

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

JULIANO CESAR PIMENTEL

**ALTERAÇÃO DA TOPOLOGIA DE REDE CONTROLNET™ PARA
ETHERNET/IP™ PARA A ESTAÇÃO DE CONTROLE MESTRE DE UM
SISTEMA DE PRODUÇÃO SUBMARINO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2013**

JULIANO CESAR PIMENTEL

**ALTERAÇÃO DA TOPOLOGIA DE REDE CONTROLNET™ PARA
ETHERNET/IP™ PARA A ESTAÇÃO DE CONTROLE MESTRE DE UM
SISTEMA DE PRODUÇÃO SUBMARINO**

Monografia de conclusão do curso de Especialização em Automação Industrial do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Automação Industrial.

Prof. M.Sc. Guilherme Alceu Schneider

**CURITIBA
2013**

A Jesus Cristo, em quem todas as promessas de Deus tem o sim,

A minha mãe, minha Diva (*in memoriam*), que fez o seu melhor por mim, e

A Kelly, minha esposa e companheira.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Kelly, por compreender minha busca.

Ao Prof. M.Sc. Guilherme Alceu Schneider por ter me motivado ao curso e após ter me orientado de forma precisa e companheira.

Ao Prof. M.Sc. Sílvio Cezar Bortolini, pelas aulas de Redes Industriais, muito utilizadas neste trabalho.

Aos engenheiros da AkerSolutions, especialmente Thiago Santos, Alexandre Noguchi e Lisandro Lazzarotto, por compartilharem o conhecimento de automação.

À UTFPR por cumprir sua vocação de um ensino tecnológico de qualidade, sendo diferencial na formação de mão de obra qualificada para engenharia.

RESUMO

PIMENTEL, Juliano. **Alteração da topologia de rede de ControlNet™ para Ethernet/IP™ para a estação de controle mestre de um sistema de produção submarino**. 2013. 96 p. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Automação Industrial, UTFPR, Curitiba, 2013.

Este trabalho tem por objetivo propor a alteração da topologia de rede da estação de controle mestre de um sistema de produção composto de equipamentos submarinos controlados na superfície, numa unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência. Apresenta uma visão geral de um sistema de produção submarino, desde sua concepção até o detalhamento do sistema de controles; além de uma visão panorâmica das redes industriais, comparação entre protocolos de comunicação, particularizando a pesquisa aos protocolos sujeitos à alteração proposta, do atual ControlNet™ ao Ethernet/IP™. A razão da alteração reside no fato de as plataformas industriais estarem migrando para uma solução mais integrada e padronizada, no padrão Ethernet e para se antecipar à obsolescência tanto tecnológica quanto de mercado, este estudo propõe tal alteração na estação de controle mestre. Como resultados, apresenta-se o estudo da viabilidade da alteração, o detalhamento de engenharia necessário para tal, bem como a implementação de uma bancada de testes, que servirá, em trabalhos futuros, para validar o estudo, com metodologia baseada em tráfego de dados pela rede, taxa de falha de comunicação e perda de dados numa metodologia para validar a robustez e confiabilidade da solução proposta.

Palavras-Chaves: Estação de Controle Mestre. Modelo ISO/OSI. Topologia de Rede. ControlNet™. Ethernet/IP™. Controladores Lógicos Programáveis.

ABSTRACT

PIMENTEL, Juliano. **Network topology change from ControlNet™ to Ethernet/IP™ for the master control station in a subsea production system.** 2013. 96 p. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Automação Industrial, UTFPR, Curitiba, 2013.

This study proposes the change of the network topology of the master control station in a production system comprising subsea equipment controlled in the topside, in a floating production, storage and offloading unit. It also provides an overview of a subsea production system, from its conception to the control systems detailing; besides the overview of industrial networks, comparing communication protocols, particularly the ones subjected to the proposed change, the current used ControlNet™ and the Ethernet/IP™. The reason behind this proposal resides in the fact of the industrial platforms to be migrating for a more integrated and standardized solution, the Ethernet standard and to avoid both technological and marketing obsolescence, it is proposed such change in the master control station. As results, it is presented the feasibility study of the change, the required engineering detailing as well as a test bench implementation that will serve to validate the results, in future studies, with a methodology based on the network data transfer, communication failure rate and bit error rate to validate the robustness and reliability of the proposed solution.

Keywords: Master Control Station. ISO/OSI Model. Network Topology. ControlNet™. Ethernet/IP™. Programmable Logic Controllers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de Sistema de Produção Submarina.....	18
Figura 2 – Modelo em <i>stack-up</i> e seção em corte de uma ANM.....	21
Figura 3 –ANM posicionada no <i>moon pool</i> da sonda.....	22
Figura 4–Manifold submarino sendo instalado no campo de Roncador.....	23
Figura 5–P&ID do manifold misto instalado no campo de Marimbá Leste	25
Figura 6 – Modelo 3D da tubulação do manifold em vista isométrica	26
Figura 7 – Detalhes da instrumentação do fluxograma do manifold.....	27
Figura 8 – Sistema de controle submarino e seus equipamentos	29
Figura 9 – Visão geral das interfaces do MCS	31
Figura 10 – MCS combinado com EPU no padrão pré-sal.....	33
Figura 11 – Diagrama de blocos do esquema elétrico do MCS	34
Figura 12 – Diagrama unifilar elétrico de uma EPU	35
Figura 13 – Redes segregadas a partir do modem Ethernet-Elétrico.....	36
Figura 14 – Seção em corte de um umbilical de controle.....	36
Figura 15 – Dispositivos de interconexão de redes.....	39
Figura 16 – Topologias de redes industriais.....	42
Figura 17 – Exemplos de meios físicos de transmissão.....	44
Figura 18 – O modelo de referência ISO/OSI.....	45
Figura 19 – Relacionamento entre pacotes e quadros.....	46
Figura 20 – O modelo de referência TCP/IP	50
Figura 21 – O modelo TCP/IP e alguns protocolos utilizados	52
Figura 22 – Formato do quadro Ethernet padrão IEEE 802.3	55
Figura 23 – Exemplo de transmissão utilizando a codificação Manchester	57
Figura 24 – Exemplo de modelo produtor-consumidor.....	60
Figura 25 – Protocolo comum CIP	61
Figura 26 – Exemplo de aplicação com protocolo AS-Interface.....	62
Figura 27 – <i>Stack</i> de comunicação Modbus	63
Figura 28 – Formato do quadro Modbus para meios seriais	63
Figura 29 – Arquitetura CAN definida na ISO 11898.....	65
Figura 30 – Representação física do <i>Bit</i> no protocolo CAN	66
Figura 31 – Formato do quadro CAN padrão	66

Figura 32 – Exemplo de topologia DeviceNet™	68
Figura 33 – Exemplos de produtos DeviceNet™	69
Figura 34 – Objeto identidade de um produto DeviceNet™	70
Figura 35 – Topologias para rede ControlNet™	75
Figura 36 – Definições do CTDMA na rede ControlNet™	76
Figura 37 – Softwares para configuração da rede ControlNet™	78
Figura 38 – Interface gráfica do <i>RSNetWorx</i> para ControlNet™	79
Figura 39 – Modelo de camadas da rede Ethernet/IP™	80
Figura 40 – Estrutura de pacotes para redes <i>CIP</i>	82
Figura 41 – Topologia para uso da rede ControlNet™ no MCS	88
Figura 42 – Topologia para uso da rede Ethernet/IP™ no MCS	89
Figura 43 – <i>SCADA Test Bench</i> para simular MCSs	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Categoria de cabos de pares trançados.....	43
Tabela 2 – Padronização da arquitetura <i>IEEE</i> 802 para <i>LANs</i>	53
Tabela 3 – Características físicas de redes Ethernet.....	57
Tabela 4– Principais comandos do Protocolo Modbus.....	64
Tabela 5 – Características e Funcionalidades do DeviceNet™	68
Tabela 6 – Características e funcionalidades do <i>Foundation Fieldbus</i>	71
Tabela 7 – Velocidades versus distâncias no Profibus-DP	72
Tabela 8 – Características e funcionalidades do ControlNet™	74
Tabela 9 – Custos para componentes de rede ControlNet™	84
Tabela 10 – Custos para componentes de rede Ethernet/IP™	85
Tabela 11 – Especificações técnicas do ControlNet™ e do Ethernet/IP™	86
Tabela 12 – Parâmetros de projeto para a seleção da rede industrial	87

LISTA DE SIGLAS

ANM	Árvore de Natal Molhada
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CI	Completação Inteligente
CIP	<i>Common Industrial Protocol</i>
CPS	<i>Combined Power and Signal</i>
CPU	Unidade Central de Processamento
CRA	<i>Corrosion Resistent Alloy</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CTDMA	<i>Concurrent Time Domain Media Access</i>
DCV	Válvula de Controle Direcional
DCS	Sistema de Controle Distribuído
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DHSV	<i>Downhole Safety Valve</i>
ECOS	Estação de Controle de Operação e Supervisão
EDS	<i>Electronic Data Sheet</i>
EMI	Interferência Eletromagnética
EPU	Unidade de Potência Elétrica
EFL	<i>Jumper Voador Elétrico</i>
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
HFL	<i>Jumper Voador Hidráulico</i>
HP	Suprimento Hidráulico de Alta Pressão
HPU	Unidade de Suprimento Hidráulico
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IQ	Injeção Química

IWCS	<i>Intelligent Well Control System</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
LP	Suprimento Hidráulico de Baixa Pressão
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MEG	Monoetilenoglicol
MCS	Estação de Controle Mestre
NUT	<i>Network Update Time</i>
ODVA	<i>Open DeviceNet Vendors Association</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OPC	<i>OLE for Process Control</i>
OWS	<i>Operator Workstation</i>
P-XO	<i>Pig Crossover Valve</i>
SCM	Módulo de Controle Submarino
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SEM	<i>Subsea Electronic Module</i>
STP	<i>Shielded Twisted Pair</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TUTU	Unidade <i>Topside</i> de Terminação de Umbilical
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
UTU	Unidade Subsea de Terminação de Umbilical
VHIF	<i>Well Downhole Intervention</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA	13
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	14
1.3	PROBLEMA E PREMISSAS	14
1.4	OBJETIVOS	15
1.4.1	Objetivo Geral.....	15
1.4.2	Objetivos Específicos	15
1.5	JUSTIFICATIVA	15
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	16
1.7	EMBASAMENTO TEÓRICO	16
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	SISTEMAS DE PRODUÇÃO SUBMARINA.....	18
2.1	ÁRVORE DE NATAL MOLHADA	20
2.2	MANIFOLD SUBMARINO	23
2.3	SISTEMAS DE CONTROLE SUBMARINO	29
2.3.1	Estação de Controle Mestre	31
3	REDES DE COMUNICAÇÃO.....	37
3.1	REDES DE COMPUTADORES.....	37
3.1.1	Topologia de Redes.....	39
3.1.2	Meios Físicos de Transmissão	42
3.1.3	Modelos de Referência ISO/OSI	45
3.1.4	Modelos de Referência TCP/IP	49
3.2	REDE ETHERNET	53
4	REDES INDUSTRIAIS.....	58
4.1	MODELOS DE REDE	58
4.2	PROTOCOLOS INDUSTRIAIS	60
4.2.1	Principais Protocolos Industriais.....	62
4.3	PROTOCOLO INDUSTRIAL CONTROLNET™	74
4.4	PROTOCOLO INDUSTRIAL ETHERNET/IP™	79
5	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS.....	81
5.1	DADOS PARA A ESCOLHA DA REDE	81
5.2	COMPARAÇÃO ENTRE ETHERNET/IP™ E CONTROLNET™	85
5.3	ARQUITETURA PROPOSTA PARA O MCS	88
5.4	AVALIAÇÃO DAS REDES ATRAVÉS DA BANCADA SCADA	90
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
	REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Um sistema de controle de produção submarino é definido como o sistema de controle que opera um sistema de produção submarina, conforme a ISO 13628-6 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 5). O sistema de controle é o coração de qualquer sistema de produção submarino, e é um item de relativo baixo custo comparativamente aos custos de perfuração, linhas de produção, instalação, entre outros. Entretanto, ignorar sua complexidade, número de componentes e interfaces, pode levar a problemas com instalação e comissionamento, e no longo termo, problemas de confiabilidade (BAI; BAI, 2010, p.12).

Neste trabalho, o enfoque dos sistemas de controle de produção submarinos é dado aos equipamentos submarinos de produção, controlados remotamente a partir de uma estação central na superfície, geralmente localizada em uma unidade estacionária de produção fixa ou flutuante, plataformas semi-submersíveis ou navios do tipo *floating production storage and offloading* (FPSO). Os principais tipos de equipamentos de produção submarinos abordados neste trabalho são a) árvore de natal molhada (ANM) e b) *manifolds*. O conceito e detalhamento destes equipamentos são apresentados no capítulo 2.

Coelho (2005, p. 6) cita que o tempo de missão de um equipamento submarino é uma das principais premissas para a especificação de seu sistema de controle, devido ao alto custo da perda de produção que tem como consequência lucro cessante durante a indisponibilidade ou inoperância do equipamento e também pelo alto custo de intervenção no mar para sua manutenção. O tempo de missão do equipamento determina a confiabilidade dos seus componentes, que por sua vez, influi diretamente na arquitetura do sistema de controle escolhido, determinando processos como redundância, qualificação de componentes e obsolescência.

Atualmente, há dois principais tipos de sistemas de controle utilizados em sistemas de produção *offshore* no Brasil, o hidráulico direto e o eletro-hidráulico multiplexado (COELHO, 2005; THOMAS, 2001). Destes, o sistema que detém maior complexidade e demanda um sistema de controle automático é o segundo, que é o foco deste trabalho. Ademais, pretende-se focar no sistema de controle *topside*

denominado de *Master Control Station* (MCS), residente no FPSO, que é responsável por controlar o módulo eletrônico submarino.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho se limitará à análise da topologia de rede utilizada pelo MCS para se comunicar com seus próprios dispositivos e também com sistemas de terceiras partes, como o sistema de controle distribuído (DCS) do FPSO. Será proposta uma alternativa à atual rede industrial ControlNet™ utilizada no MCS para a rede EtherNet/IP™, com a premissa da alteração apenas dos componentes estritamente necessários, como meio físico e alteração de arquivos de configuração.

Uma extensa e compreensiva comparação entre as duas redes será apresentada, listando os prós e contras, bem como a lista de *hardware* e *software* necessária para cada opção. Finalmente, uma bancada de testes de sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA¹) é apresentada capaz de executar programas com ambas as redes.

1.3 PROBLEMA E PREMISSAS

Considerando-se o tempo de missão como um dos parâmetros mais críticos para a especificação de um sistema de controle, o qual irá determinar critérios como confiabilidade, padronização e obsolescência do sistema, a adequada escolha da rede industrial que permitirá a troca de dados entre dispositivos e sistema é fundamental.

A recente migração para redes e protocolos de comunicação com padrões abertos ao mercado, tem induzido os fabricantes de soluções em automação a migrarem suas soluções para o padrão mais aceito. Atualmente, existe uma tendência de se padronizar o EtherNet/IP™ como rede industrial para as diversas aplicações de chão de fábrica e plantas de processo. Tanembaum e Wetherall (2011, p. 187) dizem que “a Ethernet existe há mais de trinta anos e não tem concorrentes sérios, portanto é provável que continue no mercado ainda por muitos anos.”

¹ Neste caso, o sistema SCADA tem o controle específico do sistema de produção submarino, enquanto o DCS controla todos os processos concernentes ao FPSO, incluindo o sistema submarino.

Isto posto, atualmente mais de setenta por cento dos nós instalados no meio industrial são de alguma rede industrial baseada na Ethernet, o que significa que a tendência para as demais redes é a obsolescência, incluindo-se nesta lista a ControlNet™. Além disto, a rede Ethernet oferece maior velocidade de comunicação, além de instalação, programação e manutenção mais simples, como será visto adiante.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma nova arquitetura de rede para o MCS baseada no padrão EtherNet/IP™ como um potencial padrão da indústria.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os principais conceitos de um sistema submarino de produção, sua interveniência com os sistemas de controle, particularizando o estudo do MCS e sua rede industrial.
- Apresentar os conceitos de redes de computadores, enfatizando o modelo ISO/OSI e introduzir a rede Ethernet à luz deste modelo.
- Comparar as redes industriais, focando nas redes ControlNet™ e EtherNet/IP™, propondo as alterações mínimas necessárias na camada física e configuração para a alteração entre estas redes.
- Apresentar a concepção básica da bancada de testes SCADA, através da qual projetos com ambas as redes podem ser executados e também as características de cada rede poderão ser comprovadas.

1.5 JUSTIFICATIVA

Um importante operador no Brasil está padronizando as aplicações do seu DCS a bordo dos FPSOs do pólo pré-sal para o padrão EtherNet, o que indica uma tendência mercadológica e tecnológica, que aponta o crescimento acumulado anual

de utilização de redes EtherNet para controle de processo na ordem de quinze por cento (15%) (IMS RESEARCH, 2013) . Além disto, com a maior interface entre equipamento de diferentes fornecedores, o uso de redes EtherNet é favorecido devido à convergência de controle e fluxo de dados em uma única rede (ROCKWELL, 2010).

Com o advento das descobertas de campos exploratórios de petróleo no chamado pré-sal, este importante operador nacional pretende produzir diariamente mais de um milhão de barris de petróleo somente devido a esta descoberta (PETROBRAS, 2013), o que demandará um número crescente de sistemas de produção e conseqüentemente seu controle. Dado o esforço deste operador em padronizar suas soluções para a produção em águas ultra profundas, a convergência para a solução EtherNet/IP™ se faz premente.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atendimento dos objetivos propostos, bem como validação da solução, faz-se necessária que a pesquisa tenha um caráter documental e também experimental, se possível.

Este trabalho é classificado como pesquisa científica aplicada explicativa, conforme Manual de Frascati (ORGANIZAÇÃO..., 2007, p. 106), pois têm como objetivo analisar o desempenho de redes industriais em sistemas de controle de processo, que possibilitará uma melhor especificação dos dispositivos e, conseqüentemente aumento da confiabilidade de tais sistemas e diminuição de custos operacionais. A pesquisa descritiva abrangerá as fases: a) pesquisa baseada na revisão da literatura, b) apresentação dos resultados e comentários finais e c) proposta de validação dos resultados numa fase experimental.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Este trabalho está fundamentado no modelo de alta disponibilidade de um sistema e implementação de seu serviço associado que garante que um desempenho operacional pré-acordado será alcançado durante um período

mensurado (PIEDAD, 2001) e nas padronizações promovidas pelo modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) – ISO/IEC 7498-1.

O modelo de sistema de controle multiplexado de produção apresentado por Coelho (2005) e Bai e Bai (2010) será utilizado neste trabalho, bem como a padronização de redes industriais e de computadores conforme apresentado por Tanenbaum e Wetherall (2006) e pela fabricante Rockwell (2010).

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está subdividido em 5 (cinco) capítulos, dispostos da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – Introdução, que contém apresentação do tema, problema, objetivos, justificativa e embasamento teórico.
- Capítulo 2 – Visão de um sistema de produção submarino, apresentando desde sua concepção, seus principais equipamentos, até seu sistema de controle e particularizando no estudo do MCS.
- Capítulo 3 – Revisão bibliográfica sobre redes de comunicação, apresentado o modelo de camadas ISO/OSI, principais equipamentos de uma rede de computadores, meio físico utilizado e visão *in-depth* da rede Ethernet.
- Capítulo 4 – Revisão sobre redes industriais, mostrando suas principais arquiteturas e particularizando na comparação entre as redes ControlNet™ e Ethernet/IP™.
- Capítulo 5 – Implementação e resultados obtidos, que propõem a alteração de topologia entre as redes e avalia o impacto da sua alteração.
- Capítulo 6 – Considerações finais e propostas de estudos futuros.

2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO SUBMARINA

Um sistema de produção submarina é definido como um conjunto de instalações submersas destinadas à elevação, injeção e escoamento dos fluidos produzidos e/ou movimentados em um campo de petróleo ou gás natural (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2006). O projeto de desenvolvimento de um campo visa a maximização da recuperação de petróleo e um custo mínimo operacional e de investimento de capital.

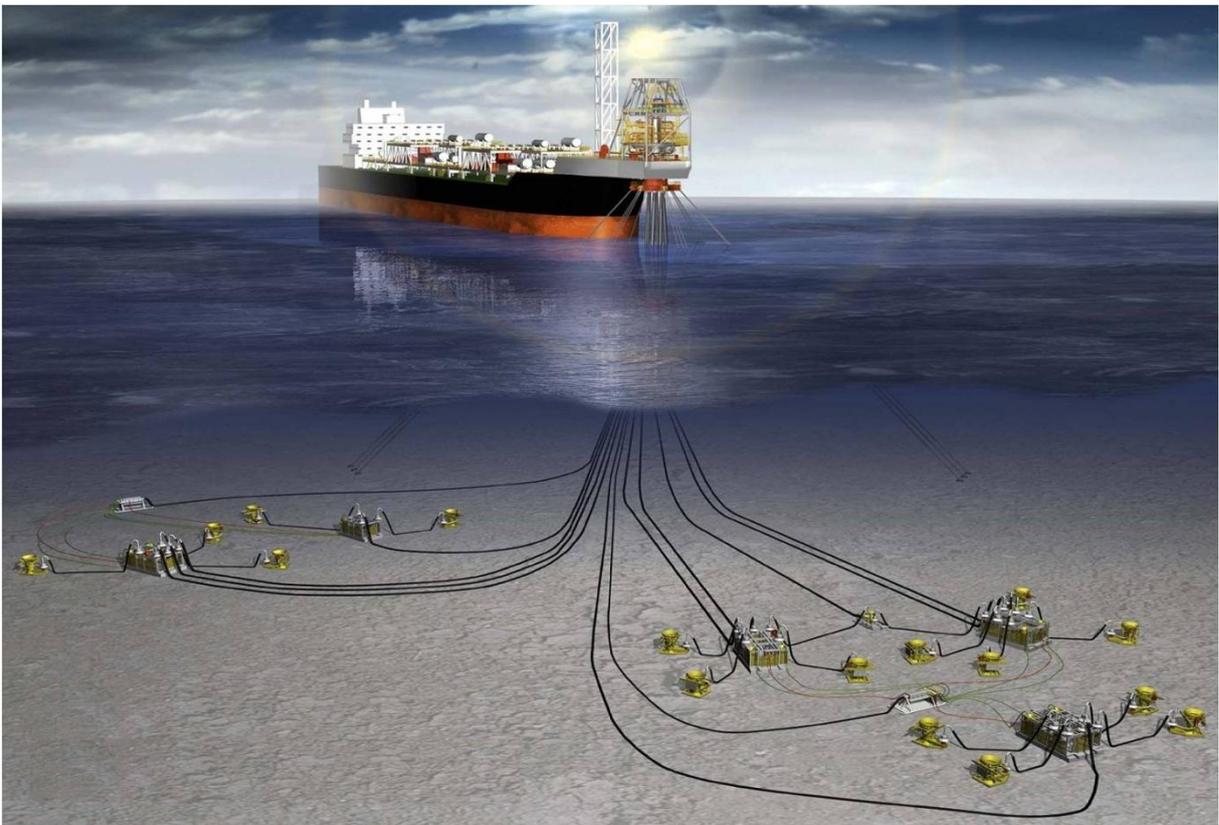


Figura 1 - Exemplo de Sistema de Produção Submarina
Fonte: Shell Bijupira e Salema (2004)

Geralmente a definição de viabilidade técnica e comercial de um sistema de produção submarina é precedida por uma série de etapas que variam de acordo com a regulamentação de cada país ou região. No Brasil, a Agência Nacional de Petróleo (ANP) regulamenta e controla contratos de concessão de exploração e produção de hidrocarbonetos na costa brasileira. Estes contratos são celebrados em rodadas públicas de licitações e concessões, aonde empresas que tenham comprovada capacidade técnica e financeira podem participar de leilões por determinados blocos exploratórios.

A empresa que geralmente paga o maior bônus de assinatura por determinada concessão, recebe o direito de explorar tal bloco, segundo um programa exploratório mínimo, de acordo com as regras da ANP. Estas regras são definidas no contrato de concessão (AGÊNCIA..., 2013), e são minimamente a) as fases de levantamentos sísmicos 2D e 3D, b) avaliação das descobertas por meio de testes de produção, que podem conduzir a uma declaração de comercialidade, que viabilizará c) o desenvolvimento do bloco e, por fim d) sua produção.

A avaliação sísmica geralmente utiliza o método sísmico de reflexão (THOMAS, 2001), que utiliza canhões de ar comprimido e hidrofones com cristais piezoelétricos que traduzem em corrente elétrica a variação de pressão produzida pelas ondas acústicas na água. O sismógrafo então fornecerá os dados necessários para um levantamento marítimo 3D e possibilidade do levantamento do perfil geológico da área explorada.

Para determinadas áreas identificadas favoráveis à acumulação de petróleo através do estudo sísmico, decide-se então por uma campanha exploratória que compreenderá a perfuração de um poço pioneiro, a partir do qual se fará a análise do perfil do poço (perfilagem), de onde se obtém informações como litologia (tipo da rocha), espessura, porosidade, prováveis fluidos existentes nos poros e suas saturações. Para os poços que indiquem presença de hidrocarbonetos, a próxima etapa é o teste de formação, isto é, a colocação do poço em fluxo.

Na fase de teste de formação, objetiva-se identificar os fluidos contidos na formação, verificação da pressão estática e da existência de depleção (queda de pressão do reservatório a medida que o fluido do reservatório vai sendo produzido), produtividade da formação além da amostragem de fluidos para PVT (pressão, volume e temperatura). Nesta fase do processo, mobiliza-se uma sonda (flutuante, posicionamento dinâmico, fixa, etc.) e um conjunto de ferramentas que possibilitarão alcançar as informações previamente descritas. Quando o resultado do teste de formação é satisfatório, é necessário deixá-lo em condições de operar, de forma segura e econômica, durante toda a sua vida produtiva. Ao conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir óleo e gás (ou ainda injetar fluidos no reservatório) denomina-se completação. (THOMAS, 2001, p. 137)

Durante a completação, após processos de revestimento do poço, instalação de coluna de produção e equipamentos e ferramentas de operação e manutenção do poço, como válvulas de segurança, obturadores de vedação, mandris para afixação

de válvulas de controle e de injeção de gás, o poço recebe na sua parte superior, no leito submarino, um equipamento chamado cabeça de poço, que tem como função primordial a vedação das colunas de revestimento, bem como servir de ancoragem para elas.

A partir daí, inicia-se a fase de instalação e comissionamento dos equipamentos submarinos, tais como a árvore de natal molhada (ANM), manifolds, sistemas de conexão e outros.

