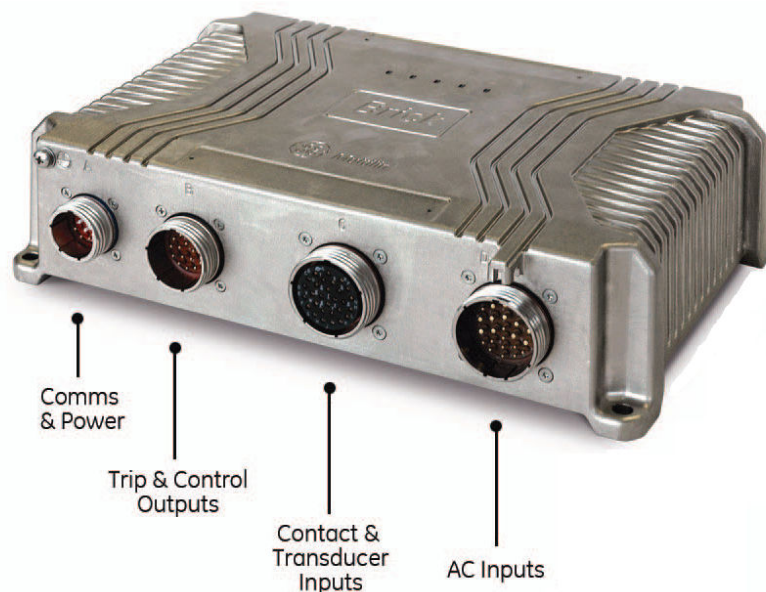


Figura 7.6 - Unidades de campo (*bricks*) utilizados no barramento do processo [63].

Os *bricks* são concebidos especificamente de acordo com os sinais tipicamente mais usados nas funções de automação e protecção da subestação. Entre estes sinais, incluem-se correntes e tensões de Corrente Alternada (AC) provenientes de transformadores de instrumentação, estado dos disjuntores e alarmes, controlo de disjuntores, leitura de pressão e temperaturas, entre outros. Refira-se ainda que os *bricks* estão preparados para funcionar em ambientes adversos incluindo temperaturas extremas, choques e vibrações e compatibilidade electromagnética [63]. Na Figura 7.7 apresentam-se os painéis de chegada das ligações de fibra óptica provenientes dos *bricks* do barramento do processo instalado no parque exterior da subestação.



Figura 7.7 - Painéis de chegada do edifício de comando (*Cross-Connect Panel*) [63].

7.5. Sumário

As principais tecnologias passíveis de serem utilizadas para a comunicação entre subestações são a comunicação por *power line*, por satélite, por fibra óptica e *wireless* (sem fios). Cada uma destas tecnologias apresenta vantagens e desvantagens, pelo que muitas vezes a sua aplicação está dependente dos requisitos da aplicação na qual pretendem ser utilizadas. Relativamente, à utilização da norma CEI61850 para comunicação com o exterior das subestações, isto é, para comunicar com outras subestações e o centro de controlo remoto, actualmente, este é um tema em discussão. Contudo, a utilização da Ethernet *Passive Optical Network* (EPON) é actualmente a tecnologia mais viável para assegurar estas comunicações, atendendo a que engloba a utilização de Ethernet sobre fibra óptica numa única solução. No que concerne à utilização de redes de sensores *wireless* nas subestações, esta é uma área tecnológica com aplicação futura porque pode ser utilizada, por exemplo, no sistema de videovigilância das instalações e na aquisição de variáveis do processo. Refira-se que as principais vantagens das redes de comunicação sem fios passam por apresentarem custos reduzidos, baixo consumo energético e flexibilidade e rapidez de instalação e configuração dos equipamentos. Por último, aplicação do barramento do processo (*Process Bus*) nas subestações de distribuição portuguesas poderá ter um impacto considerável no que toca à implementação do seu sistema de automação. Uma das características principais da utilização do barramento do processo é a instalação de dispositivos inteligentes no parque exterior da subestação.

Capítulo 8

Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, bem como as propostas para trabalhos a realizar no futuro.

