



AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL SEM FIO

Perspectivas do uso de redes sem fio em automação industrial de processo.

CURITIBA

2011



Iracema Aparecida Suassuna de Oliveira.

CONTROLE E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL SEM FIO

Perspectivas do uso de redes sem fio em Automação Industrial de Processo.

Projeto de pesquisa desenvolvido para
apresentação de Trabalho de Conclusão do
Curso de MBA em Telecomunicações para
obtenção do grau de especialista.

Prof. Orientador: José Ricardo Benazzi, Esp.

Curitiba

2011

FOLHA DE APROVAÇÃO

AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL SEM FIO

Perspectivas do uso de redes sem fio em automação industrial de processo.

Por

Iracema Aparecida Suassuna de Oliveira.

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ESPECIALISTA EM TELECOMUNICAÇÕES, DO INSTITUTO IDD, PELA
COMISSÃO FORMADA PELOS PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

Curitiba (PR) 10 de dezembro de 2011.

José Ricardo Benazzi, Esp.

Marco Aurélio Bonato, Dr.

Gianfranco Muncinelli, M.Sc.

AGRADECIMENTO

José Carlos Silva de Siqueira.

RESUMO

As redes sem fio específicas para a área de Automação & Controle caracterizam-se por terem baixas taxas de transmissão e robustez para ambientes hostis. Estas redes proporcionam significativas vantagens econômicas e operacionais. Entretanto, como todo sistema sem fio, sua confiabilidade é uma preocupação constante, principalmente se aplicada em uma planta industrial de processo cujos riscos operacionais são mais críticos, com possíveis e sérias consequências ambientais, humanas e patrimoniais. Neste trabalho foi realizado um estudo sobre determinados aspectos considerados relevantes do uso de redes *wireless* para automação e controle em plantas industriais de processo, especificamente a rede de protocolo aberto 802.15.4, cujas camadas física (nível 1) e de enlace (nível 2) são padronizadas pelo *Institute of Electrical and Eletronics Engineers* (IEEE). De início, são apresentados os conceitos tecnológicos pertinentes ao padrão em questão e demais assuntos necessários para se atingir os objetivos do trabalho: legislação brasileira para equipamentos de radiação restrita; básico da Teoria de Controle (Malhas abertas e fechadas) e aspectos de classificação de área e técnicas construtivas apropriadas de invólucros de equipamentos bem como de instalação de infra-estrutura de cabos. Em resultados, é apresentado o levantamento dos fabricantes de sistemas *wireless* 802.15.4 em nível mundial e suas atuais expectativas comerciais, no Brasil. Foram simuladas duas redes para automação, sendo uma cabeada e outra *wireless*, buscando-se estimar a economia de custos de uma em relação à outra. Depois, com base em entrevistas com profissionais de uma planta da indústria de processo atuante no Brasil, pode-se avaliar qual é o nível de aceitação da tecnologia IEEE 802.15.4 na planta em questão. Por fim, considerações sobre as baterias de dispositivos de campo da tecnologia IEEE 802.15.4 foram tecidas, visando um maior esclarecimento destes aspectos para os projetos e aplicação da tecnologia em questão.