2.1 ÁRVORE DE NATAL MOLHADA

Conforme a API 6A (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2004, p. 10), árvore de natal é um equipamento composto de subpartes, incluindo base adaptadora de produção, válvulas, conexões, conectores mecânicos e *chokes* todos conectados à parte superior da base de produção, utilizada para controlar a produção do poço. Ainda, de acordo com Thomas (2001, p. 138), árvore de natal é um equipamento constituído por um conjunto de válvulas que é acoplado à cabeça de poço, com o objetivo de controlar e permitir a produção de fluidos; e ainda conforme o mesmo autor (2001, p. 160), a árvore de natal molhada (ANM) é um equipamento instalado no fundo do mar, constituído basicamente por um conjunto de válvulas tipo gaveta, um conjunto de linhas de fluxo e um sistema de controle interligado a um painel localizado na plataforma de produção.

A figura 2 mostra uma ANM montada com todas as suas partes, em *stack-up*, e a sua seção em corte do bloco principal e anular e suas válvulas gavetas. As principais válvulas de uma ANM que podem ser comandadas mecanicamente por *override* ou atuadores hidráulicos são:

- M1 (*master1*) – válvula mestra de produção;
- W1 (*wing1*) – válvula lateral de produção;
- M2 (*master2*) – válvula mestra do anular;
- W2 (*wing2*) – válvula lateral do anular;
- XO (*crossover*) – válvula de interligação;
- S1 (*swab1*) – válvula de pistoneio da produção;
- S2 (*swab2*) – válvula de pistoneio do anular.

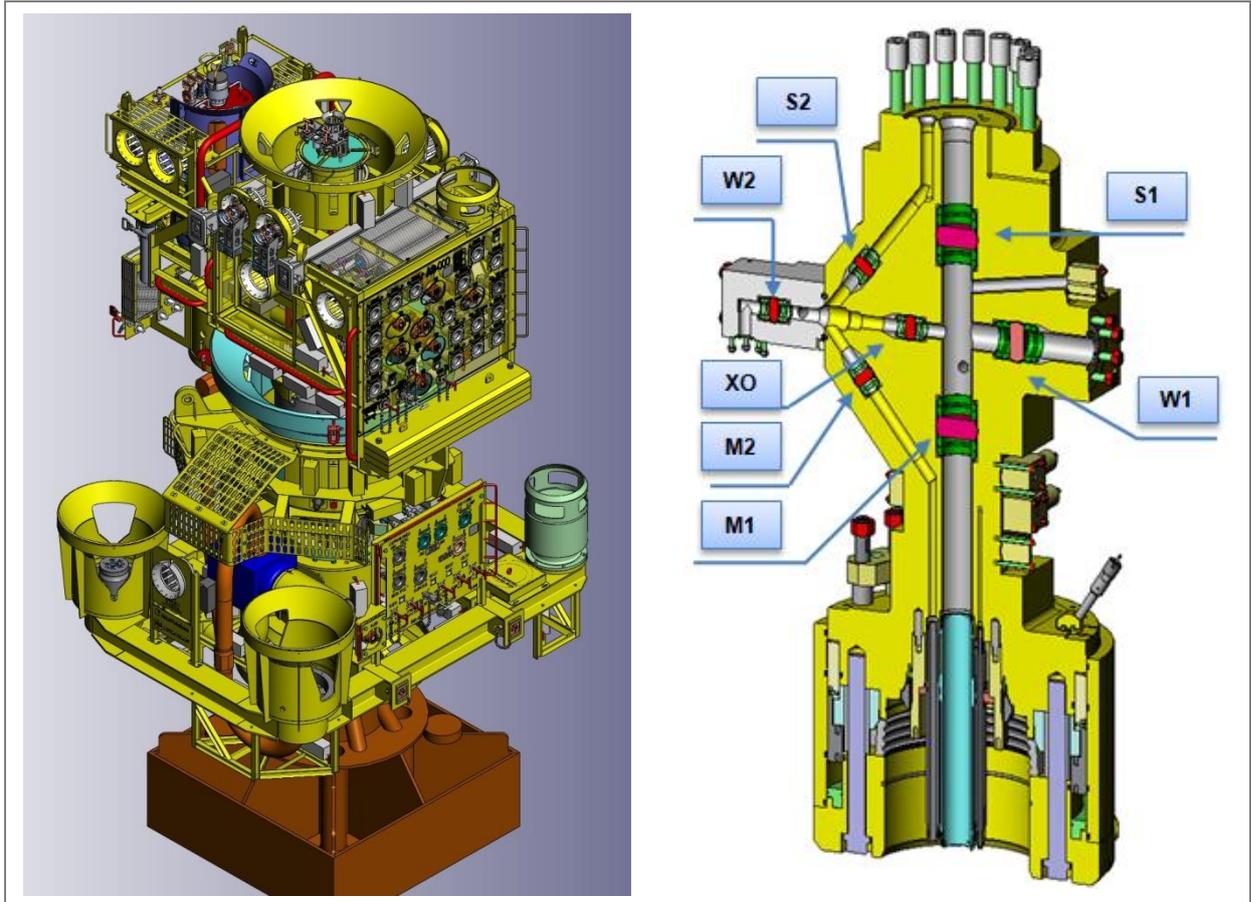


Figura 2 – Modelo em *stack-up* e seção em corte de uma ANM
 Fonte: AkerSolutions (2012)

Além das válvulas descritas acima, que podem ser atuadas pelo sistema de controle multiplexado, por meio de atuadores hidráulicos, outras válvulas que tem a função de segurança e de serviço no poço também são controladas pelo sistema de controle:

- DHSVs (*downhole safety*) – válvulas de segurança de fundo de poço;
- VHIFs (*downhole isolation*) – válvulas de isolamento de fundo de poço;
- IQs (*chemical injection*) – válvulas de injeção química;
- CIs (*intelligent completion*) – válvulas de completção inteligente;
- P-XO (*pig crossover*) – válvula de interligação para passagem de *pig*;

As válvulas descritas apresentam diferentes diâmetros nominais, variando entre $5\frac{1}{8}$ ", $2\frac{1}{16}$ " e 1". Geralmente, as válvulas gaveta com atuadores são do tipo *fail safe close*, com relação à posição de segurança por falhas, isto é, no evento de falha mecânica do atuador ou por falha no sistema de suprimento, a válvula assumirá a posição fechada (BEGA, 2011, p. 640).

Como a função primária da ANM é o controle da produção do poço, a monitoração de variáveis do processo como pressão, temperatura e por vezes vazão, erosão, detecção de areia e outros se fazem necessário. A instrumentação mínima vista nas ANMs com sistema de controle multiplexado instaladas no Brasil pelo seu maior operador é composta por transdutores de pressão, temperatura e transdutores combinados de pressão e temperatura, estes usados tanto para a ANM quanto como sensores de fundo de poço (*downhole*).



Figura 3 –ANM posicionada no *moon pool* da sonda
Fonte: AkerSolutions (2013)

A amostragem dos sensores instalados na ANM e no fundo de poço fornece juntamente com a monitoração de estados das válvulas a condição do sistema, e é portanto, fundamental para a operação do sistema de produção.

Uma vez que o poço esteja completado e pronto para produzir, pode-se conectá-lo a diversos outros poços por meio de um manifold, que irá então transferir a produção recebida para uma unidade fixa ou móvel ou até mesmo, diretamente para plantas de processamento *onshore*.

2.2 MANIFOLD SUBMARINO

Conforme a API 17P (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013, p. 5), um manifold submarino é sistema de tubulações principais, tubulações ramificadas e válvulas utilizadas para coletar os fluidos produzidos ou para distribuir fluidos injetados em sistemas de produção de óleo e gás submarinos.

O manifold é um equipamento roteador de fluxo que é conectado entre a ANM e as linhas de produção. Ele é utilizado primariamente para otimizar o arranjo submarino e reduzir a quantidade de *risers* de produção conectados a plataforma. Os *risers* de produção consistem de dutos condutores conectados entre plataformas de produção ou FPSOs e os equipamentos submarinos, como os manifolds.



**Figura 4—Manifold submarino sendo instalado no campo de Roncador
Fonte: FMC Technologies (2002)**

Segundo Bai e Bai (2010, p. 18), o manifold é um arranjo de tubulações e/ou válvulas, projetados para combinar, distribuir, controlar e monitorar o fluxo do fluido.

Manifolds submarinos são instalados no fundo do mar compreendendo um conjunto de poços para coletar produção ou para injetar água ou gás nos poços.

O manifold pode ser ancorado no leito submarino com estaqueamento ou com uma saia estrutural que penetrará na linha de lama (*mudline*). O tamanho do manifold será ditado pelo número de poços e vazão, assim como pelo arranjo definido para o sistema.

Os tipos de manifold submarinos podem ser classificados como: produção, injeção de gás (*gas lift*), injeção de água, de elevação artificial (*artificial lift*) ou mistos (quando combinam dois ou mais tipos). A figura 5 mostra um P&ID (*process and instrumentation diagram*) de um manifold misto instalado no campo de Marimbá Leste, na bacia de Campos. Ele recebe a produção de cinco poços satélites de produção de óleo e controla a injeção de água de quatro poços (sendo dois em configuração *piggyback*).

As principais vias do arranjo de tubulações do manifold são chamadas de *headers*, sendo que o fluxograma mostrado na figura 5 indica a existência de quatro *headers*: produção de óleo, injeção de água, ambos com diâmetro nominal de 8½” (representados em vermelho e rosa respectivamente), *gas lift*, com diâmetro de 6¾” (em azul) e o *header* de serviço, com diâmetro de 4” (em verde).

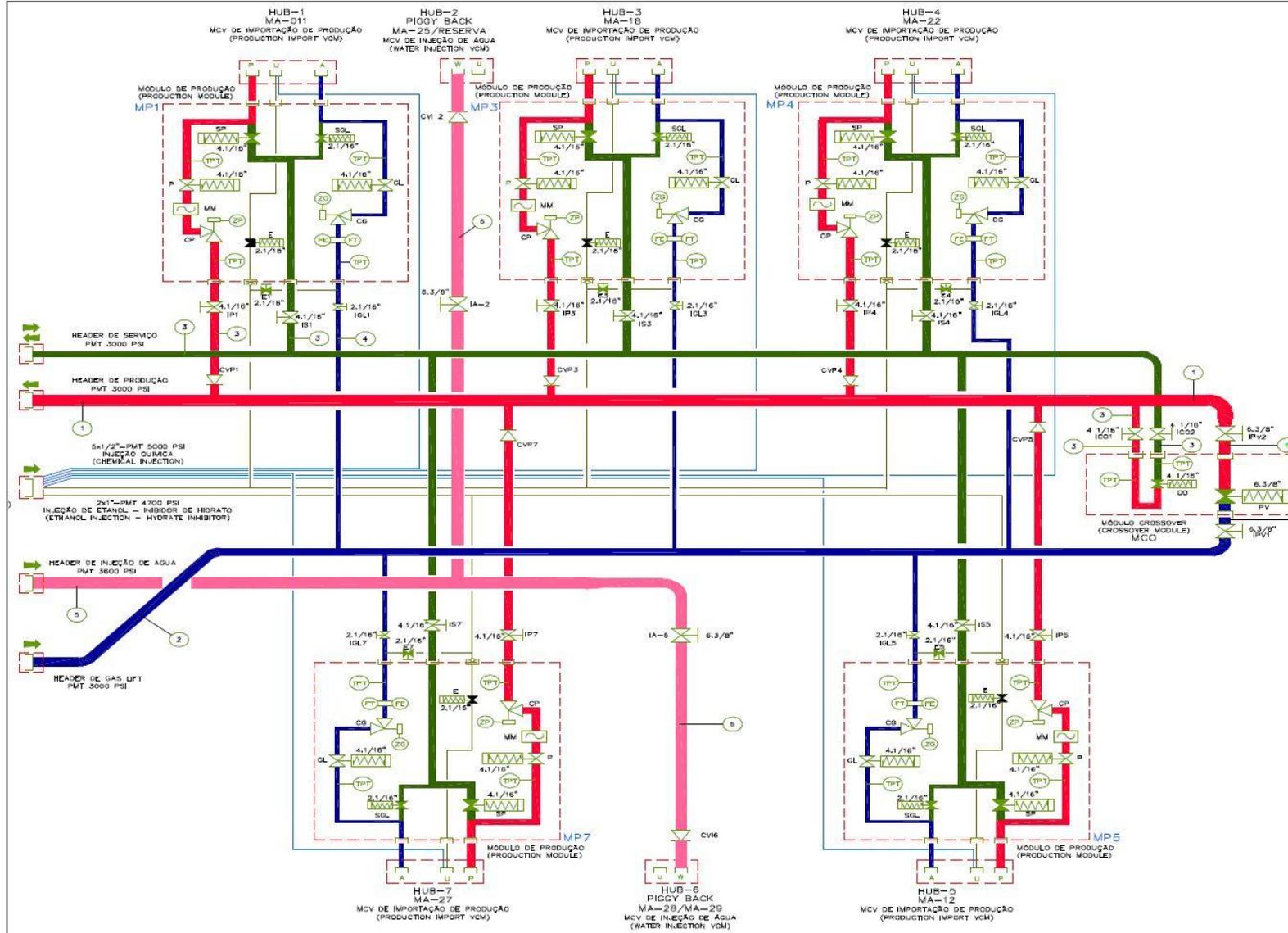


Figura 5—P&ID do manifold misto instalado no campo de Marimbá Leste
Fonte: FMC Technologies (2004)

A figura 6 mostra o modelo 3D da tubulação do manifold em vista isométrica. As terminações dos *headers* são chamadas de *hubs* e recebem, neste sistema, módulos de conexão vertical (MCV), que interligarão o manifold às ANMs através das linhas de fluxo; à plataforma para exportação do óleo, através dos risers de produção e também à unidade de suprimento eletro-hidráulico, através dos umbilicais.

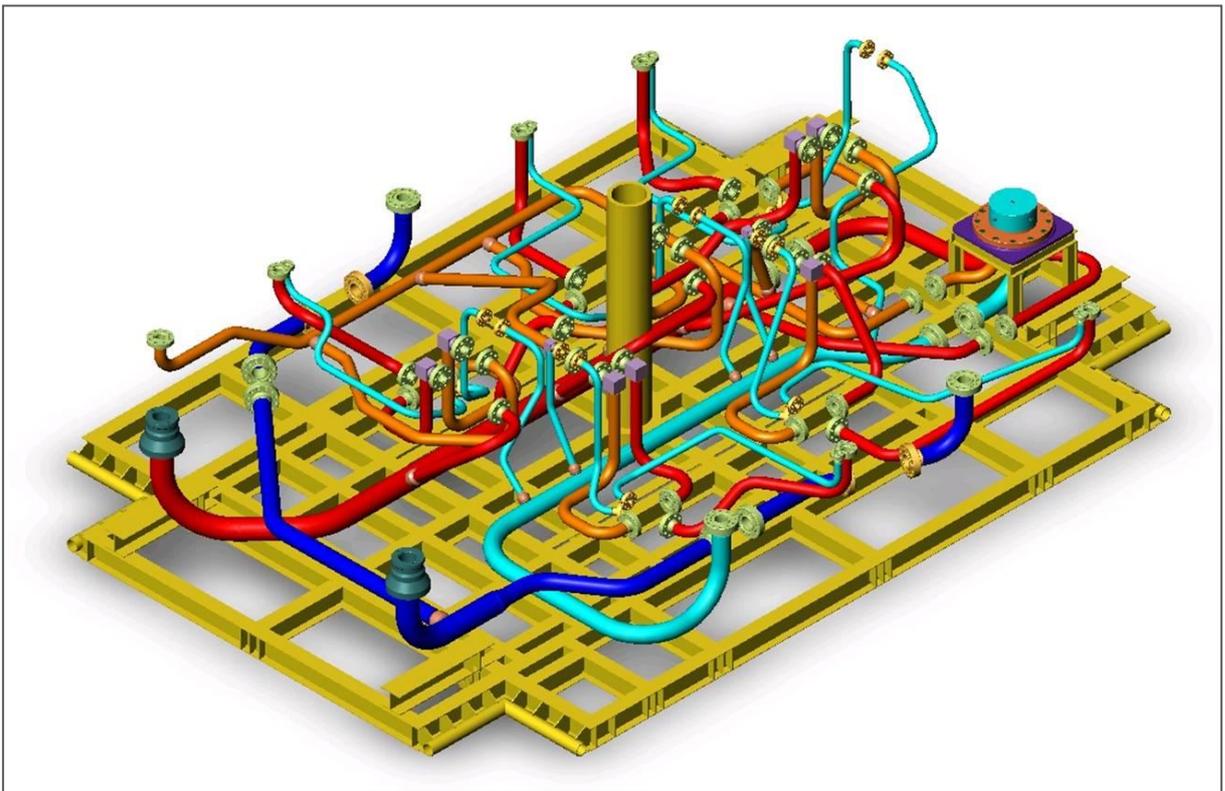


Figura 6 – Modelo 3D da tubulação do manifold em vista isométrica
Fonte: FMC Technologies (2004)

Similarmente ao que ocorre nas ANMs, a atuação eletro-hidráulica das válvulas do manifold, assim como a monitoração de variáveis do processo é fundamental para garantir a confiabilidade e especificação do sistema.

As válvulas utilizadas nos manifolds podem ser do tipo gaveta, esfera, de retenção ou *chokes*. A válvula *choke* é um tipo de válvula de controle, principalmente utilizada em poços de produção de óleo e gás para controlar a vazão da produção. Sua outra função é interromper a pressão vinda do reservatório e regular a pressão a jusante nas linhas de fluxo. As válvulas devem ser projetadas e testadas para atender as normas API 6A, API 17D, e recentemente API 17P, e o critério de seleção deve levar em conta os critérios de serviço e dados de projeto. Como

exemplo, as válvulas de bloqueio utilizadas nos *headers* podem ser tanto gaveta quanto esfera, enquanto que as utilizadas nos ramais devem necessariamente ser gaveta. As válvulas do manifold podem ser *fail safe close* ou *fail safe open*, com respeito ao modo de falha segura, dependendo da função da válvula.

A figura 7 mostra trechos do fluxograma destacando a instrumentação e válvulas representando a necessidade do controle do processo.

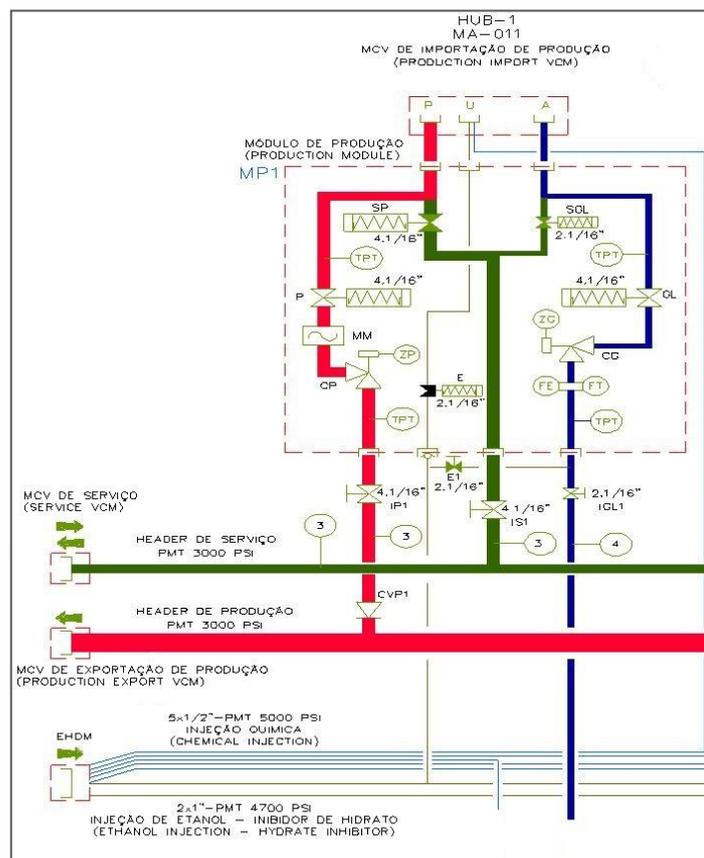


Figura 7 – Detalhes da instrumentação do fluxograma do manifold
Fonte: FMC Technologies (2004)

Uma planta de produção de petróleo é como qualquer outra planta de processo, tal qual uma refinaria, por isto, a utilização de injeção química em alguns pontos e momentos do processo se faz necessário. Para equipamentos submarinos, segundo Bai e Bai (2010, p. 16) e Devold (2010), temperaturas submarinas baixas, formação de condensados, parafinas, vida marinha e outros podem comprometer a viabilidade de desenvolvimento dos projetos. Alguns dos compostos químicos mais utilizados na indústria submarina podem ser listados:

- Produtos para estimulação da formação, como ácidos clorídrico e fluorídrico, como o *mud acid regular* (12% HCl e 3% HF), e o HCl a 15%, conforme Thomas (2001, p. 168);
- Inibidores de corrosão, quando da presença de CO₂ geralmente acima de 3% no fluido, para preservar tubulações que não sejam *corrosion resistant alloys* (CRA);
- Inibidores de hidrato, usualmente para tratamento de bateladas nos processos de início e fechamento do poço. Sempre que há, também, resfriamento das linhas de produção devido às baixas temperaturas submarinas, há a possibilidade de formação do hidrato, devido ao rápido resfriamento da mistura gás e água. Geralmente injeta-se Methanol ou Monoetilenoglicol (MEG) na razão entre 20% a 40% da água produzida pelo poço.
- Inibidores de parafina, que previnem a formação de conteúdo de cera que pode impedir o óleo de fluir pelas linhas de produção. Geralmente num poço produzindo a 10.000 BOPD (barris de óleo por dia), o inibidor de parafina pode ser injetado na proporção de 30.000 galões por ano, garantindo uma concentração de 200 ppm (partes por milhão) no fluido produzido.

Pela complexidade do processo e componentes no manifold, faz-se necessário que o sistema de controle do equipamento seja projetado para controlar e monitorar as válvulas de atuação hidráulica e seu estado, assim como as variáveis do processo. A variedade de sensores e atuadores no sistema de controle de um manifold depende de seu projeto, mas tipicamente podem-se listar na instrumentação:

- transdutores de pressão, temperatura e transdutores combinados de pressão e temperatura, similares ao utilizados nas ANMs. Estes sensores, devido ao critério de disponibilidade e confiabilidade são duais, isto é, apresentam redundância algumas vezes de elemento sensor, outras vezes do transdutor elétrico, algumas vezes ambos.
- Medidor de vazão (*flowmeter*), também dual;
- Indicador de posição do *choke*, utilizando o princípio do transdutor de indutância variável, neste caso o transformador diferencial linear variável (LVDT);

Portanto, a operação do sistema de produção submarino será feito a partir do seu sistema de controle distribuído subsea e topside.

submarino (SCM) e outros. As definições dos principais equipamentos são apresentadas a seguir:

- EPU: fornece comunicação e potência elétrica dual e monofásica para o sistema submarino através do umbilical de controle e trata-se da interface entre o MCS e o SCM.
- MCS: provê a interface entre o operador e o equipamento *subsea*. Trata-se do sistema de controle e atuação, podendo ser baseado em programadores lógicos programáveis (PLC), com uma interface homem-máquina (HMI). Maiores detalhes sobre o MCS serão apresentados na próxima seção deste capítulo.
- HPU: unidade que fornece fluido hidráulico filtrado e regulado para as instalações submarinas. Estas unidades geralmente são controladas remotamente pelo MCS, e fornecem suprimento hidráulico tanto para as linhas de baixa pressão (LP) quanto para as linhas de alta pressão (HP).
- HFL: do inglês, *hydraulic flying lead*, o HFL transporta suprimento hidráulico ou químico entre equipamentos submarinos.
- EFL: do inglês, *electrical flying lead*, o EFL conduz sinal e/ou potência elétrica entre equipamentos submarinos. Dependendo do protocolo utilizado, num mesmo par de cabos, geralmente trançado para minimizar a interferência eletromagnética (EMC), pode-se enviar e receber dados e energização.
- SCM: do inglês, *subsea control module*, o SCM é uma unidade recuperável independente. Trata-se de um sistema multiplexado, que ao receber duas linhas redundantes de suprimento hidráulico, duas LP e duas HP, pode-se fornecer geralmente, entre 20 e 40 funções hidráulicas para os equipamentos a jusante. As funções hidráulicas básicas providas pelo SCM são as funções listadas na seção 2.1 e também no caso dos manifolds, na seção 2.2.

2.3.1 Estação de Controle Mestre

Conforme a ISO 13628-6 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 26), uma estação de controle mestre, ou do inglês, *master control station* (MCS), é a unidade que controla e monitora um sistema de produção submarina. Este sistema pode variar em complexidade de um painel hidráulico manual para um sistema automático computadorizado. Como um sistema automático computadorizado, ele pode ser configurado de três maneiras possíveis:

- Totalmente integrado ao sistema de controle distribuído (DCS);
- Como um terminal *stand-alone* sendo a interface primária para o sistema de controle submarino; ou
- Com um terminal *stand-alone* com interface tanto com o DCS quanto com os equipamentos submarinos. O DCS é a interface primária para os operadores e o MCS é a secundária, mas capaz de realizar o controle submarino caso o DCS ou o *link* com ele caia.

A figura 9 exemplifica algumas interfaces e funcionalidades do MCS.