8.1. Conclusões

Com a realização deste trabalho de dissertação foi possível caracterizar os actuais sistemas de comunicação que suportam os Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações de distribuição. A rede de comunicação de dados da subestação assegura a troca de informação entre os Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) através de protocolos normalizados como é o caso da Ethernet. A Ethernet é uma tecnologia de comunicação bastante utilizada em aplicações industriais. As subestações adoptaram a Ethernet como protocolo de comunicação na sequência da aplicação da norma CEI61850. Esta norma, publicada entre 2003 e 2005 foi criada tendo como principal motivação normalizar a arquitectura das redes de comunicação utilizadas até então e garantir a interoperabilidade entre equipamentos desenvolvidos por fabricantes distintos. Assim, o trabalho desenvolvido durante o semestre passou por fazer um estudo desde a evolução dos relés de protecção até às novas tendências tecnológicas aplicáveis ao sistema de comunicação das subestações.

A evolução dos relés de protecção foi um dos factores impulsionadores que motivou uma mudança de paradigma relativamente às funções e sistemas de protecção dos sistemas eléctricos de energia. Enquanto que a cada relé electromecânico estava apenas associada uma função de protecção específica, no caso dos relés digitais (numéricos), estes equipamentos assumiam um carácter multifuncional, atendendo ao facto de realizarem mais que uma função de protecção. Com o contínuo desenvolvimento da tecnologia digital e dos sistemas baseados em microprocessadores, os relés numéricos foram-se tornando em equipamentos cada vez mais robustos, confiáveis e versáteis. Aliás, actualmente é comum utilizar-se a designação de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) quando se pretende fazer referência aos relés de protecção. Paralelamente, os sistemas de automação também começavam a evoluir no sentido de integrarem o sistema de protecção da subestação. Contudo, a falta de normalização em vigor para a automação das subestações levou a que os

fabricantes de equipamentos desenvolvessem os seus próprios de protocolo de comunicação. Como principal consequência advinha o facto de sempre que se precisava de conectar IEDs de fabricantes distintos entre si surgiam problemas de incompatibilidade. Muitas das vezes, a solução para este problema passava pela utilização de redes de comunicação independentes para cada fabricante ou pela utilização de conversores de protocolos de comunicação, sendo que daí resultava um aumento dos custos totais do sistema.

Com a norma CEI61850, começaram a ser tomadas em linha de conta aspectos como a normalização dos nomes atribuídos aos dados gerados na subestação, criação de um conjunto de serviços explícitos e utilização de protocolos de comunicação normalizados. A principal motivação para utilização da norma CEI61850 nas subestações passa por assegurar a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos, possibilitando assim normalizar as arquitecturas das redes de comunicação utilizadas em subestações diferentes.

A par do desenvolvimento da norma CEI61850, também se registou a evolução de tecnologias de comunicação como a Ethernet e o TCP/IP. Quando surgiu a tecnologia Ethernet, os equipamentos da rede de comunicação eram ligados a um cabo de comunicação comum, sendo que a velocidade máxima da rede não ultrapassava os 10 Megabit por segundo (Mbps). Com a tecnologia Ethernet Rápida (*Fast Ethernet*) assistiu-se a uma mudança considerável na forma como eram arquitectadas as redes de comunicação. Caiu em desuso a utilização de um canal de comunicação único e comum a todos os equipamentos da rede, passando-se a utilizar *switches*. Os *switches* permitiam que as ligações dos equipamentos à rede de comunicação fossem feitas através de ligações individuais e independentes. Desta forma, a introdução ou remoção de equipamentos na rede de comunicação tornou-se mais simples e menos morosa. A utilização dos switches também trouxe outras vantagens como o encaminhamento dos dados apenas para os equipamentos a que se destinam e restrição dos domínios de colisão. A Ethernet Rápida é actualmente a tecnologia utilizada na rede de comunicação de suporte aos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo das subestações, garantindo uma velocidade de transferência dos dados até 100 Mbps. Actualmente, já decorrem alguns trabalhos de investigação relativos à utilização de Ethernet Gigabit nas subestações. Refira-se que esta tecnologia permite uma velocidade de comunicação até 1 Gigabit por segundo (Gbps), sendo que é expectável que esta velocidade atinja os 40 e 100 Gbps num futuro próximo. Refira-se que a fiabilidade e segurança das redes de comunicação dos SPCC também devem ser aspectos considerados desde a fase de implementação destes sistemas.