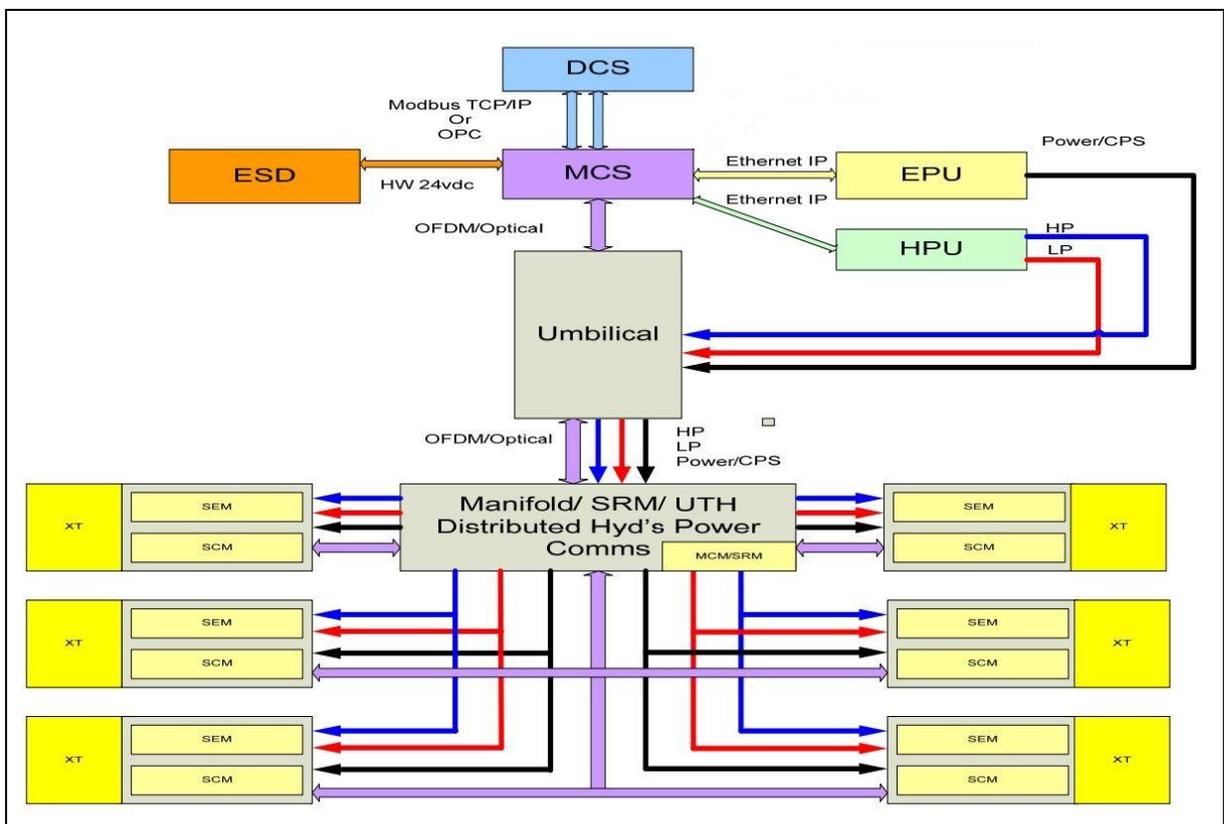


Figura 9 – Visão geral das interfaces do MCS
 Fonte: AkerSolutions (2008)

Nesta figura nota-se um arranjo submarino típico com manifold e sistema de distribuição eletro-hidráulico controlando seis ANM com SCM, isto é, com funções multiplexadas. A interface de controle entre *topside* e *subsea* é feita através de umbilical que transporta potência elétrica, sinal de monitoração e comando elétrico ou óptico e suprimento hidráulico. Na superfície, o MCS monitora e controla os equipamentos submarinos e faz interface com os demais equipamentos de superfície.

Note-se que atualmente no padrão pré-sal a interface entre o MCS e o DCS está sendo padronizado no protocolo OPC. OPC, do inglês, *OLE for Process Control*, onde *OLE* significa *Object Linking and Embedding*, é um protocolo de comunicação, mantido pela *OPC Foundation*, para automação industrial que especifica a comunicação em tempo real entre dados de dispositivos de controle de diferentes fornecedores. No caso da figura 9, o MCS é configurado como um servidor *OPC* e o DCS (ou outra terceira parte) como cliente *OPC* e se comunicam via conexão Ethernet.

Uma das funções do MCS é prover condições de *shutdown* controlado, isto é, levar o sistema a uma condição segura, por isto faz interface com o *emergency system shutdown* (ESD) da unidade de produção, neste caso o FPSO. Existe uma interface de E/S (entradas e saídas) digitais e analógicas entre o MCS e o sistema de ESD da unidade, conforme também mostrado na figura 9.

O MCS tem interface com a EPU e também com HPU. Com a HPU, ele pode controlar as funções principais de acionamento de bombas, enchimento, recirculação; pode habilitar uma linha de suprimento, mas principalmente tem a interface Ethernet para controles de ESD, que caso comandado, desabilita o suprimento hidráulico quando necessário. Através da sua interface com a EPU, provê potência combinado com o sinal, *combined power and signal* (CPS). Esta interface MCS-EPU, e seus componentes são vistos mais detalhadamente abaixo. O MCS pode estar fisicamente segregado da EPU, ou como no caso da figura 10, suas funcionalidades podem ser combinadas num mesmo *rack*, diminuindo *footprint* necessário na sala de controle do FPSO.

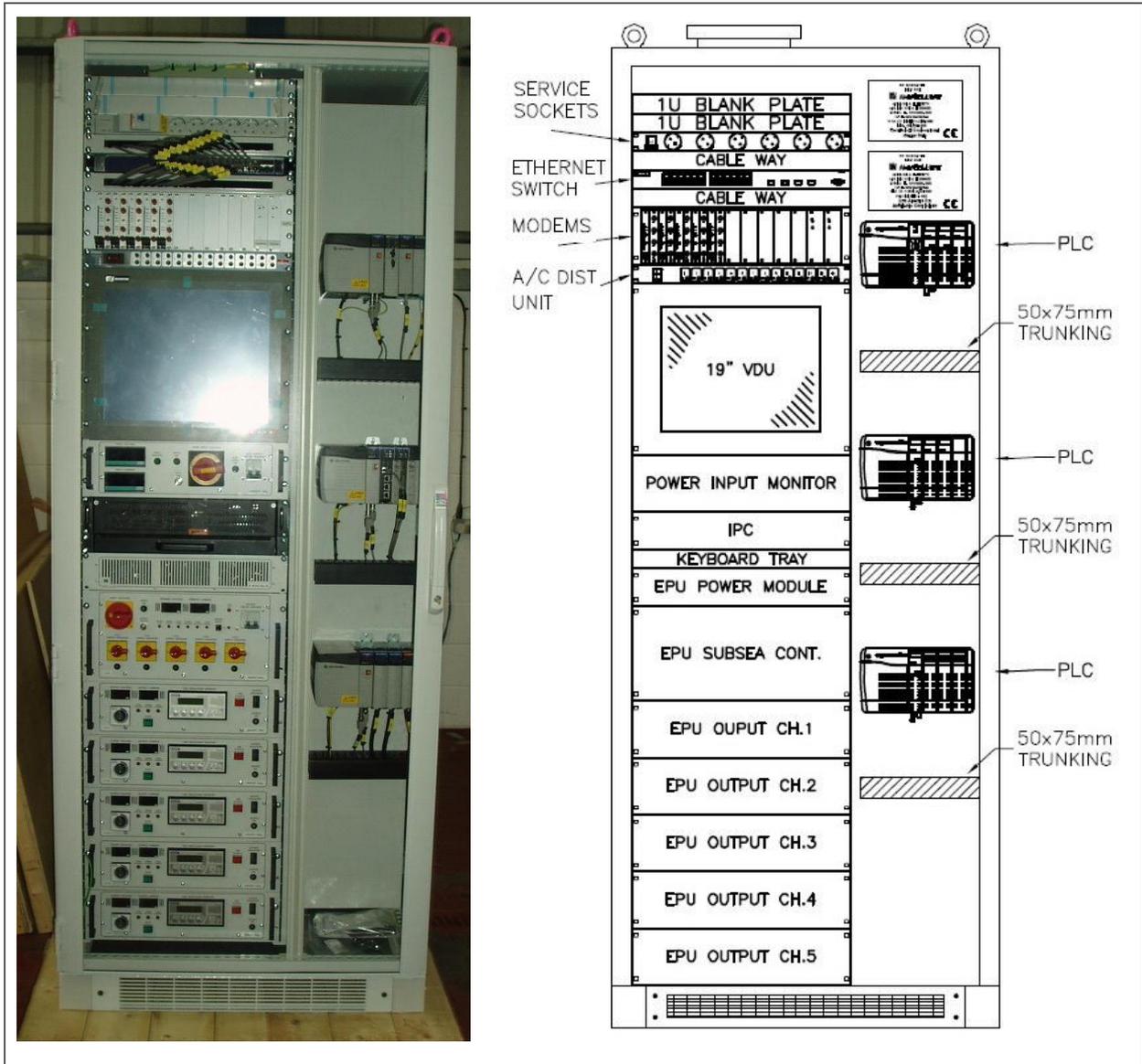


Figura 10 – MCS combinado com EPU no padrão pré-sal
 Fonte: AkerSolutions (2012)

O projeto mostrado na figura acima tem requisito de redundância física e lógica, portanto duas cabines como esta são necessárias, interligadas de tal modo que o CLP (Controlador Lógico Programável) da cabine MCS A seja o mestre (em *status de controlador de CLP primary*) e o MCS B seja o escravo (em *status sync*), através de um cartão de redundância interligados através de fibra óptica. A figura 11 mostra o diagrama de blocos do esquema elétrico destas cabines.

A figura 11 mostra a interface entre MCS e EPU para o hardware da figura 10, onde a EPU é responsável por receber a entrada em tensão alternada do FPSO, e alimentar os módulos tanto da própria EPU quanto do MCS, além disto, é na EPU

que o sinal do modem Ethernet-elétrico é combinado através de filtros com a tensão de alimentação dos SCMs *subsea*.

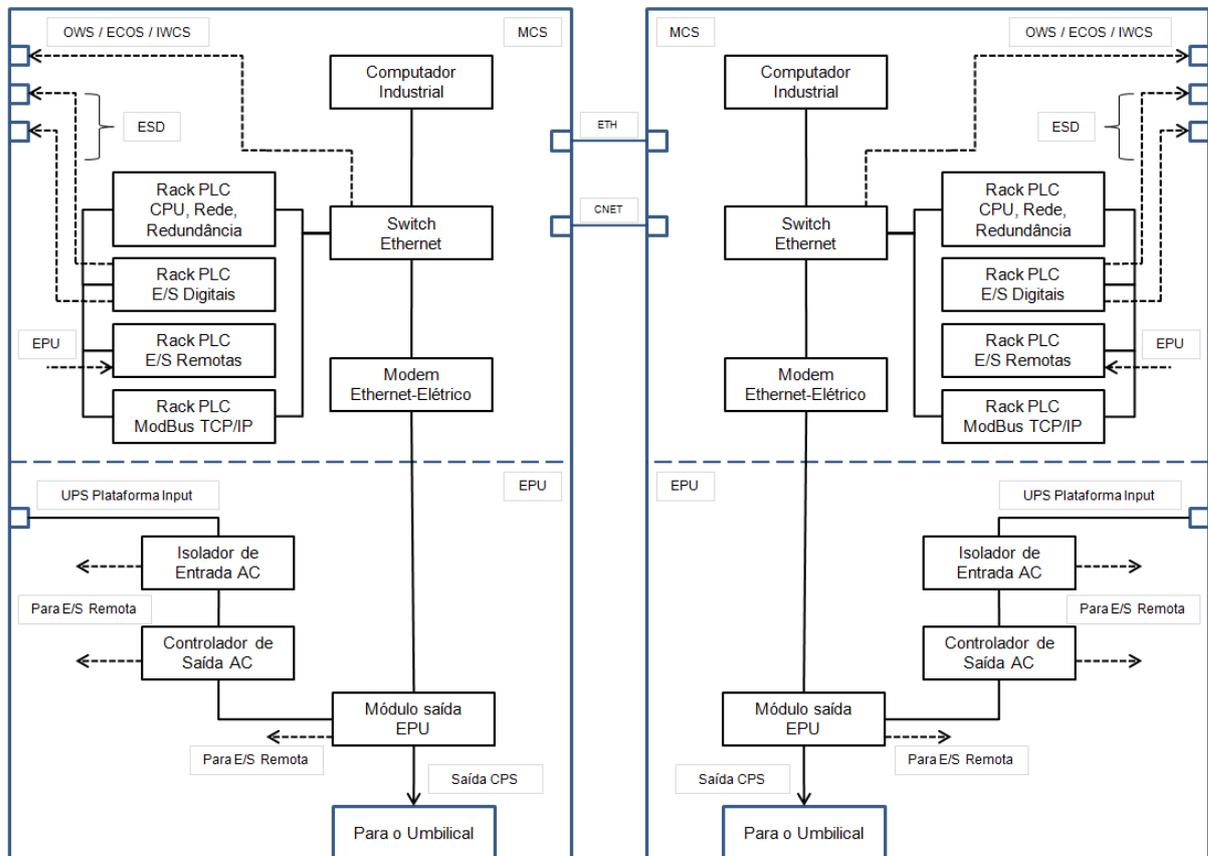


Figura 11 – Diagrama de blocos do esquema elétrico do MCS
Fonte: AkerSolutions (2012)

O SCM submarino possui um modem idêntico ao do MCS-EPU numa configuração mestre-escravo, via CPS. No caso desta aplicação, o modem *topside* envia sinais de controle para o equipamento submarino e recebe, do mesmo, dados para sua monitoração e tomada de decisão. Os sinais enviados são recebidos do CLP do MCS, sinais estes que podem ser comandados através da interface homem-máquina (HMI) do MCS ou de dispositivos de terceira parte, como o ESD ou o DCS, conforme figura 9. Os sinais recebidos vêm da mesma forma, conduzidos através do umbilical de controle, numa rede de comunicação de par de cabos trançados *half duplex*. A figura 12 mostra o diagrama unifilar elétrico básico de uma EPU, com interfaces com o FPSO, MCS e umbilical submarino, e como a composição do sinal com a potência é feito.

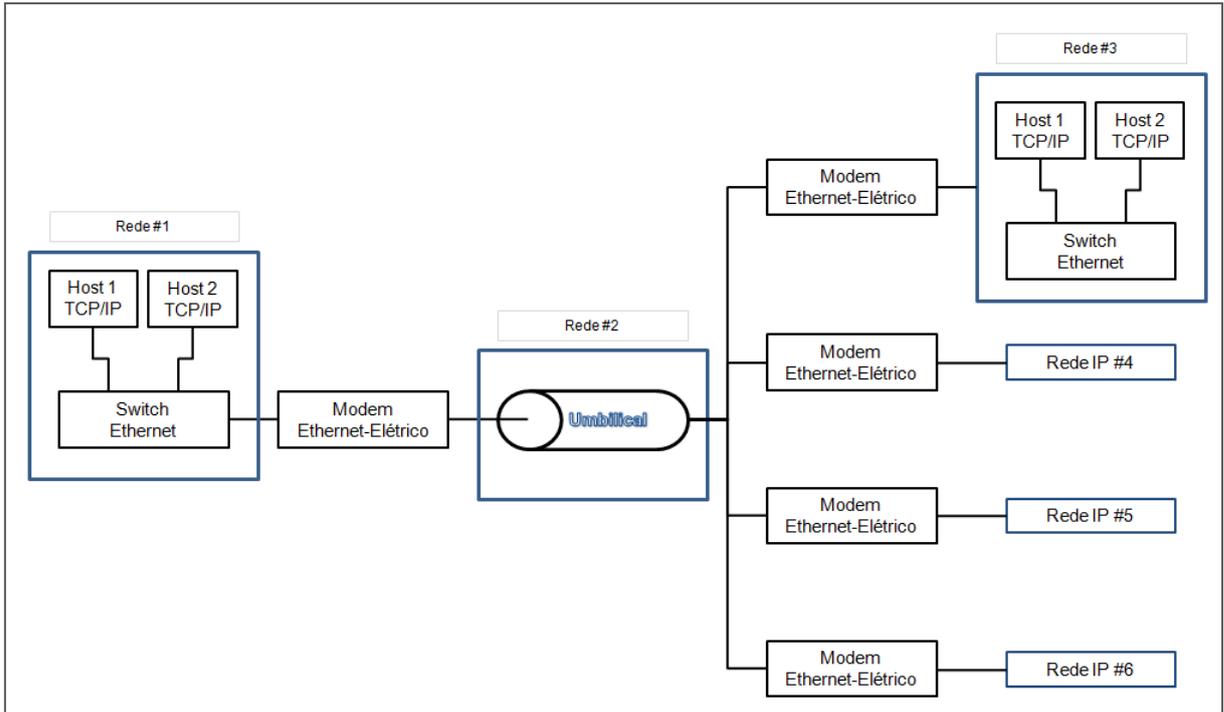


Figura 13 – Redes segregadas a partir do modem Ethernet-Elétrico
Fonte: O Autor (2013)

O conceito CPS é utilizado em aplicações submarinas para minimizar a quantidade de condutores utilizados na aplicação e conseqüentemente diminuir o diâmetro externo do umbilical de controle. A figura 14 mostra um exemplo de um umbilical de controle, que utiliza além de condutores elétricos trançados em pares ou em quadras, neste caso quadras, tubos de aço inoxidáveis de material de metalurgia nobre *duplex* ou *super duplex*, com excelente resistência à corrosão.

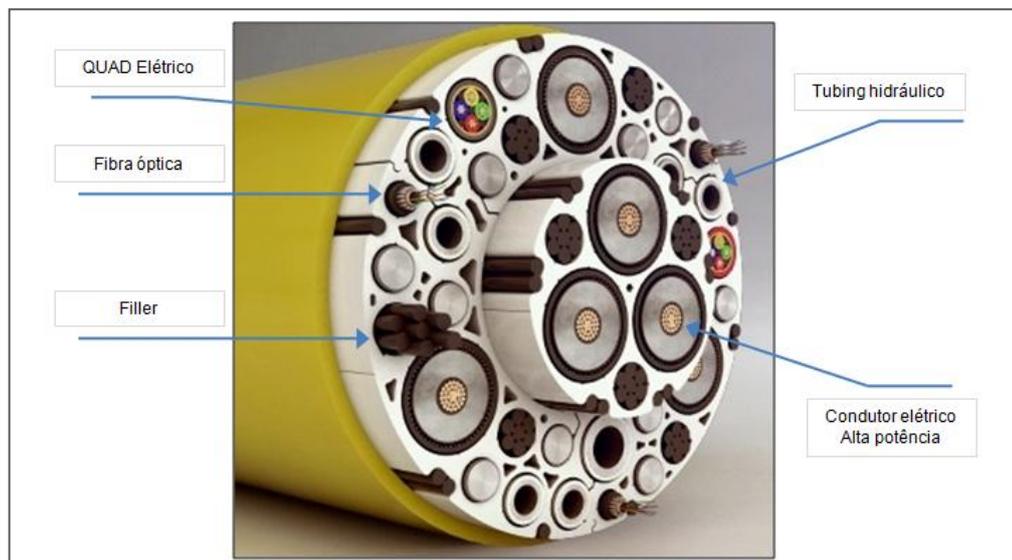


Figura 14 – Seção em corte de um umbilical de controle
Fonte: O Autor (2012)

3 REDES DE COMUNICAÇÃO

3.1 REDES DE COMPUTADORES

Uma rede de computadores é um conjunto de computadores autônomos interconectados por uma única tecnologia, de acordo com Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 1). Ainda, conforme os autores, dois computadores estão conectados quando podem trocar informações, cuja conexão não precisa necessariamente ser feita por um fio de cobre, mas também por fibras ópticas, micro-ondas, ondas de infra-vermelho e satélites de comunicação. As redes podem se conectar entre si, para formar redes maiores, onde a rede interligada, ou Internet é o exemplo mais conhecido deste uso.

A Organização Internacional para a Normalização (do inglês: *International Organization for Standardization - ISO*), foi uma das primeiras organizações a definir formalmente uma arquitetura padrão com objetivo de facilitar o processo de interconectividade entre máquinas de diferentes fabricantes, assim em 1984 lançou o padrão chamado Interconexão de Sistemas Abertos (do inglês: *Open Systems Interconnection - OSI*) ou Modelo OSI.

A seguir apresenta-se alguns conceitos base para o entendimento das redes de computadores e especificamente para as redes de aplicação industriais.

Equipamentos de Interconexão de Redes

Os equipamentos típicos de conexão de redes são os repetidores, as pontes (*bridges*), os hubs, *switches*, roteadores e *gateways*, cujas definições são apresentadas a seguir:

- Repetidores: Dispositivos eletrônicos que podem transmitir em ambas direções, cuja função primária é regenerar sinais elétricos. Portanto, o repetidor, amplifica o sinal recebido para transmiti-lo por mais um trecho necessário e também elimina seus ruídos. O repetidor atua simplesmente na camada física da transmissão, sem se importar com o conteúdo (frame) sendo transmitido.
- Pontes (*bridges*): dispositivo que interliga duas ou mais redes, que usam protocolos idênticos ou distintos, ou dois segmentos de redes que utilizem o

mesmo protocolo. As *bridges* operam numa camada de transmissão superior à física, na camada de dados, portanto, pode entender o formato do pacote (frame) sendo transmitido. A *bridge* envia dados de acordo com o endereço físico do pacote, isto é, através do *MAC Address (Media Access Control Address)* e não o *IP (Internet Protocol)*. O *MAC* é um endereço único para cada placa de rede. A *bridge* ainda tem por característica transmitir pacotes apenas ao destinatário, e não em *broadcast*. Algumas funcionalidades adicionais da *bridge*:

- entende o formato do frame e pode filtrá-los, reduzindo o tráfego de rede;
 - conversão de frames: pode conectar redes de formato *MAC* diferentes;
 - possui capacidade de roteamento e bufferização;
 - pode conectar mais de duas *LANs (Local Area Network)*;
 - camada 2 (*data link*) do modelo *ISO/OSI*.
- *Hubs* (concentrador): A principal função do *hub* é garantir que determinado pacote seja enviado para vários receptores ao mesmo tempo (*broadcast*). O *hub* recebe dados vindos de um computador e os transmite às outras máquinas. No momento em que isso ocorre, nenhum outro computador consegue enviar sinal. Sua liberação acontece após o sinal anterior ter sido completamente distribuído. Algumas características adicionais do *hub*:
 - tem capacidade de armazenar frames, isto é portas bufferizadas;
 - tem capacidade de filtrar pacotes, descartando frames ruins;
 - alguns *hubs* podem agir como repetidores;
 - *Switches* (comutador): Dispositivo utilizado para reencaminhar frames entre diversos nós. Os *switches* têm a capacidade de segmentar a rede internamente e podem ter a gestão da rede, através de comutadores gerenciáveis, que podem criar as *VLANs (virtual local area networks)*, subdividindo a rede em segmentos menores, identificando cada porta e enviando pacotes somente para a porta destino, evitando tráfego desnecessário de rede. Outras características adicionais do *switch*:
 - simula uma rede com várias *bridges*;
 - permite comunicação em paralelo, aumentando a performance da rede;
 - age como filtro e lê o *header* do pacote enviando ao destino correto;
 - camada 2 (*data link*) do modelo *ISO/OSI*.
 - Roteadores: transfere dados de uma rede de computadores para outra, que podem ser fisicamente diferentes, isto é, com frames diferentes. Para isto, utiliza

na sua política uma tabela de roteamento e direciona um pacote recebido ao seu destino final. Os roteadores também podem ser gerenciáveis e utilizam as VLANs, conforme a necessidade. Outras características dos roteadores:

- camada 3 (*network*) do modelo ISO/OSI;
 - tenta encontrar a melhor rota para o pacote;
 - pode transferir dados de uma rede para outra.
- *Gateway* (ponte de ligação): trata-se de uma máquina intermediária geralmente destinada a interligar redes, separar domínios ou até traduzir protocolos. Gateways habilitam a comunicação entre diferentes arquiteturas e ambientes. Ele realiza a conversão dos dados de um ambiente para o outro de modo que cada ambiente seja capaz de entender os dados. Eles podem ainda mudar o formato de uma mensagem de forma que ela fique de acordo com o que é exigido pela aplicação que estará recebendo esses dados. Outras informações:
- atua em qualquer camada ISO/OSI;
 - converter completamente dados se necessário;
 - pode desempenhar funções de segurança, como *firewall*.

A figura abaixo mostra exemplos de alguns destes dispositivos.



Figura 15 – Dispositivos de interconexão de redes
Fonte: O Autor (2013)

3.1.1 Topologia de Redes

A topologia física está relacionada com a disposição construtiva na qual os dispositivos estão conectados a rede de barramento distribuídas ou a sistemas de controle distribuídos (MORAES; CASTRUCCI, 2012, p. 159).

As redes podem ser dispostas em topologia ponto a ponto, barramento, anel, estrela e árvore. A seguir definições de algumas topologias das mais utilizadas em redes industriais.

Ponto-a-Ponto

Esta é a topologia mais simples, provendo um link permanente entre dois pontos de terminação. Nas redes de controle distribuído, onde são utilizados vários processadores ou CPUs (Unidade Central de Processamento), cada processador recebe a informação, utiliza a que lhe diz respeito e retransmite o restante a outro. Redes ponto a ponto têm comunicação entre dois ou mais processadores, não necessariamente conectados diretamente e que podem usar outros nós como roteadores. Esta topologia é pouco utilizada, pois a adição de novos dispositivos ou a falha de algum deles causa interrupção na comunicação.

Anel

Arquitetura ponto a ponto onde cada processador é conectado a outro, unindo-se o último segmento ao primeiro. O sinal circula pelo anel até chegar ao ponto de destino. Esta rede possui uma limitação para expansão, pois, a cada nó adicionado, aumenta-se o intervalo de tempo entre início e chegada do sinal ao nó de destino.

Barramento

O meio físico de comunicação é compartilhado entre todos os processadores, sendo que o controle pode ser centralizado ou distribuído. É amplamente utilizado pois possui alto poder de expansão, e de confiabilidade, pois caso um nó falhe, não prejudica os demais.

Estrela

Utiliza um nó central para gerenciar a comunicação entre as máquinas. Os nós em falha não afetam os outros, com exceção do nó central, que provoca a falha em toda a rede, por este motivo, nesta posição são utilizados processadores em

duplicidade para dar ao sistema a redundância para garantir a confiabilidade ao sistema.

Árvore

Esta topologia é baseada na hierarquia dos nós. O mais alto nível de qualquer rede em árvores é um único nó “raiz”, o qual é conectado tanto a um único nó num nível abaixo numa topologia ponto-a-ponto, ou mais comumente a múltiplos nós. Esta topologia é uma derivante da topologia em barramento. A medida que os nós nos níveis mais baixos vão aumentando, vão dando origens às ramificações, de onde vem a origem do nome da topologia.

Híbrida

As redes híbridas utilizam uma combinação de duas ou mais topologias de modo que a rede resultante não exiba preponderantemente nenhuma das topologias padrões, por exemplo, barramento, estrela, anel, etc.

Daisy chain

Este tipo de topologia é o meio mais fácil de adicionar mais computadores na rede. A rede em *daisy chain* (ou cadeia) pode adquirir duas formas, linear e anel. A topologia linear coloca um *link* em duas vias entre o computador e seu adjacente, portanto cada computador precisa de dois *receivers* e dois *transmitters*. A topologia em anel tem a vantagem de cortar o número de receptores e transmissores pela metade, já que a rede estará em *loop* e a mensagem vai, eventualmente, encontrar seu destino.

A figura 16 mostra exemplos das topologias apresentadas acima para redes industriais utilizando CLPs.