A arquitectura física actual do sistema de comunicação de suporte aos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) das subestações pode evoluir no sentido de diminuir o número de switches utilizados e utilizar uma rede redundante, com duplo anel em fibra óptica. Com a diminuição do número de switches utilizados diminuem-se os custos associados a uma futura remodelação dos equipamentos. Para além disso, também se optimiza o tempo de entrega das tramas de dados, atendendo a que as tramas não atravessam tantos switches. Desta forma, o tempo total relativo ao processamento das tramas em cada switch diminui. Relativamente aos fabricantes de equipamentos para as redes de comunicação das subestações destacam-se a Ruggedcom e a Moxa, sendo que a Cisco também começa agora a entrar nesta área de mercado. Relativamente à comunicação entre subestações, as principais tecnologias passíveis de serem utilizadas para esta comunicação são a comunicação por *power line*, por satélite, por fibra óptica e *wireless* (sem fios).

8.2. Propostas de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se a realização de um levantamento de ferramentas e desenvolvimento de métodos de avaliação de desempenho de redes de comunicação. O principal objectivo passa por considerar várias topologias possíveis para a rede de comunicação dos Sistemas de Protecção, Comando e Controlo (SPCC) e com base nessas ferramentas poder ser feita uma análise comparativa através dos resultados experimentais obtidos. Propõe-se também fazer um estudo relativo ao impacto a nível de vantagens e desvantagens de utilização do Protocolo de Internet (IP) para comunicação entre o centro de controlo remoto e a subestação. Por último, sugere-se ainda a realização de um estudo relativo à viabilidade e impacto da utilização do barramento do processo (*process bus*), definido na norma CEI61850, nas subestações de distribuição portuguesas.

Apêndice A

Classificação das Protecções pela Nomenclatura ANSI/IEEE

Tabela A.1 - Códigos ANSI/IEEE para as funções de protecção.

Código numérico ANSI/IEEE	Função de Protecção
2	Temporizador (auxiliar)
21	Distância
24	Sobre-excitação ou V/Hz
25	Sincronismo (<i>Synchrocheck</i>)
27	Mínimo de tensão
30	Sinalizador (auxiliar)
32	Inversão de potência
37	Mínimo de corrente (motores)
38	<i>Bearing</i>
40	Perda de campo de excitação (geradores)
46	Máximo de corrente de sequência inversa
47	Sequência errada de fases da tensão
48	Falta de fase na tensão
49	Térmica ou contra sobrecargas
50	Máximo de corrente instantânea
50BF	Falha de disjuntor
51	Máximo de corrente temporizada
51G ou 51N	Máximo de corrente homopolar, temporizada
51V	Máximo de corrente temporizada com bloqueio por 27
59	Máximo de tensão
59N	Máximo de tensão homopolar
63	Pressostato
64G	Corrente à terra no rotor (geradores)
67	Máximo de corrente direccional
67N	Máximo de corrente direccional homopolar
68	Relé bloqueante (auxiliar)
69	Relé permissivo (auxiliar)
71	Relé detector de gás
74	Relé de alarme (auxiliar)
76	Máximo de corrente contínua
78	Dessincronização (geradores)
79	Religação automática (linhas aéreas)
81	Frequência (mínimo ou máximo)
85	Interface para tele-protecção
86	Bloqueio (usada para encravar ligações)
87	Diferencial
87B	Diferencial de barramentos (bus)
87L	Diferencial de linhas
87N	Diferencial restrita a defeitos à terra
94	Relé de disparo (auxiliar, de amplificação)

Referências

- [1] Juan M. Gers and Edward J. Holmes, "*Protection of Electricity Distribution Networks*", Second edition. United Kingdom, MPG Books Limited, 2004. ISBN:0-86341-357-9
- [2] T. S. Madhava Rao, "*Power System Protection Static Relays*", New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing, 1979.
- [3] M. Kezunovic and B. D. Russell, "Microprocessor applications to substation control and protection," *Computer Applications in Power, IEEE*, vol. 1, pp. 16-20, 1988.
- [4] E. A. Udren and J. S. Deliyannides, "Integrated system for substation relaying and control shows benefits," *Computer Applications in Power, IEEE*, vol. 2, pp. 21-27, 1989.
- [5] J. B. Franklin, "Interfacing distribution automation and system protection," in *Rural Electric Power Conference, 1992. Papers Presented at the 36th Annual Conference, 1992*, pp. C5/1-C5/6.
- [6] M. Lehtonen, E. Antila, and M. Seppanen, "An integrated solution for protection and automation of power systems," in *Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 438)*, 1997, pp. 24/1-24/5 vol.4.
- [7] A. Apostolov, "Introduction and architecture of microprocessor relays based substation automation systems," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE*, 1999, pp. 26-27 vol.1.
- [8] K. Kaneda, S. Tamura, N. Fujiyama, Y. Arata, and H. Ito, "IEC61850 based Substation Automation System," in *Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on*, 2008, pp. 1-8.
- [9] R. E. Mackiewicz, "Overview of IEC 61850 and Benefits," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, 2006, pp. 376-383.
- [10] E. C. Gurjão, U. A. Carmo, and B. A. Souza, "Aspectos de Comunicação da Norma IEC61850", Disponível em http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SBSE/anais/145_sbse2006_final.pdf. Acesso em 31 de Março de 2009.
- [11] Andrew S. Tanenbaum, "*Computer Networks*", 4th edition. Upper Saddle River, New Jersey, Pearson Education International. ISBN:0-13-038488-7
- [12] Ricardo Emanuel Caldeira Cartaxo, "Utilização da norma IEC61850 para modelação de funções especificadas por Redes de Petri," Tese de Mestrado, IST, Lisboa, Novembro de 2007.
- [13] EDP - Energias de Portugal, "Instalações AT e MT. Subestações de distribuição: Projecto tipo - Memória Descritiva: DIT-C13-500/N", Disponível em <http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/default.htm>. Acesso em 2 de Abril de 2009.

- [14] EDP - Energias de Portugal, "Esquema de princípio: Linha AT - plano 09105", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 24 de Março de 2009.
- [15] EDP - Energias de Portugal, "Esquema de princípio: Inter-Barras e Potencial de Barras AT - plano 09104", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 24 de Março de 2009.
- [16] EDP - Energias de Portugal, "Esquema de princípio: Transformador de Potência e Regulação de Tensão - plano 09106", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 24 de Março de 2009.
- [17] EDP - Energias de Portugal, "Esquema de princípio: Linha MT - plano 09113", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 24 de Março de 2009.
- [18] EDP - Energias de Portugal, "Esquema de princípio: Chegada Transformador Potência - plano 09109", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 24 de Março de 2009.
- [19] EDP - Energias de Portugal, "Esquema de princípio: Bateria de Condensadores - plano 09111", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 24 de Março de 2009.
- [20] EDP - Energias de Portugal, "Esquema de princípio: Transformador Serviços Auxiliares, Reactância de Neutro e Potencial de Barras MT - plano 09110", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 24 de Março de 2009.
- [21] EDP - Energias de Portugal, "Sistemas de Protecção, Comando e Controlo Numérico (SPCC) - Funções de protecção: DEF-C13-570/N", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc_Normativa/DEF.htm. Acesso em 22 de Março de 2009.
- [22] EDP - Energias de Portugal, "Comutação automática de disjuntores BT: DEF-C13-550/N", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc_Normativa/DEF.htm. Acesso em 22 de Março de 2009.
- [23] EDP - Energias de Portugal, "Religação rápida e/ou lenta de disjuntores: DEF-C13-551/N", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc_Normativa/DEF.htm. Acesso em 22 de Março de 2009.
- [24] EDP - Energias de Portugal, "Pesquisa de terras resistentes: DEF-C13-552/N", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc_Normativa/DEF.htm. Acesso em 22 de Março de 2009.
- [25] EDP - Energias de Portugal, "Deslastre por falta de tensão/reposição por regresso de tensão: DEF-C13-553/N", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc_Normativa/DEF.htm. Acesso em 22 de Março de 2009.
- [26] EDP - Energias de Portugal, "Deslastre por mínimo de frequência/reposição por normalização de frequência: DEF-C13-554/N", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc_Normativa/DEF.htm. Acesso em 22 de Março de 2009.
- [27] EDP - Energias de Portugal, "Regulação de tensão: DEF-C13-555/N", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc_Normativa/DEF.htm. Acesso em 22 de Março de 2009.