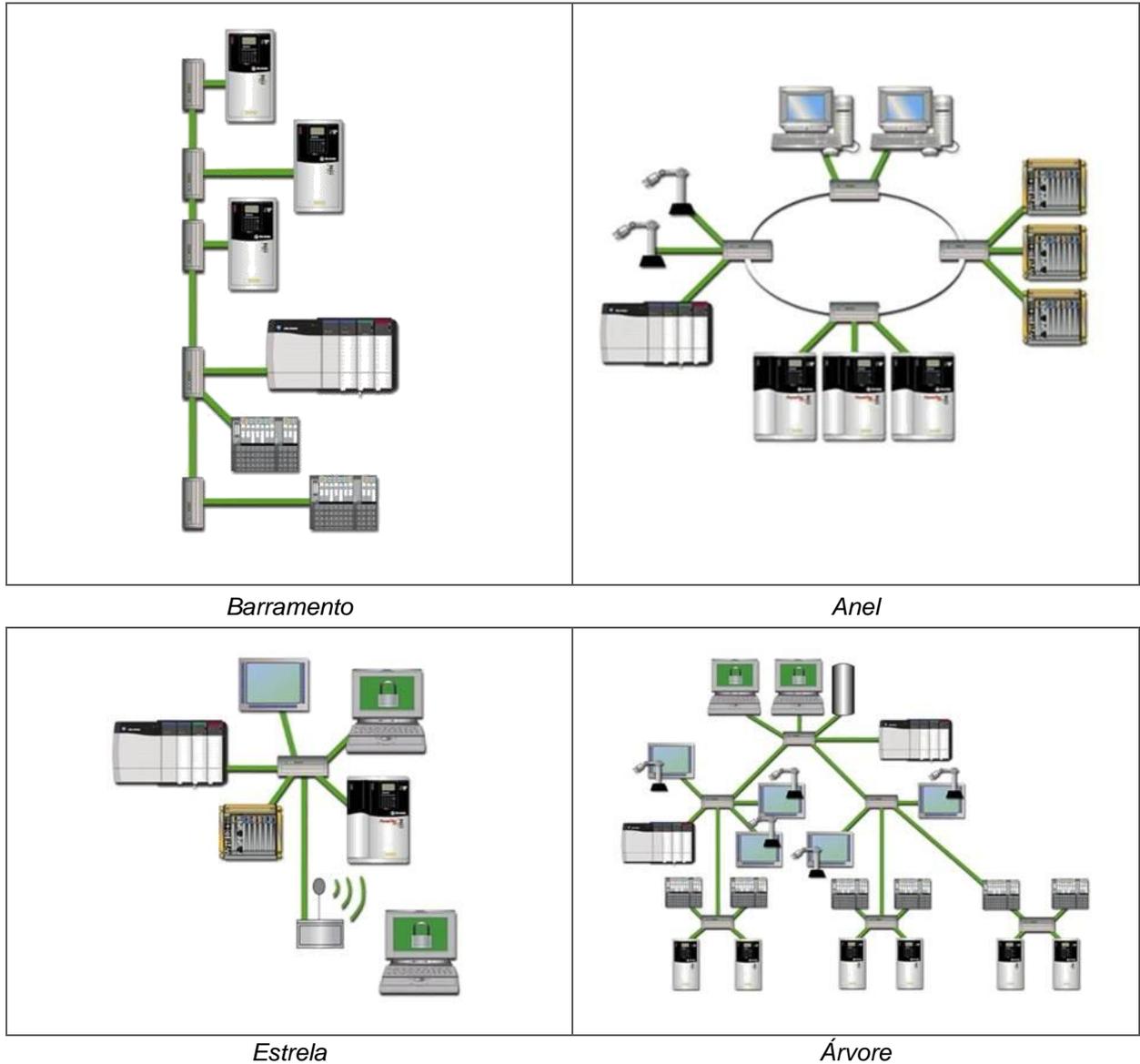


Figura 16 – Topologias de redes industriais
Fonte: Rockwell (2010)

3.1.2 Meios Físicos de Transmissão

O meio físico de transmissão determina como os dados serão transmitidos dentro da rede, isto é, como a seqüência de *bits* será compartilhada dentro da rede. A camada física está no primeiro nível do modelo ISO/OSI (*physical layer*). Dependendo da topologia e da tecnologia adotada para rede, escolhe-se a mídia sobre a qual os dados serão transmitidos. As opções mais comuns no mercado são apresentadas a seguir.

Par Trançado

Trata-se de pares de fios enrolados em espiral de forma a reduzir as interferências eletromagnéticas de fontes externas e interferências mútuas (*crosstalk*) e manter constantes as propriedades elétricas do meio através de todo o seu comprimento. Esta mídia permite a transmissão analógica ou digital e tem como desvantagem a susceptibilidade às interferências. Este tipo de cabeamento tem como matéria-prima fundamental o cobre e possui dois tipos de construção, com capa metálica protetora (*shielded*) e sem capa (*unshielded*).

A *Electronic Industries Alliance* e a *Telecommunications Industry Association* (*EIA/TIA*) classifica os cabos em basicamente cinco categorias, de acordo com o nível de segurança, bitola do fio, frequência máxima e taxa de transmissão, de acordo com a tabela 1:

Tabela 1– Categoria de cabos de pares trançados

Categoria	Tipo Construtivo	Taxa de Transmissão (Mbps)	Largura de banda (MHz)	Diâmetro (AWG)	Utilização
Cat3	UTP	10	16	20	Telefonia
Cat4	UTP	16	20	22	Voz e dados
Cat5	UTP	100	100	24-26	Ethernet
Cat6	UTP	1.000	250	24-26	Fast Ethernet

Fonte: Moraes e Castrucci (2012)

Para as conexões Ethernet, utilizam-se conectores tipo *RJ-45*. Geralmente o par trançado é utilizado para os níveis físicos de transmissão:

- Serial, padrão RS 485;
- Transmissões síncronas, como Profibus e Foundation Fieldbus.

Cabo Coaxial

Cabo que possui um fio condutor de cobre em seu centro. Este condutor é isolado por uma camada externa de plástico (que tem a função de isolador dielétrico), que por sua vez é revestida por uma proteção trançada de metal, que

serve para bloquear interferências induzidas por máquinas e equipamentos ao redor. Por fim, uma cobertura externa de revestimento plástico dá ao cabo sustentação e rigidez necessária. O conector utilizado neste tipo de cabo é o *BNC* (conector *Bayonet Neil Concelman*).

Fibra Ótica

Consiste em um núcleo de fibra de vidro no centro, envolvido por várias camadas de materiais isolantes, aumentando sua robustez. Transmite luz no lugar de sinais elétricos, eliminando, portanto o problema de interferência elétrica. Além disto, podem transmitir sinais por distância bem maiores do que os cabos coaxiais e par trançado.

A figura 17 ilustra os cabos citados bem como suas conexões.

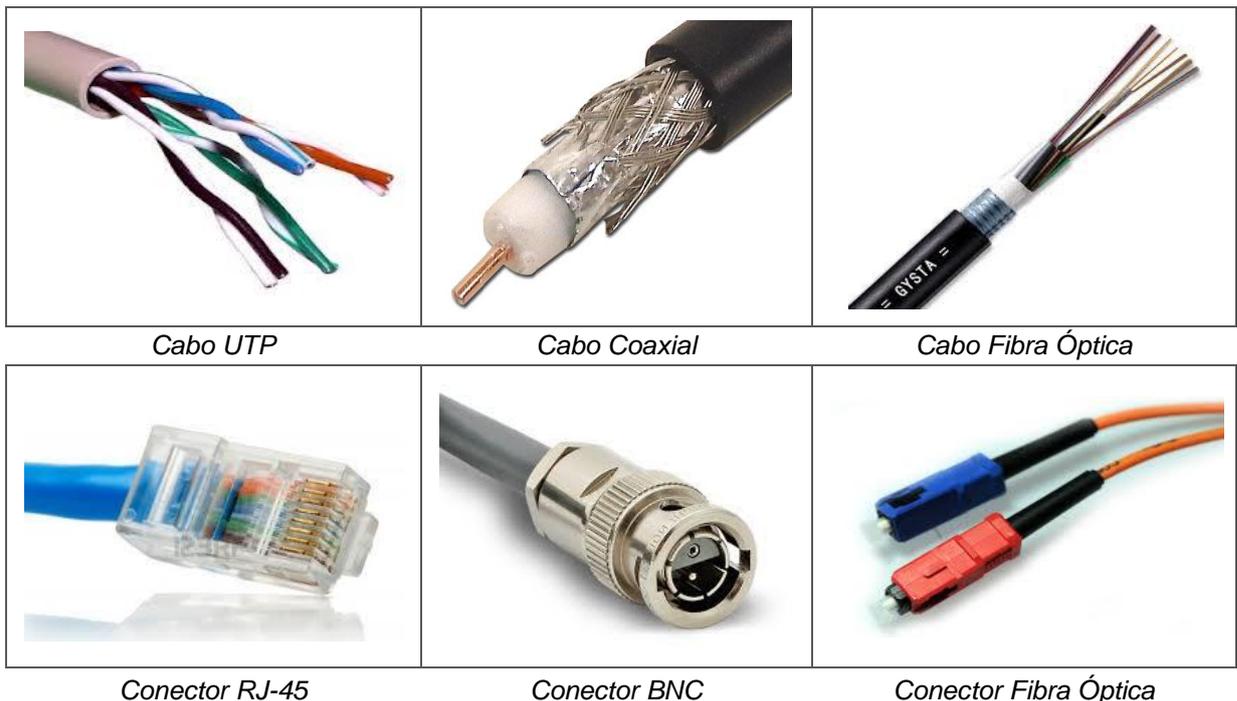


Figura 17 – Exemplos de meios físicos de transmissão
Fonte: O Autor (2013)

3.1.3 Modelos de Referência ISO/OSI

Para permitir o intercâmbio de informações entre computadores de fabricantes distintos tornou-se necessário definir uma arquitetura única, e para garantir que nenhum fabricante levasse vantagem em relação aos outros a arquitetura teria que ser aberta e pública. Foi com esse objetivo que a International Organization for Standardization (ISO) definiu o modelo denominado *Reference Model for Open Systems Interconnection (OSI)*, que propõe uma estrutura com sete níveis como referência para a arquitetura dos protocolos de redes de computadores, conforme a figura 18.

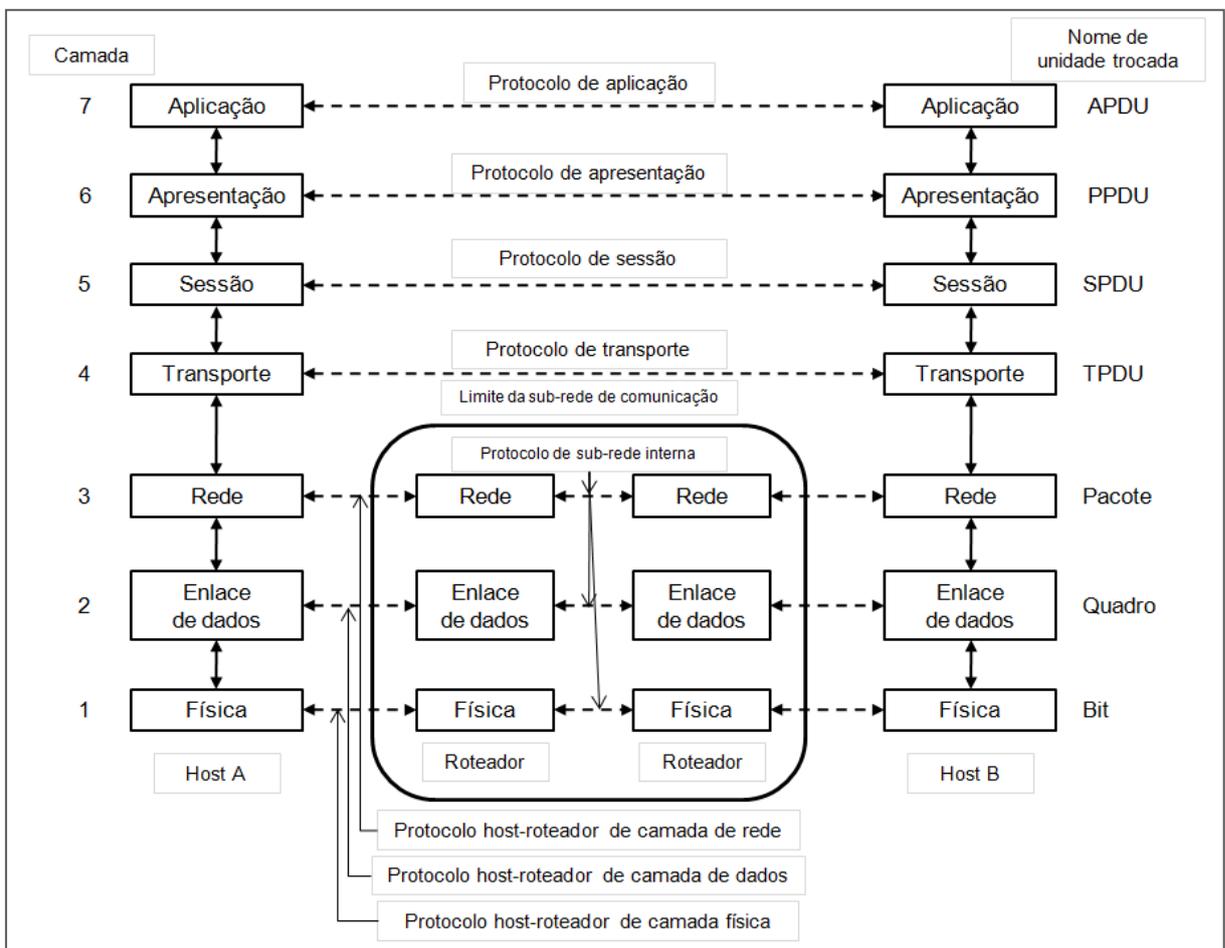


Figura 18 – O modelo de referência ISO/OSI
Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 26)

Camada Física

O nível físico fornece as características mecânicas, elétricas, funcionais e de procedimento para ativar, manter e desativar conexões físicas para a transmissão de bits entre entidades de nível de enlace (ou ligação), possivelmente através de sistemas intermediários. Uma unidade de dados do nível físico consiste em *um bit* (em uma transmissão serial) ou *n bits* (em uma transmissão paralela). O objetivo da camada física é transmitir um fluxo bruto de *bits* de uma máquina para outra (TANEMBAUM; WETHERALL, 2011, p. 58).

Camada de Enlace de Dados

O objetivo deste nível é detectar e opcionalmente corrigir erros que porventura ocorram no nível físico. O nível de enlace vai assim converter um canal de transmissão não confiável em um canal confiável para o uso do nível de rede. A técnica utilizada para isso é a partição da cadeia de bits a serem enviados no nível físico, em quadros (*frames*), cada um contendo alguma forma de redundância para detecção de erros. Segundo Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 121), a camada de enlace de dados usa os serviços da camada física para enviar e receber *bits* pelos canais de comunicação. Ela tem diversas funções, entre as quais:

- Fornecer uma interface de serviço bem definida à camada de rede;
- Lidar com os erros de transmissão;
- Regular o fluxo de dados de tal forma que receptores lentos não sejam atropelados por transmissores rápidos.

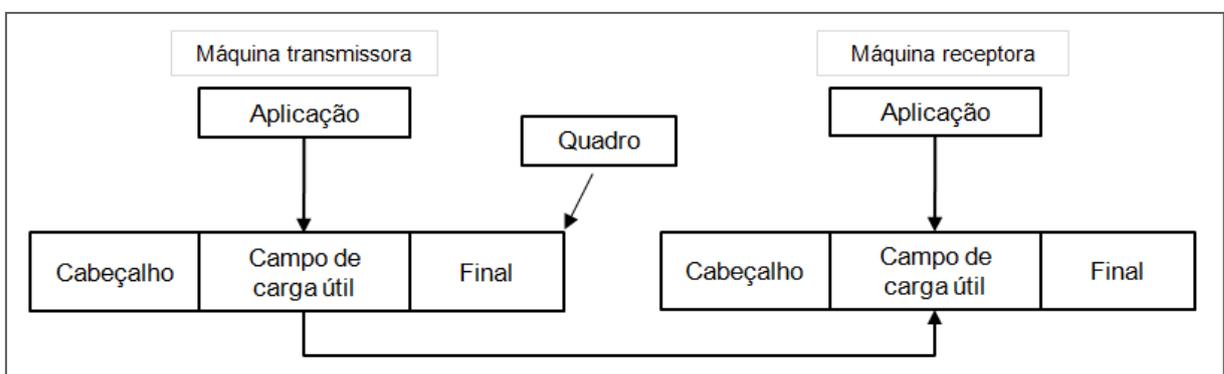


Figura 19 – Relacionamento entre pacotes e quadros
 Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 121)

Camada de Rede

A camada de rede provê os meios funcionais e procedimentos para transferir seqüências de dados de comprimento variáveis de um *host* (hospedeiro) fonte em uma rede para um *host* de destinação numa outra rede. Os serviços oferecidos por esta camada a seus usuários pode ter duas filosofias, redes de circuitos virtuais ou datagramas.

Segundo Tanenbaum e Wetherall, (2011, p. 225), no serviço de datagrama (serviço não-orientado à conexão), cada pacote (unidade de dados no nível 3) não tem relação alguma de passado ou futuro com qualquer outro pacote, devendo assim carregar, de uma forma completa, seu endereço de destino. Nesse tipo de serviço, o roteamento é calculado toda vez que um pacote tem que ser encaminhado por um nó da rede. No serviço de circuito virtual (serviço orientado à conexão), é necessário que o transmissor primeiramente envie um pacote de estabelecimento de conexão. A cada estabelecimento é dado um número, correspondente ao circuito, para uso pelos pacotes subseqüentes com o mesmo destino. Nesse método, os pacotes pertencentes a uma única conversaçãõ não são independentes.

Inerentemente, os roteadores são classificados na classe 3 de referência do modelo OSI, isto é, na camada de rede. Adicionalmente, como resumo desta camada, tem-se:

- Encaminha informação da origem para o destino (roteamento);
- Controla fluxo de transmissão entre sub-redes (controle de congestão);
- Funções de contabilização;
- Estabelece esquema único de endereçamento independente da sub-rede utilizada; e
- Permite conexão de sub-redes heterogêneas.

Camada de Transporte

Para Tanenbaum e Wetherall, (2011, p. 27), a função básica da camada de transporte é aceitar dados da camada acima dela, dividi-los em unidades menores, se for preciso, repassar estas unidades à camada de rede e garantir que todos os fragmentos chegarão corretamente à outra extremidade.

A partir da camada de transporte, das camadas 4 a 7, a comunicação é ponta a ponta, ligando a máquina na origem à máquina de destino, diferentemente das camadas inferiores, de 1 a 3, onde os protocolos são trocados entre cada uma das máquinas e seus vizinhos imediatos, e não entre as máquinas de origem e destino, que podem estar separados por muito roteadores. A camada de transporte controla a confiabilidade de um dado *link* através do controle de fluxo, segmentação e dessegmentação, e controle de erro. Alguns dados sumários da camada de transporte:

- Divide e reagrupa a informação binária em pacotes;
- Garante a seqüência dos pacotes;
- Assegura a conexão confiável entre origem e destino da comunicação;
- Primeira camada que estabelece comunicação origem-destino; e
- Multiplexa a conexão física caso existam várias conexões de transporte.

Camada de Sessão

Esta camada permite que os usuários em diferentes máquinas estabeleçam sessões de comunicação entre eles. Os serviços oferecidos pelo nível de sessão são: controle de diálogo, gerenciamento de *token* (passe que impede que duas partes tentem executar a mesma operação crítica ao mesmo tempo) e sincronização. Dados principais da camada de sessão são:

- Gerencia sessões de comunicação (sessão é uma comunicação que necessita armazenar estados); e
- Estados são armazenados para permitir restabelecimento da comunicação em caso de queda da comunicação, como retomar transferências de arquivos.

Camada de Apresentação

Esta camada está relacionada à sintaxe e à semântica das informações transmitidas. Ela realiza transformações adequadas nos dados, antes de seu envio ao nível de sessão. Transformações típicas dizem respeito à compressão de textos, criptografia, conversão de padrões de terminais e arquivos para padrões de rede e vice-versa. Os serviços oferecidos por este nível são: transformação de dados,

formatação de dados, seleção de sintaxes e estabelecimento e manutenção de conexões de apresentação. Basicamente, seus serviços são:

- Representação dos dados em alto nível;
- Adoção de sistema padronizado de representação de caracteres;
- Adoção de códigos de representação numérica padrão;
- Compressão de dados; e
- Codificação de dados.

Camada de Aplicação

Camada de referência mais próxima do usuário final. A camada de aplicação tipicamente identifica os provedores dos dados requisitados, determina disponibilidade de recursos e sincroniza a comunicação. Um exemplo de protocolo de aplicação é o *HTTP (HyperText Transfer Protocol)*, que constitui a base da *WWW (World Wide Web)*. Este protocolo, que na verdade não pertence ao modelo de referência OSI, mas sim ao modelo TCP/IP, visto na sub-seção seguinte, envia toda vez que um navegador requisita uma página Web, o nome desta página ao servidor que a hospeda. Este servidor então transmite a página ao navegador. Outras funções importantes da camada de aplicação:

- Aplicações que oferecem os serviços ao usuário final;
- Unificação de sistemas de arquivos e diretórios;
- Correio eletrônico;
- Login remoto;
- Transferência de arquivos;
- Emulação de terminais;
- Execução remota; e
- Gerenciamento da rede.

3.1.4 Modelos de Referência TCP/IP

O desenvolvimento do TCP/IP ocorreu na *ARPA (Advanced Research Projects Agency)* que foi fundada pelo departamento de defesa dos Estados Unidos. De acordo com Held (2003, p. 244) o TCP/IP representa uma coleção de protocolos de rede que provêm serviços às camadas de rede e transporte, 3 e 4 do modelo OSI.

A arquitetura TCP/IP, também conhecida como Internet TCP/IP por se tratar de um modelo de conexão inter-redes (ou genericamente, redes interligadas), é organizada em quatro camadas conceituais, conforme a figura abaixo que correlaciona o modelo TCP/IP ao OSI.

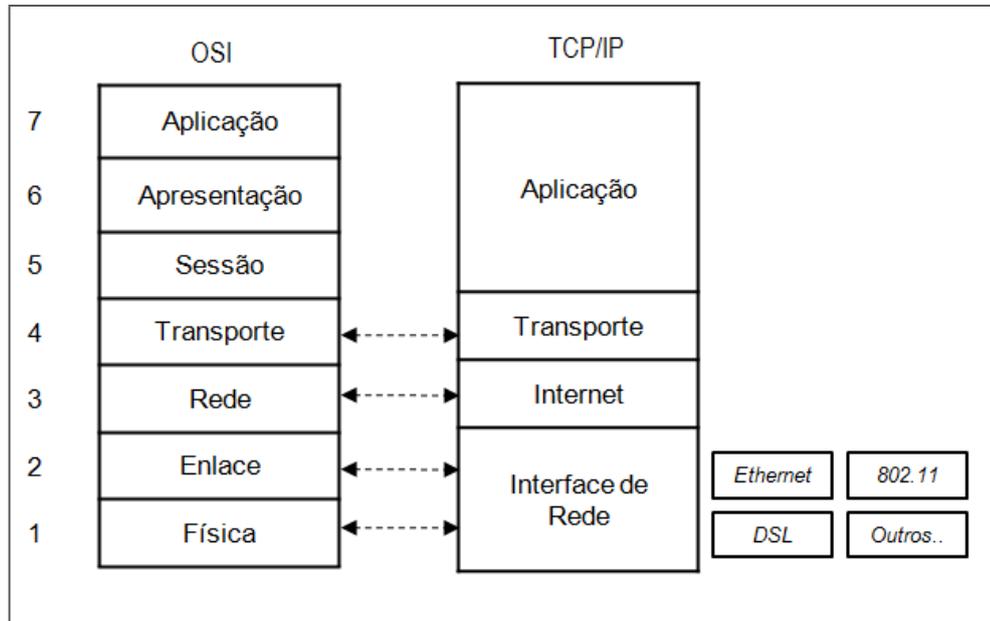


Figura 20 – O modelo de referência TCP/IP
 Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 28)

Camada de Interface de Rede

Esta camada no modelo de referência TCP/IP é a menor componente dos protocolos Internet e descreve o que os enlaces como linhas seriais e a Ethernet precisam fazer para cumprir os requisitos desta camada. Esta camada no modelo TCP/IP corresponde às camadas física e de enlace de dados no modelo de referência ISO/OSI.

Camada Internet

Esta camada corresponde ao modelo de rede OSI e sua tarefa é permitir que o envio de pacotes de qualquer rede chegue ao destino, mesmo que seja uma rede diferente, através de roteamento. Esta camada utiliza o *IP (Internet Protocol)* como protocolo de comunicação. A função do *IP* é endereçar os *hosts* e criar as rotas para

os datagramas (pacotes) de um *host* fonte a outro destino, através de uma ou mais redes *IP*.

Camada de Transporte

Esta camada corresponde ao modelo de transporte OSI e suas funções são similares às do mesmo nível no modelo OSI. Existem dois protocolos ponta a ponta definidos nesta camada, o *TCP (Transmission Control Protocol)* ou o *UDP (User Datagram Protocol)*. As definições dos protocolos segundo Tanenbaum e Wetherall, (2011, p. 29) é dada a seguir:

- O *TCP* é um protocolo orientado a conexões confiável que permite a entrega sem erros de um fluxo de bytes originário de uma determinada máquina em qualquer computador da internet. Este protocolo fragmenta o fluxo de bytes de entrada em mensagens discretas e passa cada uma delas para a camada internet. No destino, o processo *TCP* receptor volta a montar as mensagens recebidas no fluxo de saída. O *TCP* também cuida do controle de fluxo, impedindo que um transmissor rápido sobrecarregue um receptor lento com um volume de mensagens maior do que ele pode manipular.
- *UDP* ou protocolo de datagrama de usuário, é um protocolo sem conexões, não confiável, para aplicações que não desejam a seqüência ou o controle de fluxo do *TCP*, e que desejam oferecer seu próprio controle. Ele é muito utilizado para consultas isoladas, com solicitação e resposta, tipo cliente-servidor, e aplicações onde a entrega imediata é mais importante do que a entrega precisa, como na transmissão de voz ou vídeo.

Camada de Aplicação

A camada de aplicação está acima da camada de transporte e contém todos os protocolos de nível mais alto, dentre eles o *TELNET* (protocolo de terminal virtual), *FTP* (protocolo de transferência de arquivos), *SMTP* (protocolo de correio eletrônico) e outros como *HTTPS*, o *DNS (Domain Name System)* e o *OPC (OLE for Process Control)*, que oferece um serviço de mapeamento de nomes e endereços de rede.

A figura 21 ilustra a relação entre as camadas do modelo de referência TCP/IP e os protocolos utilizados em cada uma delas.