- [28] EDP - Energias de Portugal, "Comando horário de bateria de condensadores: DEF-C13-556/N", Disponível em <http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc/Normativa/DEF.htm>. Acesso em 22 de Março de 2009.
- [29] CEI61850, "Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações."
- [30] EDP - Energias de Portugal, "Projecto tipo de subestações AT/MT - Esquema unifilar e manobra", Disponível em http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/peca_s_equipamento.htm. Acesso em 10 de Junho de 2009.
- [31] ABB, "SPA-Bus: Communication Protocol V2.5", Disponível em [http://library.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/811733b652456305c2256db40046851e/\\$File/SPACommprot_EN_C.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/811733b652456305c2256db40046851e/$File/SPACommprot_EN_C.pdf). Acesso em 22 de Abril de 2009.
- [32] Echelon Corporation, "Introduction to the LONWORKS System: version1.0", Disponível em <http://www.echelon.com/support/documentation/Manuals/general/078-0183-01A.pdf>. Acesso em 20 de Abril de 2009.
- [33] Echelon Corporation, "What's Free Topology Technology?", Disponível em <http://www.echelon.com/Products/transceivers/ft/aboutfreetop.htm>. Acesso em 22 de Abril de 2009.
- [34] Moxa, "Switches Ethernet", Disponível em http://www.moxa.com/product/IEC_61850_3_Ethernet_Switches.htm. Acesso em 20 de Junho de 2009.
- [35] L. Litwin, "The medium access control sublayer," *IEEE Potentials*, vol. 20, pp. 30-34, 2001.
- [36] Richard Zurawski, "The industrial information technology handbook", Boca Raton, CRC Press. ISBN: 0849319854
- [37] William Stallings, "Data and computer communications", 5th edition. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice-Hall, 1997. ISBN:0-13-571274-2
- [38] Contemporary Control Systems, "The Extension: Introduction to switch technology", Disponível em <http://www.ccontrols.com/pdf/ExtV1N9.pdf>. Acesso em 27 de Maio de 2009.
- [39] EDP - Energias de Portugal, "Sistemas de Protecção, Comando e Controlo Numérico (SPCC) - Protocolos de comunicação e sincronização de data e hora: DEF-C13-504/N", Disponível em <http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Peers/Professionals/Powerstation/Doc/Normativa/DEF.htm>. Acesso em 2 de Junho de 2009.
- [40] S. Gupta and K. W. Ross, "Performance modeling and optimization of interconnected Ethernets," in *INFOCOM '91. Proceedings. Tenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Networking in the 90s., IEEE*, 1991, pp. 1353-1359 vol.3.
- [41] Zhang Qizhi and Zhang Weidong, "Priority scheduling in switched industrial Ethernet," in *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, 2005, pp. 3366-3370 vol. 5.
- [42] Ali Raza, Khalil Ullah, Saleem Ahmed, Salman Ahmed, Hyuk-Soo Jang, and Hyo-Sik Yang, "Gigabit Ethernet based substation under IEC61850 standard," in *Computer, Control and Communication, 2009. IC4 2009. 2nd International Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [43] J. Belagur and R. Schmidt, "IP communication for substation automation, distribution automation, and other utility applications - A business case," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. IEEE/PES*, 2008, pp. 1-9.
- [44] H. Kirrmann and D. Dzung, "Selecting a Standard Redundancy Method for Highly Available Industrial Networks," in *Factory Communication Systems, 2006 IEEE International Workshop on*, 2006, pp. 386-390.
- [45] Contemporary Control Systems, "The Extension: Introduction to Spanning Tree Protocol", Disponível em <http://www.ccontrols.com/pdf/Extv6n5.pdf>. Acesso em 29 de Maio de 2009.
- [46] G. Prytz, "Redundancy in Industrial Ethernet Networks," in *Factory Communication Systems, 2006 IEEE International Workshop on*, 2006, pp. 380-385.

- [47] Cisco, "Rapid Spanning Tree Protocol", Disponível em <http://www.cisco.com/application/pdf/paws/24062/146.pdf>. Acesso em 15 de Junho de 2009.
- [48] T. K. Feuzeu and B. Cousin, "A new scheme for interconnecting LANs with label switching bridges," in *Local Computer Networks, 2005. 30th Anniversary. The IEEE Conference on*, 2005, pp. 303-311.
- [49] K. Elmeleegy, A. L. Cox, and T. S. E. Ng, "Understanding and Mitigating the Effects of Count to Infinity in Ethernet Networks," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 17, pp. 186-199, 2009.
- [50] Su Li, Chen Wentao, Su Haibo, Xiao Zhenyu, Jin Depeng, and Zeng Lieguang, "Ethernet Ultra Fast Switching: A tree-based local recovery scheme," in *Communication Systems, 2008. ICCS 2008. 11th IEEE Singapore International Conference on*, 2008, pp. 314-318.
- [51] Liu Nian, Zhang Jianhua, Zhang Hao, and Liu Wenxia, "Vulnerability assessment for communication network of Substation Automation Systems to cyber attack," in *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PES '09. IEEE/PES*, 2009, pp. 1-7.
- [52] F. Cleveland, "IEC TC57 Security Standards for the Power System's Information Infrastructure - Beyond Simple Encryption," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, 2006, pp. 1079-1087.
- [53] Moxa, "Redes de comunicação integradas na automação de sistemas eléctricos de energia", Disponível em http://www.moxa.com/Zones/Industrial_Ethernet/pa/. Acesso em 20 de Junho de 2009.
- [54] Cisco, "Evolução da tecnologia dos switches de camada 2 e 3", Disponível em http://www.cisco.com/web/about/ac123/ac147/archived_issues/ipj_1-2/switch_evolution.html. Acesso em 15 de Junho de 2009.
- [55] Ruggedcom, "Redes de comunicação para subestações eléctricas de energia", Disponível em http://www.ruggedcom.com/applications/electric_utilities_homepage/. Acesso em 17 de Junho de 2009.
- [56] Ruggedcom, "Switches Ethernet", Disponível em <http://www.ruggedcom.com/products/ruggedswitch/>. Acesso em 20 de Junho de 2009.
- [57] Cisco, "Switches Ethernet", Disponível em <http://www.cisco.com/en/US/products/ps9703/index.html>. Acesso em 20 de Junho de 2009.
- [58] Ruggedcom, "Gauntlet: solução integrada para segurança da rede de comunicação da subestação", Disponível em http://www.ruggedcom.com/products/software/ruggedcom_gauntlet/. Acesso em 20 de Junho de 2009.
- [59] M. Qureshi, A. Raza, D. Kumar, Kim Sang-Sig, Song Un-Sig, Park Min-Woo, Jang Hyuk-Soo, and Yang Hyo-Sik, "A Communication Architecture for Inter-substation Communication," in *Computer and Information Technology Workshops, 2008. CIT Workshops 2008. IEEE 8th International Conference on*, 2008, pp. 577-582.
- [60] A. Raza, K. Ullah, S. Ahmed, Jang Hyuk-Soo, and Yang Hyo-Sik, "Baseline efficiency in EPON based architecture to inter-network substations," in *Computer, Control and Communication, 2009. IC4 2009. 2nd International Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [61] F. Cleveland, "Use of Wireless Data Communications in Power System Operations," in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, 2006, pp. 631-640.
- [62] Transmission and Distribution World, "Digital Substation," Outubro de 2008.
- [63] D. McGinn, V. Muthukrishnan, and M. Adamiak, "Designing copper wiring out of high voltage substations: A practical solution and actual installation," in *Protective Relay Engineers, 2009 62nd Annual Conference for*, 2009, pp. 63-82.