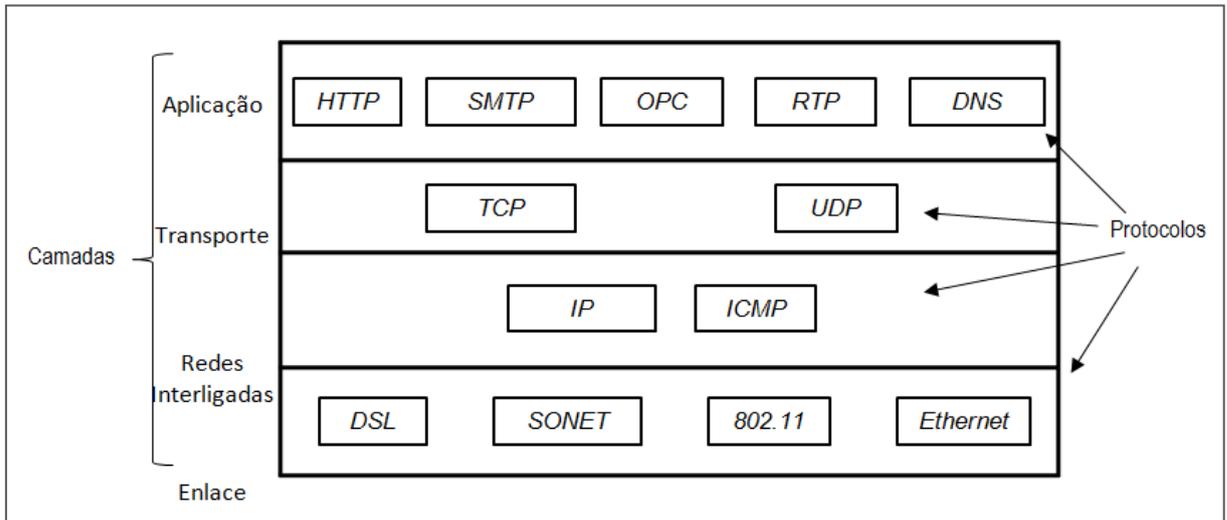


Figura 21 – O modelo TCP/IP e alguns protocolos utilizados
Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 29)

3.2 REDE ETHERNET

O *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* produziu uma série de padrões para LAN. Este padrão que veio através do comitê 802 ficou conhecido como padrão *IEEE 802* das camadas 1 e 2 (física e enlace) do modelo OSI. A tabela 2 mostra as divisões do padrão mais utilizadas pelos seus assuntos e áreas de aplicação.

Tabela 2 – Padronização da arquitetura *IEEE 802* para LANs

Padrão	Área de Aplicação
802.1	Avaliação e Arquitetura de LANs
802.2	Controle de link lógico
802.3	Ethernet (CSMA/CD)
802.4	Token bus
802.5	Token ring
802.6	Fila distribuída barramento dual
802.7	Banda larga
802.8	Fibra óptica
802.9	Interface de voz e dados
802.10	LANs virtuais e segurança
802.11	Wireless
802.15	Redes pessoais - WPA (<i>bluetooth, zigbee</i>)
802.16	Banda larga sem fio

Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 49)

Subcamadas MAC e LLC

Os enlaces de rede podem ser divididos em duas categorias: a dos que utilizam conexões ponto a ponto e a daqueles que utilizam canais de *broadcast*, conforme Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 162). Nas redes de *broadcast*, uma questão

fundamental é determinar que dispositivo tem o direito de usar o canal quando há uma disputa por ele, por isto, tais canais são chamados de canais de multiacesso ou canais de acesso aleatório.

Os protocolos usados para determinar quem será o próximo em um canal multiacesso pertencem a uma subcamada do modelo OSI de enlace de dados, chamada camada *MAC (Medium Access Control)*, ou controle de acesso ao meio. Tecnicamente, a subcamada *MAC* é a parte inferior da camada de enlace de dados e tem como funções principais (BORTOLINI, 2012):

- Tratamento de características específicas da tecnologia de rede empregada;
- Codificação e decodificação de sinais;
- Geração/remoção de preâmbulos (sincronização);
- Transmissão e recepção de bits.

A parte superior da camada de enlace de dados é a subcamada *LLC (Logical Link Control)*, ou o controle de enlace lógico, que fornece mecanismos de multiplexação e controle de fluxo que torna possível para vários protocolos, exemplo *IP*, conviverem dentro de uma rede multiponto e serem transportados pelo mesmo meio da rede. As funções principais da subcamada *LLC* são (BORTOLINI, 2012):

- Implementação da interface do nível de enlace com o nível de rede;
- Controle de multiplexação, erros e de fluxo;
- Transmissão: montagem de dados em frames inserindo endereços e código de detecção de erros;
- Recepção: recuperação dos dados, reconhecimento de endereços de serviço, detecção de erros; e
- Interface aos níveis superiores e controle de fluxo/erro.

Protocolo da subcamada MAC Ethernet

O formato usado para transmitir *frames* (quadros) na rede Ethernet, segundo o padrão *IEEE 802.3* é mostrado na figura 22. Um breve descritivo com os dados contidos em cada quadro é apresentado a seguir, conforme Held (2003, p. 157):

- Preâmbulo: no padrão *IEEE 802.3*, consiste em sete bytes num padrão alternado de bits 1 e 0. Seu propósito é anunciar o quadro e habilitar os receptores na rede para se sincronizarem à recepção do quadro a ser transmitido.

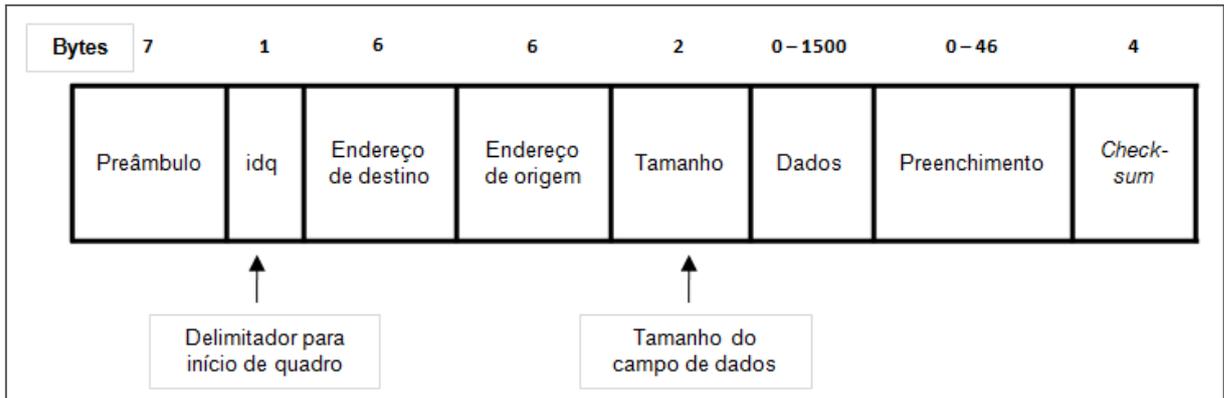


Figura 22 – Formato do quadro Ethernet padrão IEEE 802.3
Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 177)

- Delimitador de início de quadro: exclusivo ao padrão IEEE 802.3, este campo de um byte tem o valor "10101011", e serve para informar ao receptor que um *frame* de dados será enviado. Ambos os campos são removidos pelo controlador quando recebidos e incluído quando enviados.
- Endereço de destino: campo de seis bytes de extensão que contém o endereço de destino para o qual ou quais, o quadro deve ser enviado. A transmissão pode ser *multicasting*, quando objetiva um grupo de estações ou *broadcast*, que será aceita por todas as estações da rede.
- Endereço de origem: campo de seis bytes de extensão que contém o endereço de origem que transmitiu o quadro. Tanto o endereço de origem quanto de destino estão relacionados ao *MAC* da interface de rede enviando ou recebendo os quadros. Existe uma padronização definida pelo *IEEE* que define que os três primeiros bytes são destinados a identificação do fabricante, faixa esta fornecida pelo próprio *IEEE*, e os três últimos *bytes* são definidos pelo fabricante, sendo este responsável pelo controle da numeração de cada placa que produz. Como exemplo de fabricantes de placas de interface de redes, as *NICs*, a *CISCO* possui o identificador de três bytes "00-00-0C".
- Tamanho: campo de dois bytes que define o número de bytes contidos no campo de dados.
- Dados: informação a ser transmitida, propriamente dita. Tem tamanho variável até 1500 bytes. Além do comprimento máximo do quadro, existe também o comprimento mínimo: os quadros devem possuir no mínimo 64 bytes, considerando-se bytes a partir endereço de destino até o *check-sum*.

- Preenchimento: Caso a informação no campo de dados não totalize os sessenta e quatro bytes totais esperados em cada quadro, este campo será usado para preencher até o tamanho mínimo. Outra função do preenchimento é tentar coibir colisão de quadros no meio físico.
- *Check-sum*: trata-se de um *CRC (Cyclic Redundancy Check)*, ou verificação de redundância cíclica de 32-bits, que é um código detector de erros do tipo *hash code* para detecção de erros de transmissão ou armazenamento.

Controle de Acesso ao meio - Protocolo CSMA/CD

A Ethernet foi originalmente projetada como uma rede *LAN half-duplex* com respeito ao método de transmissão (HELD, 2003, p. 176). Basicamente, o protocolo com detecção de portadora *CSMA (Carrier Sense Multiple Access)* utiliza o método "escuta-então-envia", conforme o próprio Held (2003, p. 30). O primeiro passo é escutar o canal para ver se está desocupado, e caso esteja, ou quando estiver, a estação transmite um quadro. Se ocorrer uma colisão, a estação espera um intervalo de tempo aleatório e começa novamente. O protocolo *CSMA/CD (CSMA com Collision Detection)* é a base da *LAN Ethernet*. A base deste algoritmo é que uma determinada estação "escuta" o canal para ver se está liberado: na prática lê sinais elétricos na sua entrada para verificar se pode ou não enviar um quadro. Caso envie o quadro e antes da sua entrega total detectar outra estação em processo de envio, cancela a transmissão e espera um tempo aleatório para iniciar novamente o processo.

Codificação Manchester

A codificação Manchester que é utilizada nas redes Ethernet é uma transmissão em banda base (transmissão de dados feitos através de um único canal que utiliza toda a largura de banda² disponível), síncrona (transmite um sinal de *clock* juntamente com o sinal de dados) e efetua a operação *XOR (OU Exclusivo)* entre

² Largura de banda é a medida da capacidade de transmissão de um determinado meio, conexão ou rede, determinando a velocidade que os dados passam através desta rede específica, e é medida em bits por segundo.

este sinal de *clock* e o sinal de dados. A figura 23 exemplifica a codificação Manchester para envio de dados.

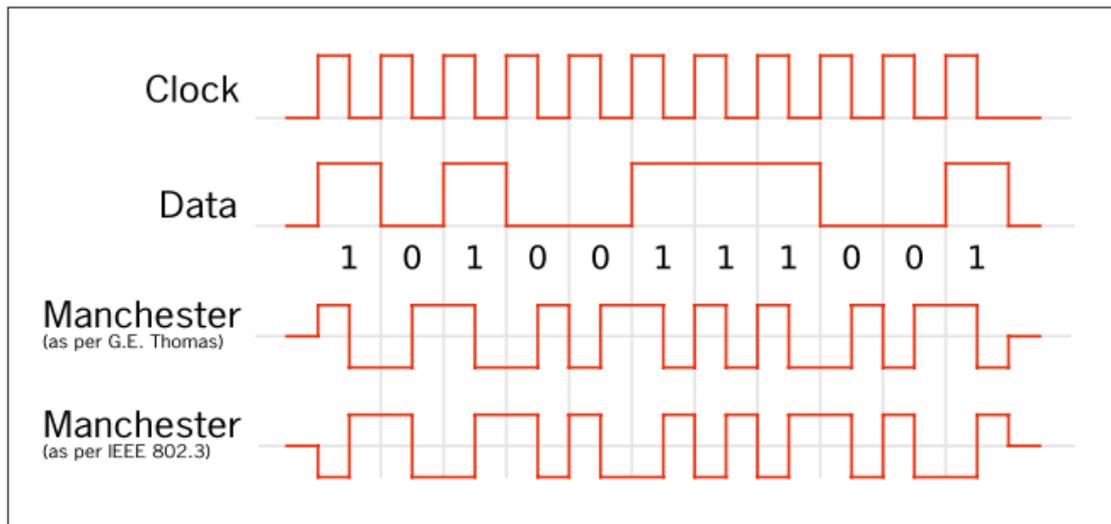


Figura 23 – Exemplo de transmissão utilizando a codificação Manchester
Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2011, p. 78)

A tabela 3 resume as características físicas das redes Ethernet disponíveis atualmente no mercado.

A notação das redes Ethernet é dada abaixo, conforme o exemplo *10Base-5*:
[taxa de transmissão][método de sinalização]-[comprimento máximo do segmento]

Tabela 3 – Características físicas de redes Ethernet

Características Operacionais	10Base-5	10Base-2	10Base-T	10Base-F	100Base-T	100Base-F
Taxa transmissão (Mbps)	10	10	10	10	10	10
Método de sinalização	Base	Base	Base	Base	Base	Base
Comprimento máx. de segmento (m)	500	185	100	2000	100	15.000
Protocolo acesso	CSMA/CD	CSMA/CD	CSMA/CD	CSMA/CD	CSMA/CD	CSMA/CD
Codificação	Manchester	Manchester	Manchester	Manchester	Manchester	Manchester
Nós por segmento	100	30	12/hub	33	1024	30
Meio físico	Coaxial (50 Ohms)	Coaxial (50 Ohms)	UTP (2 pares)	Par F.O. (850-nm)	UTP / STP (4 pares)	Coaxial (50 Ohms)
Topologia	Barramento	Barramento	Estrela	Estrela	Estrela	Estrela
Diâmetro cabo (mm)	10	5	0.4 a 0.6	62.5/125 µm	0.4 a 0.6	62.5/125 µm

Fonte: Held (2003, p. 76)

4 REDES INDUSTRIAIS

Em uma indústria ou planta moderna, conforme Bega (2011, p. 618), coexistem muitos dispositivos e equipamentos destinados ao controle, seja de uma máquina ou de um processo. Entre outros os CLPs, os SDCDs (Sistemas Digitais de Controle Distribuído), sensores, transmissores, atuadores, etc. As redes industriais visam unir todos estes dispositivos de forma a permitir uma interação funcional que aumente o rendimento e permita implementação de funções mais avançadas.

De acordo com a Rockwell Automation (2007), alguns critérios devem ser considerados para a escolha de uma rede industrial:

- Uso da rede: tipo de dados, flexibilidade para servir a várias aplicações, etc.
- Conectividade: quantidade de dispositivos que se conectam à rede ou incompatibilidade com algum dispositivo necessário.
- Custo: qual o custo do ciclo de vida da rede no projeto.
- Topologia, capacidade e desempenho: a topologia é flexível e o meio físico compatível com a aplicação (ex. imune a ruído, distância, etc.). A largura de banda e a capacidade da rede atendem às necessidades da aplicação.
- Impactos no ciclo de vida: existem ferramentas de diagnósticos e são fáceis de usar.
- Tecnologia duradoura: a rede é compatível com os padrões da indústria e obsolescência controlada.

4.1 MODELOS DE REDE

Conforme Moraes e Castrucci (2012, p. 163), a forma de gerenciamento entre os pontos de comunicação (nós) da rede no tocante à comunicação de dados pode ser:

Mestre-Escravo

- Escravo (*slave*): trata-se de um periférico (dispositivos inteligentes de E/S, drivers, IHMs (Interfaces Homem Máquina), válvulas, transdutores, etc), que recebe uma informação de processo e/ou utiliza informação de saída do mestre para atuar na planta. Escravos são dispositivos passivos que somente respondem a requisições diretas vinda do mestre.

- Mono-mestre: existe apenas um mestre no barramento durante a operação. Geralmente a CPU do CLP é o componente de controle central. Os escravos são descentralizados e acoplados no barramento através do meio de transmissão de dados.
- Multi-mestre: a imagem das entradas e saídas pode ser lida por todos os mestres, porém somente um mestre pode controlar um dado escravo.

Ponto a Ponto (Origem-Destino)

Neste modelo, uma origem específica é identificada no protocolo; aquela que transmite a mensagem. Outro destino é especificado, o qual na maioria dos casos representa o endereço de rede de um nó (estação) específico. O modelo ponto a ponto é conhecido como *unicast*, uma vez que é um endereçamento para um pacote feito a um único destino. Este modelo tem algumas desvantagens, como:

- ação sincronizada entre os nós ser muito difícil uma vez que os dados chegam aos nós em momentos diferentes; e
- desperdício de recursos em função da repetição dos mesmos dados quando apenas o destino é diferente.

Produtor-Consumidor

Neste modelo, os dados possuem um identificador único, origem ou destino. Todos os nós podem ser sincronizados. Neste caso, múltiplos nós (produtores) podem transmitir dados para outros nós (consumidores), até para múltiplos destinatários simultaneamente, configurando o *multicast*. A figura 24 mostra um exemplo de um modelo produtor-consumidor. Neste caso, o sensor envia a referência de posição transmitida em *multicast* aos controladores CTRL1 e CTRL2 e para a interface homem-máquina HMI, e então, o controlador CTRL1 dá o comando de velocidade transmitindo simultaneamente aos três inversores e a IHM. Este modelo traz na sua característica operacional as seguintes vantagens:

- economia na transmissão de dados, pois eles são enviados somente aos dispositivos que o requisitarem; e

- determinismo, pois o tempo para entrega dos dados é independente do número de dispositivos que os requisitam, pois diferentemente do sistema mestre-esravo este processo não trabalha em varredura.

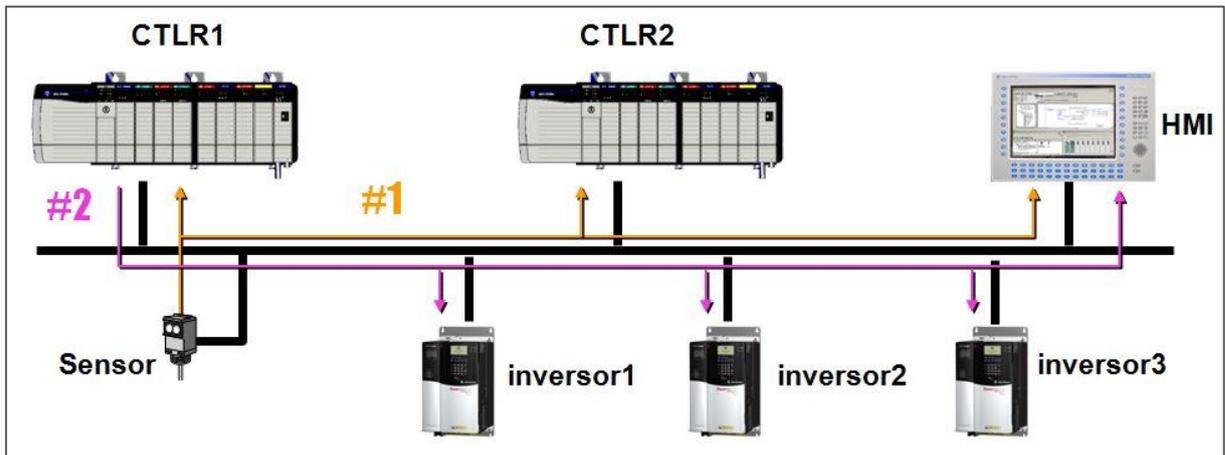


Figura 24 – Exemplo de modelo produtor-consumidor
 Fonte: Rockwell (2007)

Peer-to-peer

Este é um modelo de rede de arquitetura descentralizada e distribuída na qual cada nó individual na rede (chamados pares) agem tanto como produtores ou consumidores de recursos, em contraste com o modelo cliente-servidor, onde cada nó solicita acesso aos recursos providos por servidores centrais.

4.2 PROTOCOLOS INDUSTRIAIS

Segundo a Rockwell Automation (2007), um protocolo é um conjunto de regras para comunicação digital; trata-se do idioma da rede, onde um dispositivo transmissor necessita ser compreendido pelo receptor. Moraes e Castrucci (2012, p. 163) afirmam que os protocolos caracterizam os elementos de maior importância nas redes de automação industrial, tanto que as mesmas passam a ser denominadas pelos protocolos utilizados. Os protocolos definem o padrão operacional da rede de automação. Num passado recente, cada fabricante de dispositivos tinha seus próprios padrões, ou protocolos, mas atualmente os fabricantes seguem padrões

definidos por órgãos internacionais, como a ODVA (*Open DeviceNet Vendors Association*).

A ODVA suporta tecnologias baseadas no CIP™ (*Common Industrial Protocol*), DeviceNet™, EtherNet/IP™, CompoNet™ e ControlNet™, dos quais as redes EtherNet/IP™ e ControlNet™ são alvos deste estudo. A figura 25 mostra o esquema CIP baseado em um protocolo aberto, padrão e estabelecido no mercado para qualquer das redes mencionadas acima, estratificado para comparação com o modelo ISO/OSI.

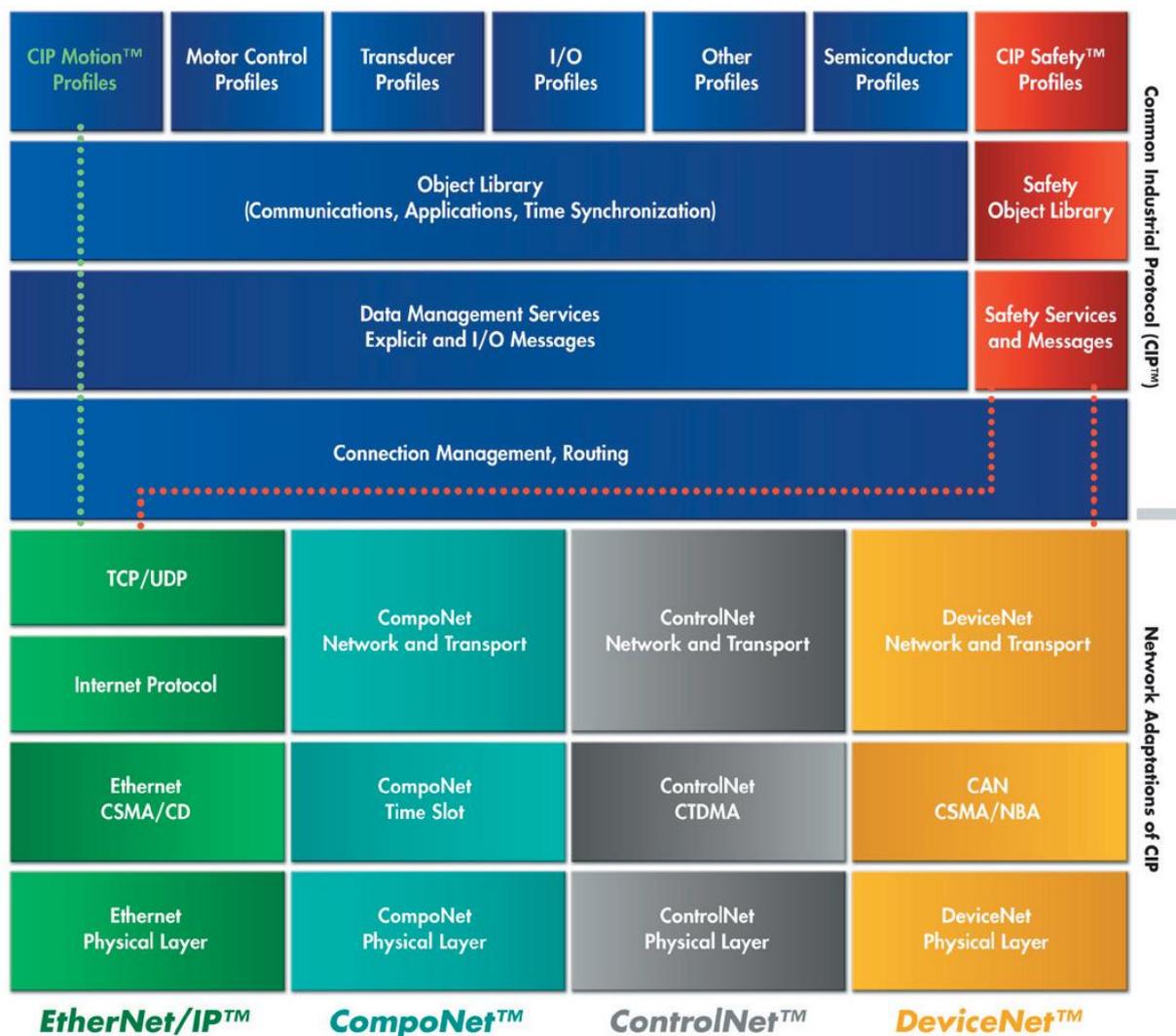


Figura 25 – Protocolo comum CIP
Fonte: ODVA (2006)

A seguir, de forma sumária são apresentados os protocolos mais usuais utilizados na automação, desde o nível de barramento de sensores, como o AS-

Interface, passando por protocolos de dispositivos, como DeviceNet até protocolos de campo como o Profibus e Foundation Fieldbus,

4.2.1 Principais Protocolos Industriais

AS-Interface

ASI, ou *Actuator Sensor Interface*, é um sistema mono-mestre em ciclo de varredura para atender os dados da rede de nível mais baixo como sensores e atuadores. Trata-se de rede de baixo custo e fácil instalação, e atualmente existem duas versões deste protocolo, a versão 2.0 e a 2.1. Na versão 2.1, a rede comporta até sessenta e dois escravos com tempo máximo de ciclo de dez milissegundos (10 ms). O meio físico utilizado é um cabo com dois fios sem blindagem perfilado, classe de proteção até IP67 e disponível nas cores amarelo e preto. A transmissão é dada pelos dados sobrepostos na alimentação. A figura 26 mostra um exemplo de uso da rede ASI conjugada à outras redes de campo.

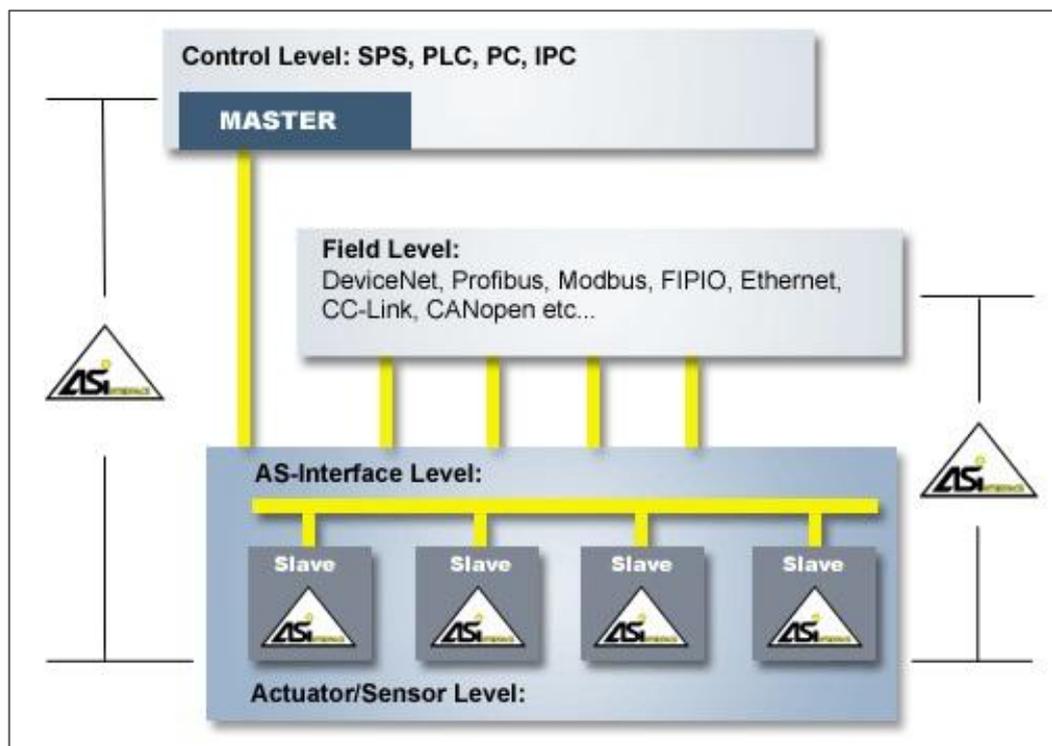


Figura 26 – Exemplo de aplicação com protocolo AS-Interface
Fonte: O autor (2013)

ModBus

O protocolo Modbus é atualmente controlado pela *Modbus Organization* e é muito utilizado em redes de CLPs para aquisição de dados instrumentos e comandar atuadores. O Modbus equivale a uma camada de aplicação do modelo OSI, que pode utilizar meios físicos seriais (RS-232 ou RS-485) ou Ethernet, que equivale ao enlace de rede (meio físico e camada de enlace) ou ainda fibra óptica ou links de rádio. O mecanismo de acesso é do tipo mestre-escravo (ou cliente-servidor). A figura 27 exemplifica o *stack* de comunicação Modbus.

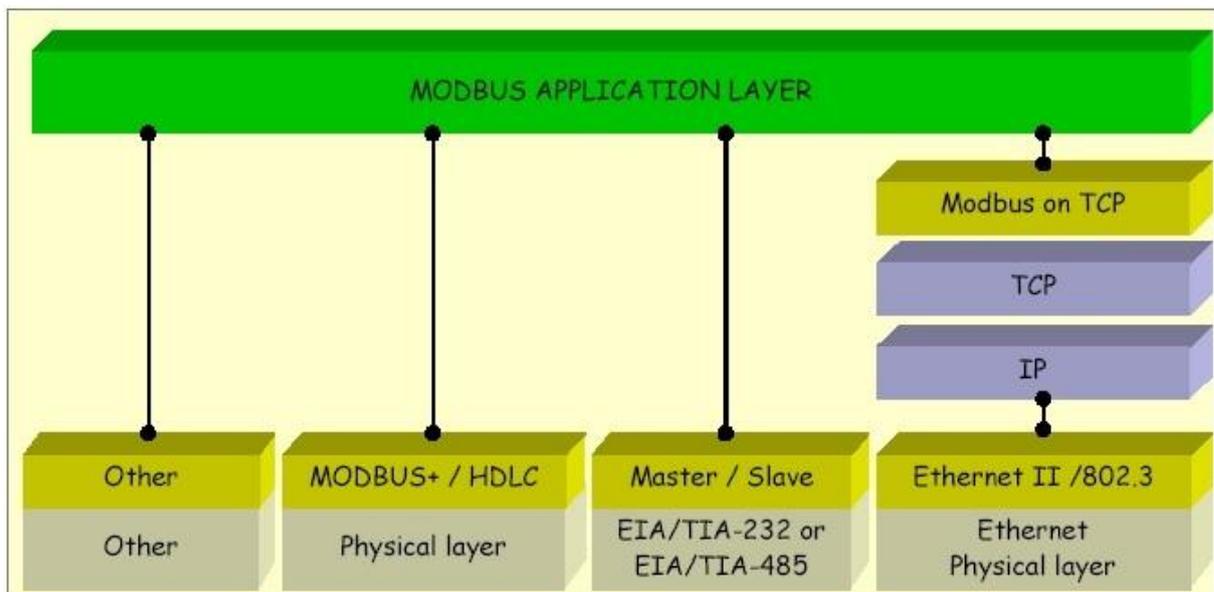


Figura 27 – Stack de comunicação Modbus
Fonte: Modbus Organization (2012)

O formato usado para transmitir frames (quadros) na rede Modbus, segundo o padrão pela Modbus Organization (2012, p. 3) é mostrado na figura 28. A descrição dos dados contidos em cada quadro é:

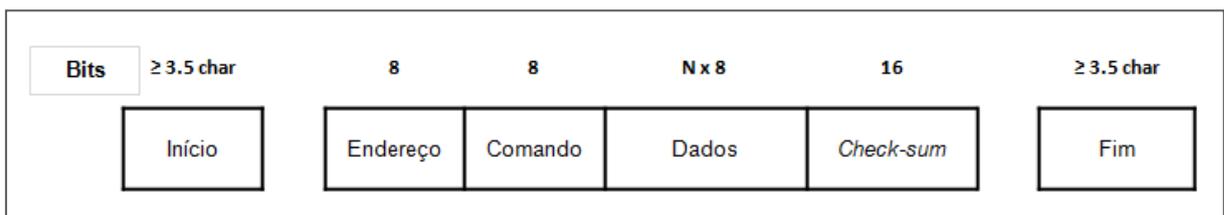


Figura 28 – Formato do quadro Modbus para meios seriais
Fonte: Modbus Organization (2012)

- Início: delimitador de início de quadro. Trata-se de um intervalo mínimo, equivalente ao tempo necessário para se transmitir 3.5 caracteres, durante o qual a conexão deve permanecer "quieta". Geralmente utiliza-se o código *ASCII* (*American Standard Code for Information Interchange*) para se representar um caractere, e cada caractere é equivalente a 8-bits de informação.
- Endereço: endereço do dispositivo recipiente.
- Comando: código que define o tipo de mensagem, conforme tabela 4.
- Dados: para um comando de requisição, este campo provê ao escravo informações adicionais para que ele complete a função especificada no campo "comando" (ex. endereços dos registros, contadores, etc.); já para uma mensagem de resposta, caso não ocorra erro, este campo retorna o dado requisitado do escravo. A quantidade de registradores a serem escritos, combinado com todos os demais campos da resposta esperada não devem exceder o comprimento permitido de uma mensagem MODBUS (256 bytes).
- *Check-sum*: equivalente ao CRC descrito no protocolo Ethernet.

Tabela 4– Principais comandos do Protocolo Modbus

Comando	Descrição
01	Lê um número variável de saídas digitais (bobinas)
02	Lê um número variável de entradas digitais
03	Lê um número variável de registros retentivos (saídas analógicas ou memórias)
04	Lê um número variável de registros de entrada (entradas analógicas)
05	Força uma única bobina (altera o estado de uma saída digital)
06	<i>Preset</i> de um único registro (altera o estado de uma saída analógica)
07	Lê exceções (registros de erro)
08	Várias funções de diagnóstico
15	Força uma quantidade variável de bobinas (saídas digitais)
16	<i>Preset</i> de uma quantidade variável de registros (saídas analógicas)

Fonte: Modbus Organization (2012)

CAN

O protocolo CAN (*Controller Area Network*) é um sistema de barramento serial originalmente desenvolvido pela Bosch AG para aplicações em tempo real na indústria automotiva, e foi padronizado pela ISO 11898 e 11519 e equivale a camada de aplicação do modelo OSI. Atualmente se utiliza CAN para aplicações em automação industrial, como exemplo, o sistema DeviceNet™ da Rockwell Automation (Moraes e Castrucci, 2012, p. 172). A *CiA* (*CAN in Automation*) promove e regula as aplicações do protocolo CAN para fins de automação. A *CiA* define dados de processo, parâmetros de configuração e informações de diagnósticos (SCHWAB; AWANE; PIMENTEL, 2012, p. 60).

CAN é um sistema multi-mestre, comunica em *broadcast*, além de ter um mecanismo sofisticado de detecção de erros e retransmissão de mensagens de falha, garantindo a consistência de dados da rede. O protocolo também possui arbitragem de barramento não-destrutiva, garantindo que se dois ou mais nós requisitarem transmissão de mensagem, aquela com a mais alta prioridade tenha acesso ao barramento imediatamente.

A figura 29 mostra a arquitetura padrão de camadas definida pela ISO 11898.

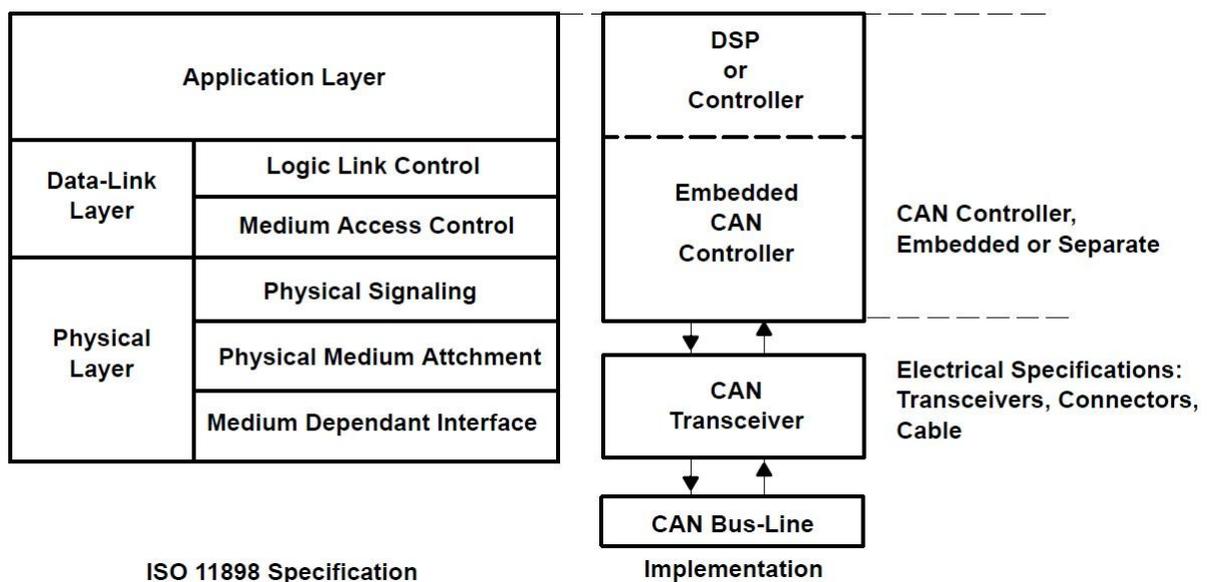


Figura 29 – Arquitetura CAN definida na ISO 11898
Fonte: ISO 11898 (2007)

CAN especifica dois estados lógicos: recessivo e dominante. No estado recessivo (lógica "1"), o diferencial de tensão entre o nível alto (CAN_H) e o nível baixo (CAN_L) deve ser menor que o máximo *threshold*. O estado dominante (lógica "0"), é definido pelo diferencial de tensão maior do que o mínimo *threshold*. A figura 29 mostra a representação física do *bit* no protocolo CAN.

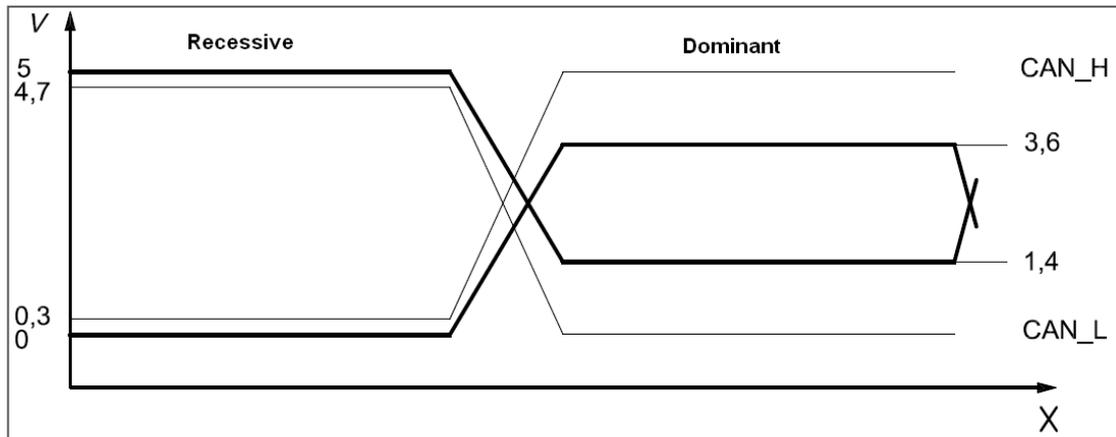


Figura 30 – Representação física do *Bit* no protocolo CAN
 Fonte: Schwab, Awane e Pimentel (2012, p. 61)

Geralmente o meio físico requer um par trançado com blindagem (STP) para o canal, CAN_H e CAN_L, através de um conector 9-pinos D-sub tipo conector macho, com a seguinte pinagem mínima:

- pino 2: CAN_L
- pino 3: GND (terra)
- pino 7: CAN_H
- pino 9: VDC (alimentação)

Finalmente, a estrutura de frames do protocolo CAN é apresentada e sucintamente descrita abaixo:



Figura 31 – Formato do quadro CAN padrão
 Fonte: ISO 11898 (2007)

- *SOF: start of frame* - início da mensagem.
- *11-Bit Identifier*: Identificador que estabelece a prioridade da mensagem. Quanto menor seu valor binário, maior é a prioridade (lógica "0" e "1").
- *RTR: Remote Transmission Request* - é dominante quando a informação é requisitada por algum outro nó. Todos os nós recebem a informação, mas o identificador determina o nó específico. A regra é equivalente para dados sendo respondidos pelos nós.
- *IDE: Identifier Extension* - identifica o tipo de frame CAN sendo transmitido.
- *r0*: Bit reservado
- *DLC: Data Length Code* - contém o número de bytes de dados sendo transmitido.
- *Data*: Até oito bytes de dados de aplicação sendo transmitido.
- *CRC*: contém o *checksum* dos dados transmitidos para detecção de erros.
- *ACK*: cada nó na rede reconhece o recebimento da mensagem para indicar que a mesma é livre de erros.
- *EOF: end of frame* - fim da mensagem.
- *IFS: Intermission Frame Space* - sete bits que contém o tempo necessário para o controlador CAN mover o quadro ora recebido para a sua posição na área de *buffer* de mensagem.

DeviceNet™

O protocolo DeviceNet™ é um protocolo de nível de dispositivos com modelo de rede produtor-consumidor e que utiliza o sistema CAN. Foi originalmente desenvolvido pela *Rockwell Automation* e é regulado pela ODVA. O DeviceNet™ equivale a uma camada de aplicação do modelo OSI (camada 7), que utiliza o protocolo CAN na camada de enlace de rede (camada 2) e sinalização do nível físico (camada 1). A tabela 5 mostra as características e funcionalidades do DeviceNet™.

Tabela 5 – Características e Funcionalidades do DeviceNet™

Funcionalidade	Valores		
Número possível de nós	Até 64 nós		
Taxa de transferência e Comprimento da rede e Derivação	Taxa de transferência e Comprimento da rede	Comprimento da Derivação (m)	
		Máxima	Acumulada
	125 Kbps → 500 m	6	156
	250 Kbps → 250 m	6	78
	500 Kbps → 100 m	6	39
Pacote de dados	Até 8 bytes (quadro CAN)		
Topologia	Barramento (tronco-derivação)		
Meio físico	Alimentação e sinal pelo mesmo cabo		
Endereçamento	Multi-mestre		
Resistor de terminação	Resistor de 121 Ω conectado somente no final do tronco (trunk)		
Característica	<i>Hot-swapping</i> (Remoção e inserção de dispositivos da rede em funcionamento)		

Fonte: Moraes e Castrucci (2012, p. 173)

Conforme a tabela 5, o DeviceNet™ é uma rede de barramentos ou tronco-derivação, os nós podem ser conectados diretamente ao cabo tronco (*trunkline*) ou através de uma variedade de derivadores e terminais. Independente do método de conexão ao barramento, cada nó deve ter no máximo seis metros (ou vinte pés) de distância do tronco.

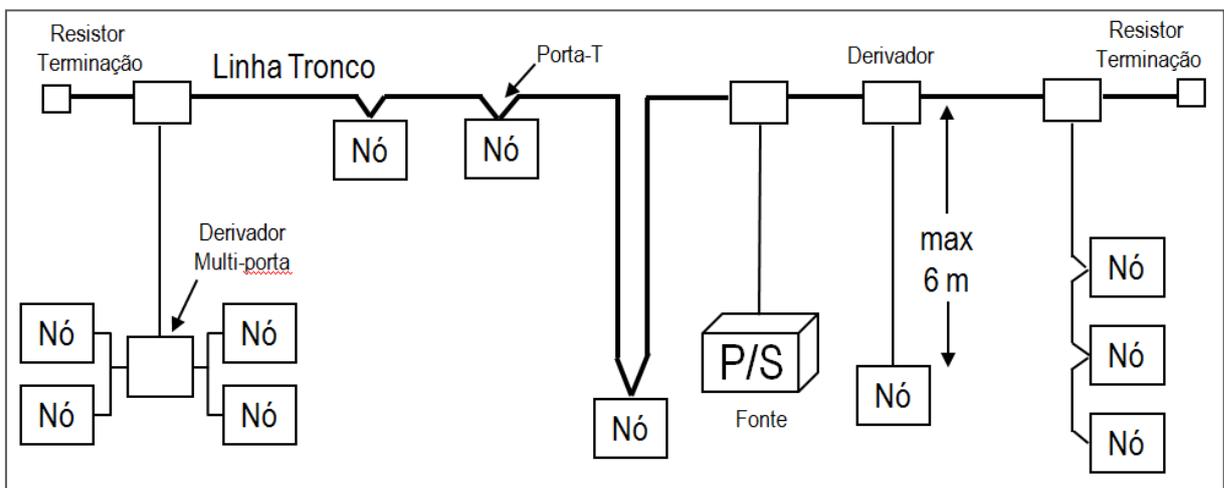
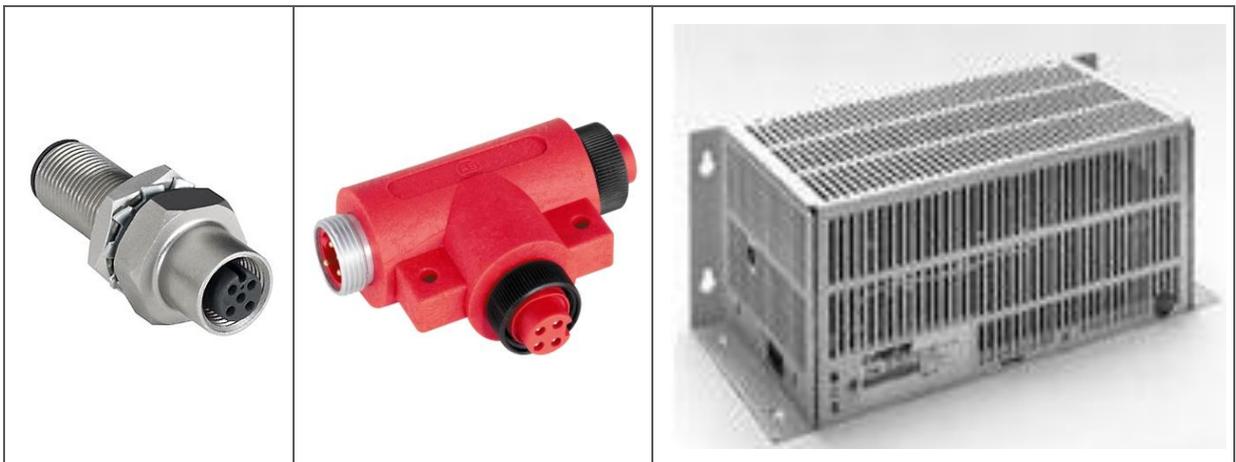


Figura 32 – Exemplo de topologia DeviceNet™
Fonte: O Autor (2013)

Como a rede é em barramento, cada fim de segmento deve ser terminada com resistores de 121Ω . Os cabos DeviceNet™ transportam o sinal da rede (CAN_L e CAN_H) e também a alimentação (24V). Isto permite ao usuário conectar dispositivos simples à rede sem ter que trazer uma fonte externa de potência. A figura 33 mostra alguns dos componentes físicos utilizados na rede DeviceNet™.



Cabo Tronco Flat (KwikLink) com conector



Conector 5-pinos

Porta-T

Fonte de Tensão

Figura 33 – Exemplos de produtos DeviceNet™
Fonte: Rockwell (2007)

O protocolo DeviceNet™ possui um modelo de objetos que fornece um gabarito e implementa os atributos (dados), serviços (métodos ou procedimentos) e comportamentos dos componentes de um produto DeviceNet™ baseado no modelo *CIP*, um protocolo estritamente orientado a objeto nas camadas de aplicação. No DeviceNet™, o modelo prevê um endereçamento de cada atributo consistindo de quatro números: o endereço do nó (MAC ID), o identificador da classe de objeto, a instância, e o número do atributo. Estes quatro componentes de endereço são

usados com uma mensagem explícita para mover dados de um lugar para outro numa rede DeviceNet™. A figura 34 abaixo mostra os atributos e alguns serviços especificados.

A estrutura da mensagem do CIP torna possível para vários nós consumir dados produzidos por uma única fonte com base unicamente no ID de conexão ao qual a mensagem se refere. Assim, o modelo produtor-consumidor fornece uma clara vantagem para usuários da rede CIP, fazendo uso eficiente dos recursos de rede das seguintes maneiras:

- Se um nó quer receber dados, ele só precisa perguntar uma vez para consumir os dados cada vez que estes dados são produzidos.
- Se um segundo (terceiro, quarto, etc.) nó quer os mesmos dados, tudo o que ele precisa saber é o ID da conexão para receber os mesmos dados simultaneamente com todos os outros nós.

Além do modelo de objetos, um fornecedor de um instrumento DeviceNet™ deve fornecer a folha de dados eletrônica do dispositivo (*Electronic Data Sheet* ou EDS). EDSs são arquivos de especificação associados a um dispositivo. Seu objetivo é definir o conjunto de funcionalidades presentes em um dispositivo e permitir uma rápida configuração dos sistemas computacionais de nível mais alto. Estes arquivos têm formato *ASCII* e incluem a descrição de atributos essenciais do instrumento como: nome, faixas de operação, unidades de engenharia, tipos de dados, etc. Alguns destes atributos constituem requisitos mínimos para aquela classe de instrumento. Outros são atributos específicos de um fornecedor.

Atributos	Serviços
<ul style="list-style-type: none"> • VendorID • Device Type • Product Code • Revision • Status • Serial Number • ProductName • Status 	<ul style="list-style-type: none"> • Get_attribute_Single • Reset

Figura 34 – Objeto identidade de um produto DeviceNet™
 Fonte: O Autor (2013)

Foundation Fieldbus

O termo Fieldbus descreve uma rede de comunicação digital que veio substituir o sistema de sinal analógico 4 - 20 mA existente ainda hoje nas indústrias (e muito difundido devido a sua imunidade à interferências eletromagnéticas). O Fieldbus pode ser definido como uma rede digital, bidirecional (de acesso compartilhado), multiponto e serial, utilizado para interligar os dispositivos primários de automação (dispositivos de campo) a um sistema integrado de automação e controle de processos (BEGA, 2011, p. 623). Cada dispositivo de campo pode possuir uma "inteligência" (microprocessador), o que o torna capaz de executar funções simples em si mesmo, tais como diagnóstico, controle e funções de manutenção, além de possibilitar a comunicação entre dispositivos de campo (não apenas entre o engenheiro e o dispositivo de campo). Em outras palavras, o Fieldbus veio para substituir o controle centralizado pelo distribuído. Vale ressaltar que o Fieldbus baseia-se no modelo ISO/OSI e que os níveis implementados são o 1,2 e 7. O modelo é reduzido para atender aos requisitos de tempo de resposta. A tabela 6 sumariza as características e funcionalidades da rede Fieldbus.

Tabela 6 – Características e funcionalidades do *Foundation Fieldbus*

Funcionalidade	Valores		
Número possível de nós	Até 32 dispositivos por segmento - máximo 126 Até 4 repetidores		
Taxa de transferência e Comprimento da rede e Derivação	Taxa de transferência e Comprimento da rede	Comprimento da Derivação (m)	
		AWG	Acumulada
	31.25 Kbps → H1	18	1900
	100 Mbps → HSE	16	200
Pacote de dados	Até 255 bytes		
Topologia	Barramento (tronco-derivação) e Árvore		
Meio físico	IEC 61158-2 (par trançado blindado) Alimentação e sinal pelo mesmo cabo		
Endereçamento	Multi-mestre		
Resistor de terminação	Resistor de 100 Ω e Capacitor 1 μF em série		
Característica	Pode ser intrinsecamente seguro		

Fonte: Bega (2011, p. 624)

Profibus

O Profibus (*Process Field Bus*), padrão fieldbus é governado pelo volume 2 do padrão europeu EN50170 e pelas partes 1 a 4 do DIN 19245 (padrão alemão, sua origem). O Profibus especifica as características técnicas e funcionais de um sistema fieldbus serial no qual controladores digitais descentralizados podem ser interligados do nível de campo ao nível de célula. Sua tecnologia é desenvolvida e administrada pela *Profibus User Organization*, cujos membros ao redor do mundo formam a Profibus International (PI). A arquitetura do Profibus é orientada no modelo de referência ISO/OSI, sendo utilizadas apenas as camadas física, enlace e de aplicação. O padrão possui uma família de 3 membros: Profibus-DP, Profibus-PA e Profibus-FMS.

Profibus-DP

Utilizado principalmente para transferência rápida de dados cíclicos entre controladores centrais (PCs e CLPs) e dispositivos de E/S descentralizados e “inteligentes” (válvulas, drives, etc.). Permite topologia em barramento, trinta e duas estações por segmento e um máximo de cento e vinte e sete estações (com repetidores). O quadro abaixo ilustra as velocidades possíveis e as distâncias correspondentes:

Tabela 7 – Velocidades versus distâncias no Profibus-DP

Taxa (Kbps)	9,6	19,2	93,75	187,5	500	1.500	12.000
distância/segmento (m)	1.200	1.200	1.200	1.000	400	200	100

Fonte: O Autor (2013)

O meio físico empregado pode ser o par-trançado blindado (RS-485) ou ainda a fibra ótica. Esta última pode ser usada para aplicações em ambientes com alta interferência eletromagnética e para aumentar a distância máxima para altas velocidades de transmissão.

Profibus-PA

Utilizado para conectar sistemas de automação e sistemas de controle de processo com os dispositivos “burros” de campo (tais como transmissores de pressão, temperatura e nível). É um substituto direto da tecnologia 4-20 mA. Seu meio físico está de acordo com o IEC 1158-2, que permite a alimentação de dispositivos pelo próprio barramento. Permite topologia em barramento ou árvore, utiliza par-trançado blindado ou não. Emprega velocidade de 31,25 Kbps, com até 32 estações por segmento e um máximo de 127 estações (com repetidores).

Profibus-FMS

Utilizado para comunicação no nível da célula. Neste nível, os controladores programáveis (PCs e CLPs) comunicam-se apenas entre eles.

O protocolo usado utiliza como acesso ao meio uma mistura de token-passing com o mestre-escravo. Entre os dispositivos controladores (PCs e CLPs), um token fica circulando, criando um anel lógico. E cada dispositivo controlador comanda os outros dispositivos (ditos passivos) através do método mestre-escravo.

4.3 PROTOCOLO INDUSTRIAL CONTROLNET™

O protocolo ControlNet™ foi desenvolvido pela *Allen-Bradley* (atual Rockwell Automation) em 1995, tornando-se um protocolo aberto controlado pela *ControlNet International* em 1996 e finalmente em 2008 passou para o suporte e gestão da ODVA. A rede ControlNet™ possui modelo de rede produtor-consumidor e é uma rede determinística, com repetibilidade, alto *throughput* (taxa de transmissão), sincronismo e grande comprimento de rede. Trata-se de uma rede robusta para o nível de controle, com transferência de dados em tempo real para dados críticos de E/S (entradas e saídas) e mensagens, incluindo configuração de dispositivos e adição/remoção de E/S em tempo real.

Tabela 8 – Características e funcionalidades do ControlNet™

Funcionalidade	Valores		
Número possível de nós	Até 99 nós (uso de repetidor a partir do 48º nó)		
Comprimento da rede e Derivação	Comprimento da rede	Media	Nós
	1000 m	Coaxial	2
	500 m	Coaxial	32
	250 m	Coaxial	48
	30 km	Fibra	Repetidor
Taxa de transmissão	5 Mbps		
Pacote de dados	Até 510 bytes		
Topologia	Barramento (tronco-derivação), árvore, estrela, anel ou combinações		
Modelo de rede	Produtor-consumidor		
Alimentação dos dispositivos	Alimentação externa		
Meio físico	RG-6 quad shield coaxial		
Endereçamento	Multi-mestre, <i>multicast</i> e <i>peer-to-peer</i>		
Resistor de terminação	Resistor de 75 Ω conectado somente no final do tronco (trunck) com conector BNC		
Característica	<i>Hot-swapping</i> Detecção de duplicidade de nós		

Fonte: Moraes e Castrucci (2012, p. 173)

A camada física ControlNet™ é implementado utilizando RG-6 cabo coaxial (até 1000 metros de comprimento máximo do segmento) e conectores BNC, com suporte

para cabeamento redundante. Cabos de fibra óptica, também podem ser utilizados para aumentar o comprimento máximo do segmento (até 30 km, dependendo do tipo de fibra utilizada). O esquema de sinalização utilizado é codificação Manchester, e a taxa de dados é de 5 Mbps.

ControlNet™ suporta várias topologias, incluindo barramento (tronco-derivação), árvore, estrela, anel ou combinações. Na sua forma mais simples, esta rede usa o barramento, no qual cada nó é conectado através de um derivador a uma linha de um metro. Repetidores são utilizados para conectar um número de segmentos. Alguns exemplos desta rede são mostrados abaixo.

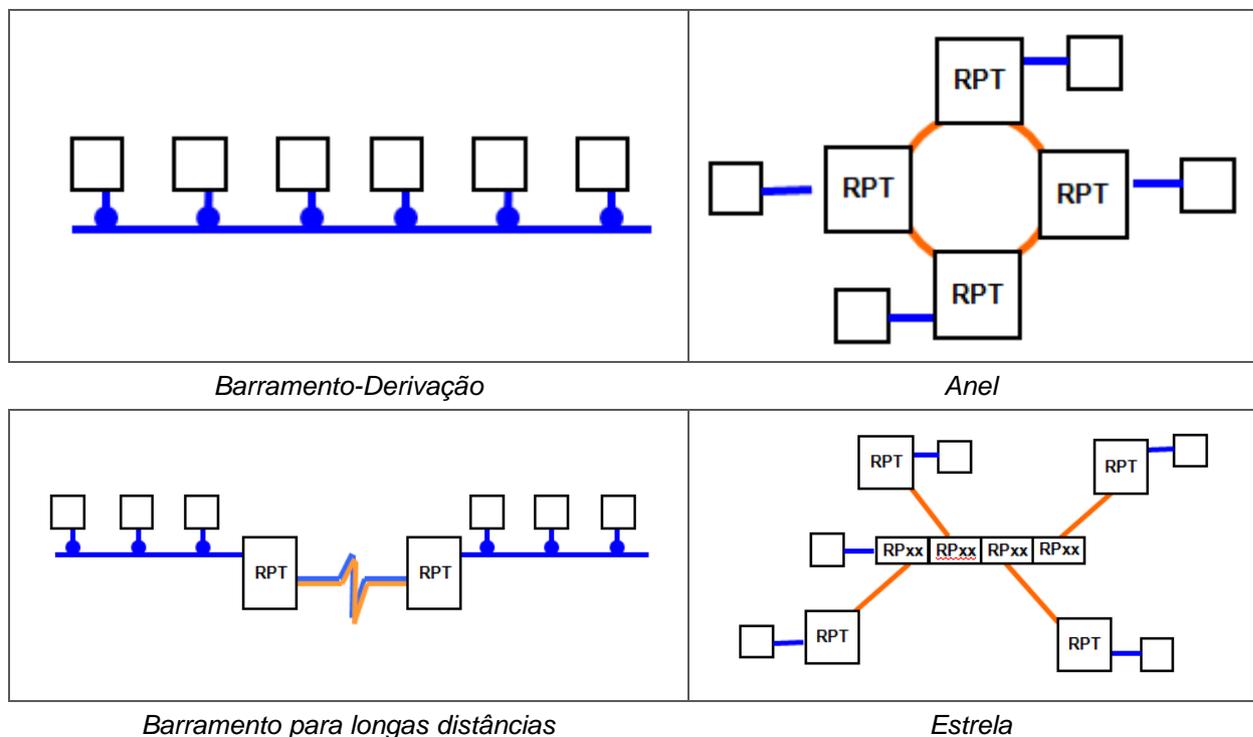


Figura 35 – Topologias para rede ControlNet™
Fonte: Rockwell (2006)

ControlNet™ utiliza o método *CTDMA* (*Concurrent Time Domain Media Access*) na sua camada de enlace para acesso ao barramento, isto significa que todo o tráfego de dados em uma rede ControlNet™ é estritamente programada e altamente determinista.

CTDMA significa que todos os nós tem acesso igual à rede em intervalos de tempo fixos. Um intervalo de tempo é configurado onde cada nó pode acessar a rede pela ordem seqüencial do seu nó. Após cada nó ter tido sua oportunidade de transmitir, os nós podem uma segunda chance de fazê-lo no tempo restante antes

do início do próximo intervalo. Cada nó tem a garantia de transmitir a cada intervalo, porém não há garantia que tenha uma segunda chance neste mesmo período temporal.

A oportunidade garantida de transmitir é chamada de agendada (*scheduled*), e os dados adicionais enviados na seqüência ocorrem nos dados não-agendados (*unscheduled*). Cada intervalo de tempo, ou *NUT* (*Network Update Time*), é subdividida no tempo de serviço agendado (*scheduled*), em tempo de serviço não-agendado (*unscheduled*) e tempo de manutenção de serviço (*guardband*). A figura 36 representa os conceitos apresentados acima.

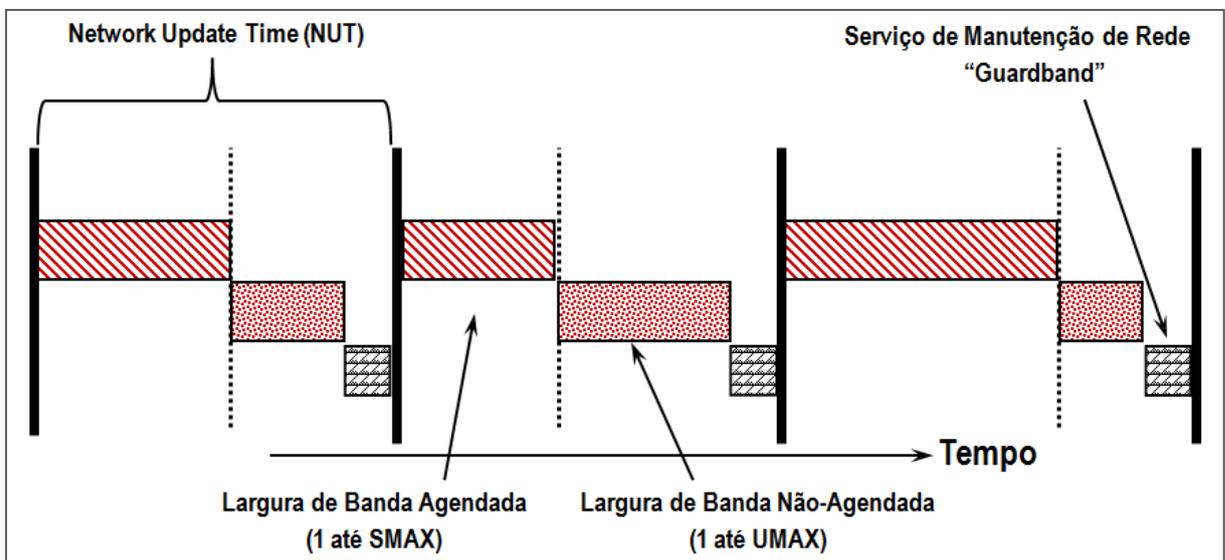


Figura 36 – Definições do CTDMA na rede ControlNet™
Fonte: Rockwell (2006)

A figura acima apresenta os seguintes conceitos da rede:

- *NUT*: intervalo de tempo base no qual a rede reinicia a largura de banda agendada (configurável de 2ms a 100ms).
- Largura de banda agendada: cada nó terá uma oportunidade por *NUT* para enviar dados.
- Largura de banda não-agendada: cada nó terá uma oportunidade compartilhada para enviar dados numa ordem de "fatias" de tempo iguais até que o *NUT* seja exaurido.
- *Guardband* - pequeno pedaço de dados enviados ao final de cada *NUT* para manutenção e coordenação da rede.

- *SMAX* - *scheduled maximum* address: endereço do nó de maior numeração que pode transmitir durante a banda agendada.
- *UMAX* - *unscheduled maximum* address: endereço do nó de maior numeração que pode transmitir durante a banda não-agendada.

Para completar a base conceitual desta rede, alguns outros conceitos necessitam ser postos:

- *Slot time*: intervalo de tempo que se deve esperar antes de declarar que um dado nó não vai comunicar. Como o *schedule* dos nós é seqüencial, caso hajam nós faltando na configuração, haverão tantos *slot times* quantos nós faltantes na rede.
- *RPI* - *Requested Packet Interval*: taxa na qual o usuário define que dois dispositivos devam comunicar. Ao invés de enviar todos os dados a cada *NUT*, os dispositivos podem enviá-los somente na taxa demandada pela aplicação.
- *API* - *Actual Packet Interval*: taxa real em que dois dispositivos comunicam. Naturalmente, o *API* sempre será menor que o *RPI*, uma vez que a comunicação se dará dentro de um ou múltiplos binários de um *NUT*.
- *Scanner* - dispositivos que podem abrir conexões agendadas e comunicar durante a parte agendada de um *NUT*. Os CLPs são dispositivos desta classe.
- Adaptadores - dispositivos que podem comunicar durante a parte agendada de um *NUT* mas não podem abrir conexões agendadas. Dispositivos de E/S são classificados nesta classe.
- Mensagem - dispositivos que não podem comunicar durante a parte agendada de um *NUT*. Geralmente as *NICs* (placas de rede) estão nesta classe.

Configurando o ControlNet™

Há três maiores componentes de software quando se trabalha com a rede ControlNet™. A figura 37 mostra como as camadas físicas se relacionam com os pacotes de configuração.

- *RSNetWorx*: software de comissionamento de rede. Este software criará o *schedule* da rede e pode também ser utilizado para configurar conexões individuais.
- *RSLinx*: contém os *drivers* para os cartões de comunicação no computador. Trata-se do *gateway* para a rede para todos os pacotes de software residentes

no computador. Na rede ControlNet™ o *RNetWorx* comunica através do *RSLinx*.

- *RSLogix 5000*: software de programação para os controladores *Rockwell Logix*. Trata-se também da interface de configuração para as conexões ControlNet™ antes do *schedule* de rede pelo *RNetWorx*.

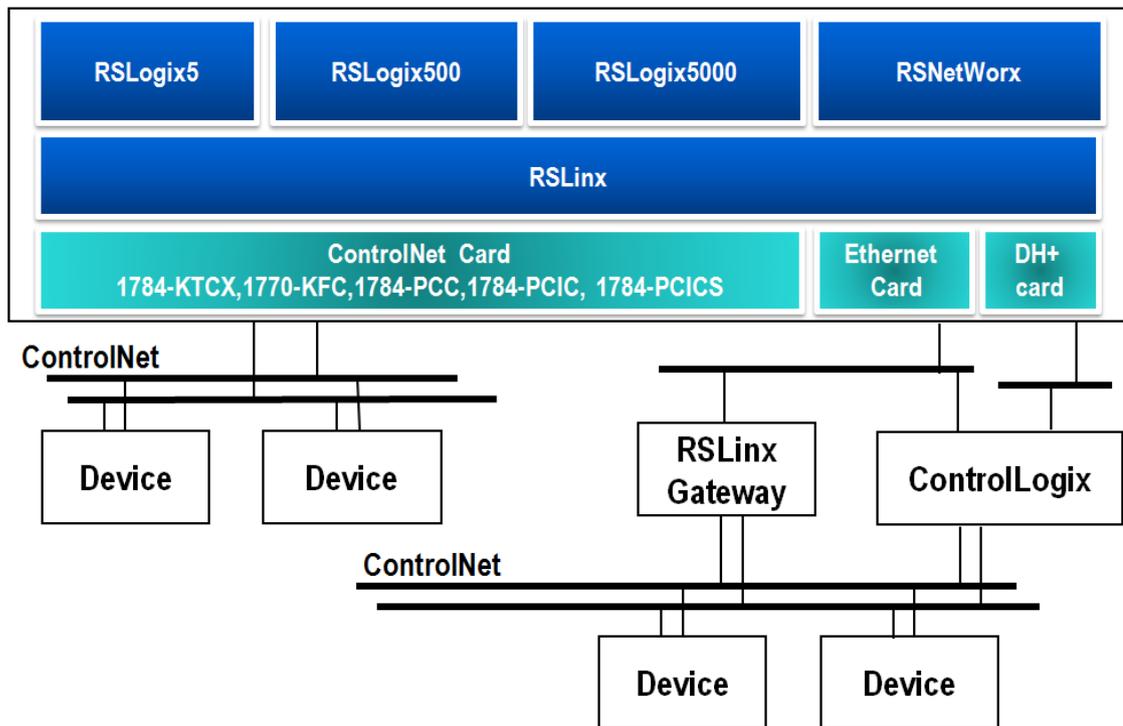


Figura 37 – Softwares para configuração da rede ControlNet™
Fonte: Rockwell (2006)

O *RNetWorx* para o ControlNet™ é utilizado para fazer o *schedule* da rede, com as seguintes informações básicas. A interface gráfica é similar à apresentada na figura 38.

- Network Update Time (NUT)
- Scheduled Maximum Nodes (SMAX)
- Unscheduled Maximum Nodes (UMAX)
- Configuração do meio físico: para cálculo do *slot time*.

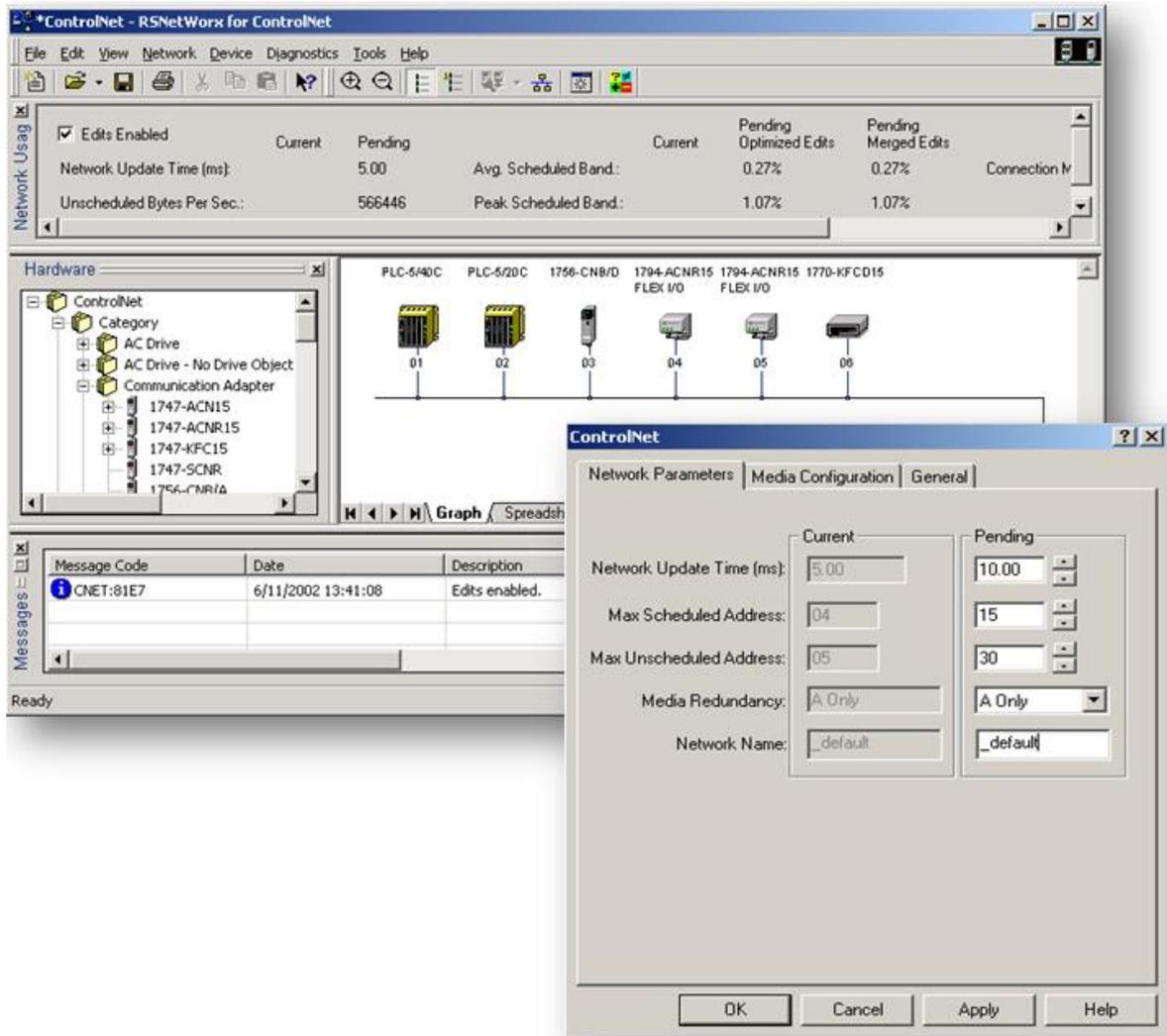


Figura 38 – Interface gráfica do RSNetWorx para ControlNet™
 Fonte: Rockwell (2006)

4.4 PROTOCOLO INDUSTRIAL ETHERNET/IP™

Existe um número de protocolos que usam a Ethernet para permitir dispositivos industriais como CLPs comunicarem em rede. Estes protocolos são conhecidos como protocolos de nível de aplicação e estão no topo das camadas da rede Ethernet TCP/IP, vide figura 20 no capítulo 2. Ethernet/IP™ é um protocolo de comunicação originalmente desenvolvido pela *Rockwell Automation* e atualmente regulada pela ODVA, projetada para ser usada em redes de controle de processos e outras aplicações de automação industrial. Qualquer dispositivo ou rede que comunique utilizando o protocolo CIP (vide figura 25 deste capítulo) via Ethernet é um dispositivo ou rede Ethernet/IP™. A rede Ethernet/IP™ é chamada Ethernet para

controle, enquanto a Ethernet propriamente dita é conhecida como uma rede para informação. A figura 39 mostra o modelo de protocolo Ethernet/IP™ comparado ao modelo OSI, na figura 20 do capítulo 2 aliado aos conceitos do protocolo CIP mostrado na figura 25 deste mesmo capítulo.

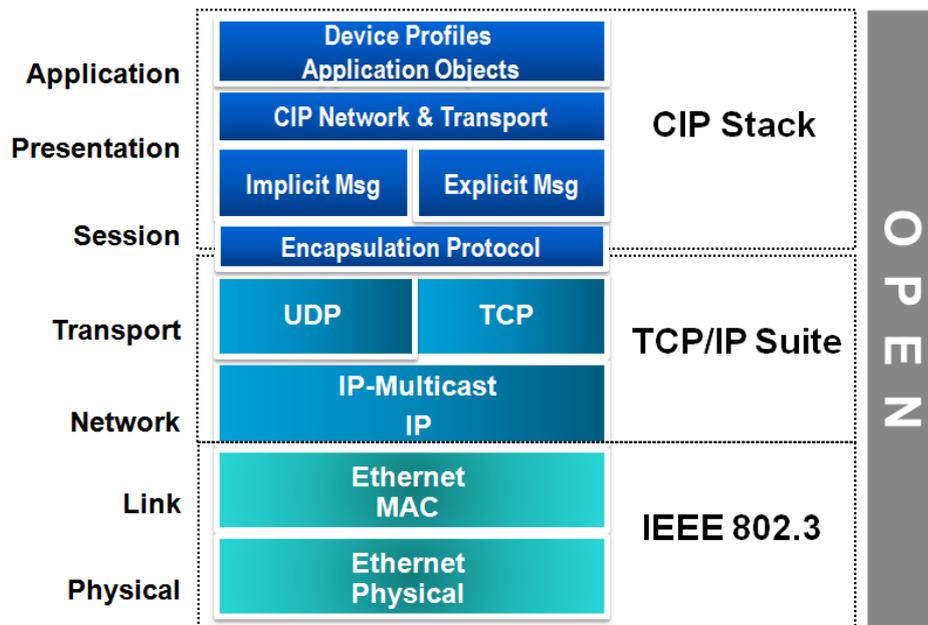


Figura 39 – Modelo de camadas da rede Ethernet/IP™
Fonte: Rockwell (2006)

Ethernet/IP™ utiliza dois tipos de conexões de mensagens:

- Conexões de mensagens explícitas: relações ponto-a-ponto que são estabelecidas para facilitar transações de solicitação-resposta entre dois nós. Estas conexões utilizam os serviços *TCP/IP* para mover as mensagens através da Ethernet.
- Conexões de mensagens implícitas: movem dados de E/S específicos da aplicação em intervalos regulares. Utilizam o modelo produtor-consumidor *multicast* e serviços *UDP/IP* para transferir dados sobre a Ethernet.

Assim como a ControlNet™, a Ethernet/IP™ suporta três classes de dispositivos baseados nas competências de comunicação da rede: classes de mensagem, adaptadores e *scanners* e utiliza o protocolo orientado a objetos *CIP* na camada de aplicação.

5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta as diferenças entre as implementações das redes ControlNet™ e Ethernet/IP™, assim como uma análise detalhada dos prós e contras de cada uma, desde análise do meio físico, das configurações de sistemas e da operação.

São apresentadas diferenças tecnológicas, custos para implementação de cada uma, bem como uma análise minuciosa da especificação técnica de cada rede. Além disto, a proposta para alteração da arquitetura de rede do MCS de ControlNet™ para Ethernet/IP™, e finalmente a bancada SCADA construída para validar projetos com ambas as redes propostas.

5.1 DADOS PARA A ESCOLHA DA REDE

As arquiteturas de rede são comumente divididas em três níveis:

- **Nível de informação:** os dispositivos típicos são computadores e CLPs. Os usos mais comuns são a coleta de dados, monitoramento de dados, transferências de arquivos e e-mail. Neste nível, o foco da rede é maior volume e variedade de tipo de comunicações.
- **Nível de controle:** dispositivos típicos são CLPs, terminais IHM, e chassis de E/S. Uso comum é para controle de dispositivos de chão de fábrica. Aqui o foco é alta velocidade com volume moderado.
- **Nível de dispositivos:** dispositivos típicos são dispositivos de campo, tais como botoeiras, luzes, interruptores e válvulas. Uso comum é para conexão direta com dispositivos de campo. Neste nível, o foco da rede é baixo custo e baixo volume.

Alguns dados para a diferenciação das redes podem ser:

- tamanho do quadro a ser transmitido;
- método de acesso à rede;
- habilidade de priorizar dados;
- custo para implementação;
- facilidade e frequência de manutenção;
- quantidade de dispositivos que possam conectar a esta rede: rede aberta;
- requisitos de software;

- habilidade e facilidade em adicionar e remover nós da rede.

Alguns destes critérios são investigados em maiores detalhes a seguir.

Estrutura do pacote

Todos pacotes são feitos de uma parte de cabeçalho (*overhead*) e uma parte de dados. Como visto anteriormente, como por exemplo, na seção sobre protocolos industriais do capítulo 4, o *overhead* contém informações sobre que dispositivo está transmitindo, que tipo de dado, destino, etc. A parte de dados contém o dado real sendo trocado.

Em uma rede de nível de informação, os pacotes tendem a ser maiores, com ambas as seções, *overhead* e dados, grandes; já numa rede de nível de controle, os pacotes tendem a ter tamanho médio, com privilégio para os dados e numa rede de nível de dispositivos, os pacotes tendem a ser o menor possíveis com pequeno tamanho tanto para o *overhead* quanto para os dados, devido à necessidade de se disponibilizar os dados assim que possível.

Como exemplo na figura abaixo, uma comparação entre pacotes da redes *CIP*, Ethernet/IP™, ControlNet™ e DeviceNet™ para o caso de leitura de dados de um CLP.

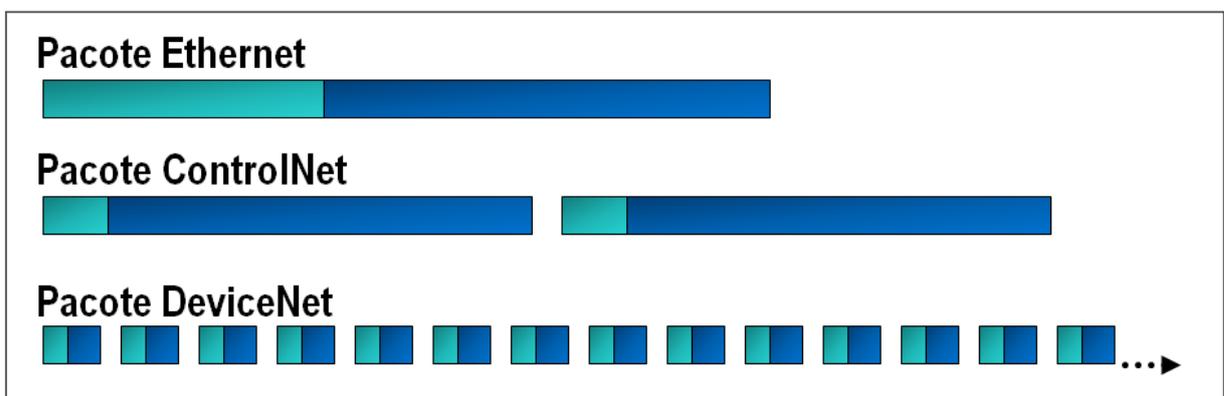


Figura 40 – Estrutura de pacotes para redes *CIP*
Fonte: Rockwell (2006)

Caso a leitura dos dados demande 850 bytes de informação, serão necessários dois quadros ControlNet™ e mais de cem quadros DeviceNet™ para apenas um

Ethernet/IP™. O fato de o pacote Ethernet demandar mais bytes para o *overhead* é compensado pelo maior *baud rate* (velocidade de sinalização que representa o número de mudanças na linha de transmissão ou eventos por segundo), isto é, 500 *Kbps* para DeviceNet™, 5*Mbps* para ControlNet™ e 100 *Mbps* para Ethernet/IP™. Além disso, o fato de o conteúdo demandar apenas um quadro Ethernet, os recursos de processamento, bufferização, e outros são economizados nesta rede.

Custos para implementação

Quando se analisa os custos para implementação de uma nova rede ou ampliação de uma já existente deve-se considerar dentre outros fatores:

- Se já existe um *backbone*³ e qual a sua tecnologia. Algumas vezes, manter a tecnologia de rede existente é a melhor opção. Caso a rede seja totalmente nova, o alinhamento com as necessidades gerais da aplicação precisa ser respeitado.
- Softwares adicionais para comissionar a rede, incorrendo em custos adicionais de licença e de renovações anuais.
- Treinamento do time de desenvolvimento e manutenção, em caso de redes que não sejam de experiência prévia.
- Hardware adicional, como dispositivos ativos na rede, como *switches*.

Uma comparação entre os custos de implementação das redes Ethernet/IP™, ControlNet™ traz as seguintes referências:

- ControlNet™ requer a compra do software *RSNetWorx* para o comissionamento e *schedule* da rede, além do *RSLinx* e do *RSLogix 5000*, enquanto que para a Ethernet/IP™ a programação e manutenção podem ser feitas diretamente pelo *RSLogix 5000* e *RSLinx*, e em alguns casos até diretamente via *Web server*.
- Ethernet/IP™ requer dispositivos ativos, tais como os *switches* da rede, entretanto a rede ControlNet™ necessita de cabos coaxiais específicos da

³ No contexto de redes de computadores, o backbone designa o esquema de ligações centrais de um sistema mais amplo, tipicamente de elevado desempenho.

Rockwell, que demandam cautela da hora da montagem, onerando o custo de montagem dos sistemas.

- A placa de interface ControlNet™ deve ser comprada para um computador rodando esta aplicação, enquanto que a maioria dos computadores têm placas de rede Ethernet *onboard*.
- Para novas instalações, muitas vezes o custo do Ethernet/IP™ será menor devido ao fato de a maioria das plantas já possuírem estrutura de rede Ethernet. Isto aumenta a) a habilidade de usar cabeamento e hardware existentes, b) menor número de sobressalentes, c) menor investimento em treinamento, d) habilidade em se usar ferramentas já existentes de *troubleshooting*.
- Para os sistemas das figuras 41 e 42, os custos aproximados para implementação das redes são de vinte mil e quinhentos dólares para a rede ControlNet™ e vinte e quatro mil dólares para a rede Ethernet/IP™, o que comprova que custo não é limitante para a alteração. As tabelas 9 e 10 mostram custos dos componentes na data corrente para cada tecnologia.

Tabela 9 – Custos para componentes de rede ControlNet™

Item	Descrição	Quantidade	Custo Total (USD) ⁽¹⁾
1786XT	Terminal resistivo de 75 Ohms para rede ControlNet	4	35
1786TPS	Cabo-conector coaxial para ligação ControlNet - derivação T-TAP	16	1.642
1786RG6	Cabo Coaxial Padrão RG6 - bobina com 304.8 metros	1	608
1786BNC	Conector Coaxial Padrão RG6 75 Ohms	28	224
1756CN2R	Módulo adaptador de rede ControlNet redundante	6	16.314
1734ACNR	Módulo adaptador ControlNet de 24 Vcc	2	1.203
1786CTK	Kit de ferramentas para terminação conectores ControlNet	1	532
Total			20.523

Fonte: O Autor (2013)

Notas:

(1) a cotação do dólar considerada refere-se ao câmbio do banco central de Agosto de 2013.

(2) os custos são referenciais do distribuidor Rockwell na região sul do Brasil.

Tabela 10 – Custos para componentes de rede Ethernet/IP™

Item	Descrição	Quantidade	Custo Total (USD) ⁽¹⁾
1756EN2TR	Módulo Ethernet/IP alta capacidade com 2 entradas para ControlLogix	6	22.089
1585JM4TBJM2	Cabo Ethernet 2m com conectores RJ45	8	312
1734AENTR	Módulo adaptador para rede Ethernet com 2 portas	2	1541
Total			23.942

Fonte: O Autor (2013)

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE ETHERNET/IP™ E CONTROLNET™

Existem três fatores principais de preocupação na escolha da rede Ethernet/IP™: nível de rede, determinismo e segurança.

Com respeito ao determinismo, a rede ControlNet™ é determinística por natureza, no sentido que as taxas de pacotes (RPIs) e *jitter* podem ser precisamente controlados. *Jitter* é uma variação estatística do atraso na entrega de dados em uma rede, ou seja, pode ser definida como a medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados.

Por outro lado, na rede Ethernet/IP™, pode-se controlar o RPI mas não o *jitter*. Entretanto, a rede pode rodar até vinte vezes mais rápida e atualmente utiliza configuração *full-duplex*, com um canal exclusivo para transmissão e outro exclusivo para recepção, o que auxilia o algoritmo CSMA/CD eliminando colisões, além de elementos ativos na rede como *switches* gerenciáveis que conseguem eliminar os atrasos relacionados ao tráfego na rede, garantindo níveis de serviço (QoS). Como resultado final, a rede Ethernet/IP™ tem demonstrado determinismo suficiente para controle de E/S e outras operações críticas em automação.

Finalmente, com respeito à segurança da rede, existe ainda hoje a preocupação de se utilizar a Ethernet para redes de automação industrial pelo possível acesso à ela. A melhor prática para se diminuir o risco de acidente ou invasão à rede Ethernet utilizada para controle industrial é isolar a rede de controle Ethernet/IP™ da rede Ethernet de informação, conforme proposto na figura 42. Níveis adicionais de segurança podem ser obtidos utilizando dispositivos padrões de rede como *firewalls*

e *switches* que suportem VLANs também são soluções que agregam segurança à rede.

A tabela 11 sumariza as características e funcionalidades técnicas de redes industriais comparando as redes ControlNet™ e Ethernet/IP™.

Tabela 11 – Especificações técnicas do ControlNet™ e do Ethernet/IP™

Especificações Técnicas	ControlNet™	Ethernet/IP™
Desenvolvedor da Tecnologia	<i>Rockwell Automation</i>	<i>Xerox Palo Alto</i>
Taxas de transmissão (<i>Mbps</i>)	5	10/100
Tecnologia de comunicação	produtor-consumidor	produtor-consumidor ponto-a-ponto
Algoritmo de acesso ao meio	CTDMA	CSMA/CD
Codificação	Manchester	Manchester
Meios físicos	Coaxial / Fibra Óptica	Par trançado / Coaxial / Fibra Óptica
Topologia	Barramento (tronco-derivação), árvore, estrela, anel ou combinações	Barramento (tronco-derivação), árvore, estrela, anel ou combinações
Número possível de nós	99	Ilimitados ⁽¹⁾
Número de repetidores	5	4
Determinismo	Sim	Não ⁽²⁾
Padrões	<i>EN50170</i>	<i>IEEE802.3</i>
Alimentação barramento	Não	Não
Comprimento da rede (<i>m</i>)	5.000 (coax) @ 5 <i>Mbps</i> 30 Km (fibra)	100 (cobre) 20 Km (fibra)
Pacote de dados (<i>bytes</i>)	0 - 510	0 - 1500
Resistor de terminação	75 Ω no final do tronco (trunk) com conector BNC	N/A
NUT (tempo de varredura) (<i>ms</i>)	2 - 100	1.6 - 25.6
E/S triggers	- Cíclica - Varredura - Mudança de Estado	- Cíclica - Varredura - Mudança de Estado
CRC	Polinômio de 16-bits	Polinômio de 32-bits
Camada de Aplicação	- Orientado a objetos: classes/instâncias/atributos	- Orientado a objetos: classes/instâncias/atributos
Hot-swapping	Sim	Sim
Repetibilidade	Sim	Sim

Segurança Intrínseca	Sim	Não
Detecção de ID de nó duplicado	Sim	Sim
Fragmentação de mensagem	Sim	Sim

Fonte: O Autor (2013)

Notas:

(1) de fato, o número máximo de nós é maior que 1.000 (LIAN; MOYNE; TILBURY, 2002, p. 73).

(2) vide a nota na seção 5.2 sobre determinismo em redes baseadas em Ethernet *full-duplex*.

A tabela 12 sumariza alguns parâmetros de projeto levados em consideração na comparação entre as redes ControlNet™ e Ethernet/IP™.

Tabela 12 – Parâmetros de projeto para a seleção da rede industrial

Parâmetros de Projeto	ControlNet™	Ethernet/IP™
Custo	++	++
Esforço Instalação	+++	++
Softwares	+++	++
Treinamento	+++	++
Manutenção	+++	++
Tendência à Obsolescência	+++	+

Fonte: O Autor (2013)

Notação:

- (+) Denota menor custo operacional, financeiro ou mercadológico para a implantação e manutenção.
 - (++) Denota médio custo operacional, financeiro ou mercadológico para a implantação e manutenção.
 - (+++)
- Denota maior custo operacional, financeiro ou mercadológico para a implantação e manutenção.

5.3 ARQUITETURA PROPOSTA PARA O MCS

A arquitetura corrente para os projetos entregues é apresentada na figura 41.

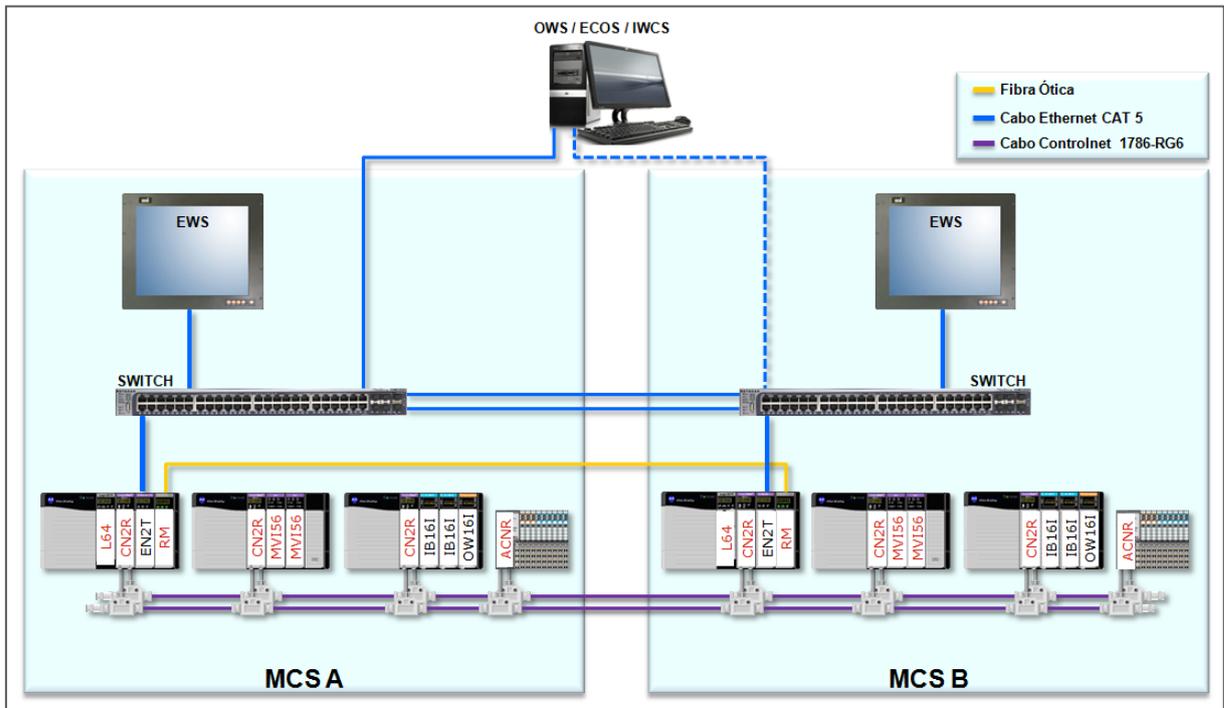


Figura 41 – Topologia para uso da rede ControlNet™ no MCS
 Fonte: AkerSolutions (2012)

Nesta arquitetura vigente até 2012, tem-se como principais características:

- A rede no nível de controle apresenta topologia de barramento (tronco-derivação) com redundância física dual.
- Conforme demonstrado na tabela 9, existe a necessidade de crimpagem de cabos coaxiais, e conseqüentemente os testes dos mesmos. No caso de equipamentos Rockwell, itens específicos para a rede ControlNet™ devem ser utilizados: 1786-RG6, 1786-TPS, 1786-XT, 1786-TPYS.
- Configuração do *schedule* de rede deve ser feita através do *RSNetworkx* e isto não pode ser feito com o processador *online*.
- A taxa de transmissão máxima para a rede ControlNet™ é de 5,0 Mbps.

A arquitetura proposta para os projetos futuros é apresentada na figura 42.

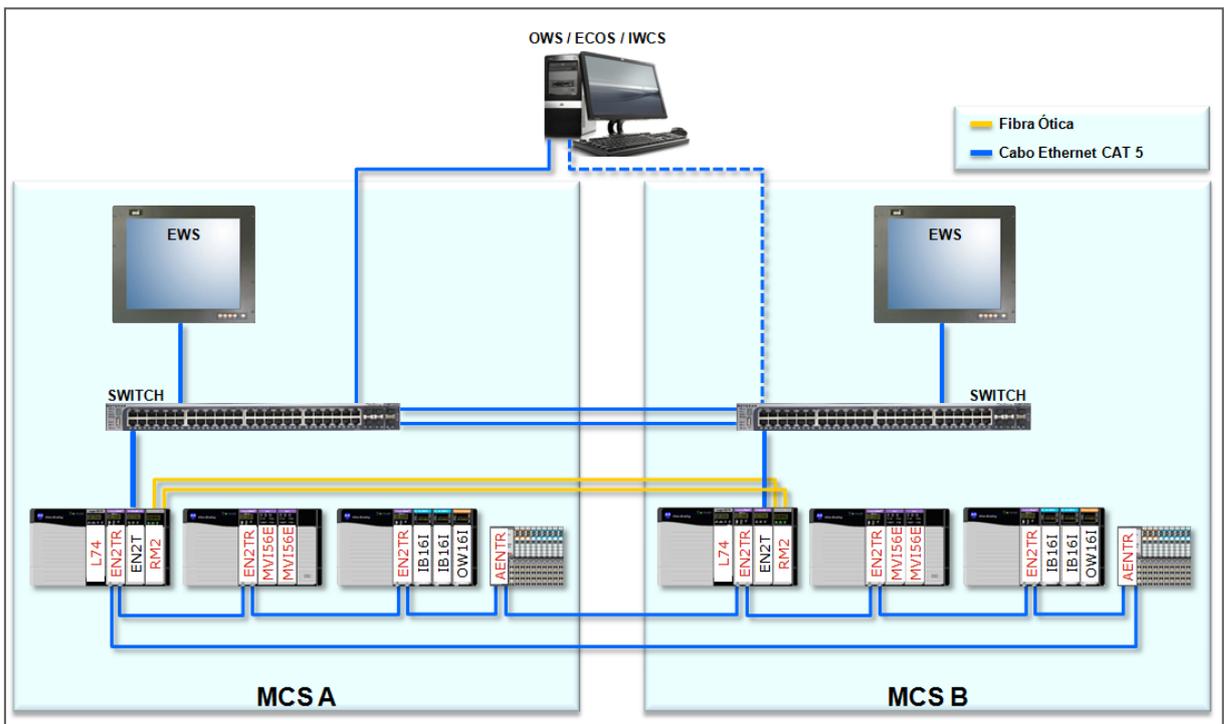


Figura 42 – Topologia para uso da rede Ethernet/IP™ no MCS
Fonte: AkerSolutions (2013)

Nela, são presentes as seguintes características:

- A rede apresenta topologia em anel, do tipo *DLR (device-level ring)*, para garantir a continuidade do serviço.
- A rede Ethernet/IP™ tem instalação mais simples, como pode ser aferido na tabela 10.
- Sua programação e manutenção são mais simples podendo ser feitas diretamente pela ferramenta de programação, *RSLogix 5000* e *RSLinx*, e em alguns casos até diretamente via *Web Server*.
- A taxa de transmissão máxima para a rede Ethernet/IP™ é de 100,0 Mbps.
- A rede de automação é completamente isolada da rede que conecta dispositivos de terceira parte: *OWS (Operator workstation)*, *ECOS (Estação de Controle de Operação e Supervisão)* e *IWCS (Intelligent Well Control System)*; o que garante a segurança da rede.
- Outro fator importante a favor desta arquitetura é a tendência de convergência de redes industriais às redes baseadas em Ethernet (Rockwell, 2011).

5.4 AVALIAÇÃO DAS REDES ATRAVÉS DA BANCADA SCADA

Uma bancada de testes SCADA foi projetada com o intuito primário de prover uma ferramenta para testes, *troubleshooting* e treinamento de pessoal no hardware e software do MCS.

Para tanto, um estudo de *backward compatibility* (compatibilidade com versões anteriores) foi feito para todos os projetos entregues pela empresa. Isto garante que qualquer software de qualquer projeto possa ser testado nesta bancada. Todavia, uma das premissas adotadas foi o estado da prática atual, isto é, quais componentes estão sendo entregues nos projetos correntes e qual a tendência mercadológica.





Figura 43 – SCADA Test Bench para simular MCSs
Fonte: AkerSolutions (2013)

Como os novos projetos a serem entregues terão como rede de automação a Ethernet/IP™, esta bancada foi projetada para comportar tanto esta quanto a ControlNet™. Procurou-se garantir que as alterações de configuração necessárias para se executar um programa nesta bancada fossem as menores possíveis, podendo assim esta ser uma ferramenta de certificação pré-*offshore*, e por isto a redundância física dos componentes foi mantida, com a simples diferença de não estarem em cabines fisicamente separadas, mas sim num único *rack*.

A otimização de espaço foi obtida utilizando um *rack* com dupla face como pode ser visto nas vistas anterior e posterior da figura 43. A face frontal da cabine contém

os componentes primários do MCS: CPU do PLC, controladores de rede, cartões de E/S e remotas, além de modem, switch e computador industrial. Já a face posterior, contém uma linha mais simples da Rockwell, a CompactLogix com E/S suficientes para testar as funcionalidades do sistema, além de sistema de proteção e conexões.

Esta bancada SCADA se limita a emular a parte superior da figura 11 da seção 2.3.1, isto é, a parte de comando e sinal, sem incluir as EPU's, que simplesmente agregam a potência e combinam o sinal elétrico de controle e monitoração. Desta forma, esta bancada consegue reproduzir as características de controle, supervisão e comando do sistema.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou as alterações de topologia de uma rede de controle ControlNet™ para uma rede Ethernet/IP™, procurando investigar seu impacto financeiro para os projetos, seus ganhos de implementação e manutenção, assim como sua aderência à tendência tecnológica e mercadológica. Para uma maior familiarização com os conceitos de engenharia submarina e de redes de computadores, dedicou-se os capítulos 2 e 3 à apresentação dos fundamentos destas disciplinas, voltadas naturalmente para a compreensão da proposta deste trabalho. No capítulo 2 o MCS é apresentado, bem como sua funcionalidade e diagramas para um correto entendimento da sua utilização. O capítulo 3 apresenta os fundamentos de redes de computadores, com especial ênfase ao modelo ISO/OSI e à rede Ethernet, que fundamenta a utilização da rede Ethernet/IP™. O capítulo 4 apresentou uma revisão sobre as redes industriais mais utilizadas buscando ressaltar os fatores positivos e negativos de cada uma delas, assim como estabelecer um critério de comparação às redes alvos deste estudo, ControlNet™ e Ethernet/IP™.

Finalmente, no capítulo 5, a convergência dos conceitos apresentados na forma de resultados e propostas de implementação são apresentados. O estudo afinal mostra que fatores como convergência tecnológica, padronização, obsolescência e viabilidade financeira permitem a alteração da topologia do MCS com o uso com o ControlNet™ para o Ethernet/IP™. O estudo ainda mostra que o Ethernet/IP™ é mais robusto em termos de largura de banda, facilidade de instalação e manutenção, assim como na configuração da rede; ainda que a rede ControlNet™ seja inerentemente uma rede de controle com alto determinismo devido a sua tecnologia de comunicação e acesso ao meio, a Ethernet/IP™ se mostra uma opção tão segura e precisa quanto e como já exposto, com muito maior largura de banda para transmitir e receber dados. No caso dos MCSs com a nova rede de controle, existe o requisito do cliente de *backward compatibility*, isto é, que as novas cabines sejam compatíveis e possam substituir as cabines equipadas com módulos da rede ControlNet™ com o mínimo esforço de configuração, ou idealmente, nenhum esforço; o que é garantido dado que a rede de controle cuida somente dos processos internos do MCS, não afetando a interface ModBus com os sensores de campo nem mesmo o mapa OPC de interface com terceiras partes.

Um estudo da Rockwell (2011) mostra que a Ethernet/IP™ possuía trinta por cento de todo faturamento em redes industriais, e somado a demais redes baseadas em Ethernet, como o ModBus TCP e a PROFINET, chegava-se a quase setenta por cento de domínio. Este valor se reflete no número de nós instalados, o que também denota a convergência para a tecnologia no meio industrial.

Para a alteração proposta neste trabalho, a alteração da topologia consiste num esforço global de a) alteração de engenharia, revisando-se diagramas, esquemáticos, listas de materiais e novos desenhos de conjuntos; b) validação do conceito com o cliente final e centro de excelência e c) viabilidade financeira. Estas etapas foram feitas e concluídas com sucesso e a implementação está autorizada a ser feita.

Como sugestão para trabalhos futuros convém mencionar:

- Análise experimental do efeito temporal das duas redes na troca de dados do MCS. Como sugestão, com a utilização da bancada SCADA, gerando-se tráfego de rede nas configurações das figuras 41 e 42, aferir a respostas das redes de controle para diferentes tamanhos de pacotes de dados, utilizando ferramentas de monitoração como o Wireshark para a rede Ethernet/IP™ e o ControlNet™ *Traffic Analyzer*, se disponível.
- Avaliar, a partir do experimento acima, o atraso nas entregas dos pacotes de cada rede, bem como o *jitter* de cada uma, segundo a abordagem de Lian; Moyne e Tilbury (2002).
- Avaliar o requisito segurança para cada rede de automação, focando na Ethernet/IP™, investigando políticas de *firewalls* e proteções em tempo real, malhas fechadas (segmentação de redes), roteamento e balanceamento de cargas, assim como disponibilidade para sistemas de segurança instrumentados (SIS) e *Safety Integrity Level (SIL)*; e
- Finalmente propor uma comparação entre protocolos baseados em Ethernet, como o PROFINET, utilizado em equipamentos da Siemens, ModBus TCP e EtherCAT.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Standard 6A**: Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. 9. ed. Washington, 2004.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Standard 17A**: Recommended Practice for Design and Operation of Subsea Production Systems. 4. ed. Washington, 2006.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Standard 17P**: Design and Operation of Subsea Production Systems - Subsea Structures and Manifolds. 1. ed. Washington, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Minuta do Contrato**: Contrato de Concessão para Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural. Brasil, 2013.

BAI, Yong; BAI, Qiang. **Subsea Engineering Handbook**. 2. ed. Burlington: Elsevier, 2010.

BEGA, Egídio A. et al. **Instrumentação Industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

BORTOLINI, Silvio Cezar. **Notas de Aula de Redes Industriais**. Departamento Acadêmico de Eletrônica. UTFPR. Curitiba, 2012.

COELHO, Eduardo J. J. **Sistemas de Controle para Equipamentos Submarinos de Produção**. Rev. 0. Rio de Janeiro: Petrobras, 2005.

DEVOLD, Havard. **Oil and Gas Production Handbook**. An introduction to oil and gas production. 2.3 ed. Oslo: ABB Oil and Gas, 2010.

GEORGINI, Marcelo. **Automação Aplicada**: Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLCs. 9. ed. São Paulo: Érica, 2011.

HELD, Gilbert. **Ethernet Networks**: Design, Implementation, Operation, Management. 4. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2003.

IMS RESEARCH. **Industrial Ethernet and Fieldbus Technologies World 2013**. IHS Electronics & Media. United States of America, 2013.

MODBUS ORGANIZATION. **MODBUS Application Protocol Specification**: V1.1b3. EUA, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13628-6:** Petroleum and Natural Gas Industries Design and Operation of Subsea Production Systems, Part 6: Subsea Production Control Systems. Genebra, 2006.

LIAN, Feng-Li; MOYNE James R.; TILBURY Dawn M. **Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet**, IEEE, v.21, p.66 - 83, 2002.

MORAES, Cícero C. de; CASTRUCCI, Plínio de L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD), **Manual de Frascati**, Metodologia proposta para a definição da investigação e desenvolvimento experimental. Coimbra: F. Iniciativas, 2007.

PETROBRAS. Plano de Negócios e Gestão 2013-2017, Brasil, 2013.

PIEDAD, Floyd. **High Availability: Design, Techniques, and Processes**. 2. ed. United States of America: Prentice Hall, 2001.

ROCKWELL Automation. **EtherNet/IP Technology Overview**, EUA, 2006.

ROCKWELL Automation. **Fundamentals of EtherNet/IP Networking**, EUA, 2010.

ROCKWELL Automation. **Future Trends in Industrial Networking**, EUA, 2011.

ROCKWELL Automation. **Introduction to ControlNet**, EUA, 2006.

ROCKWELL Automation. **Redes Industriais**, EUA, 2007.

SCHIFFER, Viktor. **The Common Industrial Protocol (CIP™) and the Family of CIP Networks**. 1. ed. EUA: ODVA, 2006.

SCHWAB, Marcos; AWANE, Marcelo; PIMENTEL, Juliano. **Case Study Of Applying the CANopen Communication Protocol on Sensing in Subsea Equipments for Oil and Gas Production**, Revista C & I. Controle & Instrumentação, v.1, p.59 - 65, São Paulo, 2012.

TANENBAUM, Andrew S.; WETHERALL, David **Redes de Computadores**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2006.

THOMAS, José E.et al. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.