ABSTRACT

Wireless networks in the Automation & Control area are characterized by lower data rates and robustness to hostile environments. Those networks provide significant economical and operational benefits. However, as any wireless system, its reliability is an issue especially if they are applied in an industrial process plant, whose operational features have potential critical risks, and can result on serious environmental, human and patrimonial consequences. This work presents a study of some relevant aspects of wireless networks for automation and control in industrial process plants, specifically the network of open protocol 802.15.4 whose physical layer (level 1) and link layer (level 2) were standardized by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). At first, are presented relevant technological concepts to this pattern and some needed characteristics to achieve the objectives of this work: the Brazilian legislation for restricted radiation equipment; basics of Control Theory (open and closed loop) and aspects of area classification and construction techniques appropriate to equipment enclosures and to the installation of cable infrastructure. In results, is presented the survey of 802.15.4 wireless system manufacturers worldwide and their business expectations in Brazil. Two networks for automation were simulated, a wired and a wireless networks, in order to estimate the cost savings of each one. Then, based on interviews with professionals working in a process industry operating in Brazil, it was evaluated the acceptance of application of the IEEE 802.15.4 technology in that particular industry. Finally, considerations about batteries of IEEE 802.15.4 field devices were presented to emphasize those aspects for the design and application of technology in question.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 Questionário de prospecção do nível de aceitação das tecnologias <i>wireless</i> na planta industrial de processos	76
APÊNDICE 2 Conceitos das aplicações na planta industrial de processos.	77
APÊNDICE 3 Opções de alimentação dos dispositivos <i>wireless</i> LR-WPAN pesquisados.	79
APÊNDICE 4 Custos de implementação de tecnologia <i>wireless</i> IEEE 802.15.4 em determinadas indústrias de processo.	80
APÊNDICE 5 Lista de OCD consultadas.	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Soluções wireless na planta industrial.	2
Figura 2.1-1 Exemplo de selo de equipamento homologado pela ANATEL.	8
Figura 2.2-1 Largura de Banda do canal versus Potência do canal.	9
Figura 2.2-2 Métodos de transmissão utilizados em equipamentos de radiação restrita (SHARP, 2010, il).	10
Figura 2.3-1 Evolução das redes do padrão IEEE 802.15.4 (GARG, 2007, p.675, il).	11
Figura 2.3-2 Camadas de protocolos da rede padrão IEEE 802.15.4.	12
Figura 2.3-3 Exemplo rede IEEE 802.15.4 wirelessHart (HART, 2011, il).	12
Figura 2.3.1-1 Exemplo de Rede em Estrela.	15
Figura 2.3.1-2 Exemplo de Rede <i>Mesh</i>	16
Figura 2.3.2-1 Os 16 canais de frequências do padrão IEEE 802.15.4 (LOULA & CESAR, 2011, il).	18
Figura 2.3.2-2 Topologia da rede IEEE 802.15.4 com <i>backbone</i> 802.3 ou 802.11.	18
Figura 2.4.2-1 Controle em Malha Fechada (SIMON & KOO PAN, 2008, il).	23
Figura 2.4.2-2 Controle em Malha Aberta (SIMON & KOO PAN, 2008, il).	24
Figura 2.4.3-1 Níveis da rede industrial: <i>Fieldbus</i> , <i>Devicebus</i> e Supervisão e Controle.	26
Figura 2.5-1 Exemplo de Mapa da Classificação de Área Fonte da figura: (COBEI, 200-?).	28
Figura 2.5.1-1 Exemplos de Zonas de classificação em um tanque de inflamáveis.	30
Figura 2.5.1-2 Característica volumétrica das Zonas de risco ao redor de bombas (COBEI, 200-?, il).	30
Figura 2.5.4-1 Símbolos de sinalização “Ex”	35
Figura 2.5.4-2 Exemplo de marcação de equipamento (BENTLEY, 2009-2010, p.9, il).	36
Figura 2.5.5-1 Tipos de entradas em cabos em invólucros conforme a norma IEC.	39
Figura 3.2-1 Topologias físicas <i>Fieldbus</i> para a rede cabeada (SILVA <i>et al.</i> , 2006, il).	44
Figura 4.2-1 Materiais utilizados na configuração de um instrumento em rede cabeada.	54
Figura 4.2-2 Materiais utilizados na configuração de um instrumento em rede cabeada.	54
Figura 4.4.3-1 Vida útil da bateria de um módulo transmissor em função da intervalo de coleta de dados e 3 temperaturas ambientais de operação (BENTLEY, 2009-2010, p. 14, il).	66
Figura 4.4.3-2 Vida útil da bateria de um módulo transmissor em função de 5 intervalos de coleta de dados e temperatura ambiental de operação (BENTLEY, 2009-2010, p. 14, il).	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1-1 Soluções IEEE 802.15.4 e padrões de fabricantes.....	51
Gráfico 4.1-2 Soluções IEEE 802.15.4 de fabricantes com equipamentos homologados.	52
Gráfico 4.2-1 Custos da rede cabeada 50% TP e 50% TT.....	56
Gráfico 4.2-2 Custos de instalação de rede <i>wireless</i> com 100%TWP, 100%TWT e 50%TWP+50%TWT.....	56
Gráfico 4.2-3 Comparação dos custos de instalação de rede <i>wireless</i> e rede cabeada.....	57
Gráfico 4.3-1 Experiência em automação dos entrevistados.	59
Gráfico 4.3-2 Aceitação do uso de redes IEEE 802.15.4 na industria de processos.....	59
Gráfico 4.3-3 Nível de aceitação do uso de redes IEEE 802.15.4 na indústria de processos.	60
Gráfico 4.3-4 Uso de redes IEEE 802.15.4 para detecção de gases tóxicos e inflamáveis.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 Tecnologias wireless na planta industrial.	2
Tabela 2.1-1 Bandas para Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita no Brasil.	6
Tabela 2.3.2-1 Frequências e modulação aplicadas na camada física do IEEE 802.15.4 no mundo.....	17
Tabela 2.5.2-1 Classificação de Grupos conforme a Norma NBR IEC e seu equivalente IEC.	31
Tabela 2.5.3-1 Proteção proporcionada na marcação EPL dos equipamentos.	33
Tabela 2.5.3-2 Tipos de Proteção segundo a Norma IEC (IEC 60079-14, 2009).	34
Tabela 2.5.3-3 Temperaturas máximas da superfície dos equipamentos (COBEI, 200-?, il).....	34
Tabela 3.3-1 Classificação conforme comitê ISA-100.11a.	46
Tabela 4.1-1 Solução <i>wireless</i> dos principais fabricantes baseadas no padrão 802.15.4-2006.	50
Tabela 4.1-2 Fabricantes com equipamentos homologados na ANATEL.	51
Tabela 4.2-1 Valores para cálculo da rede cabeada.	55
Tabela 4.2-2 Valores para cálculo da rede <i>wireless</i> 802.15.4.....	55
Tabela 4.2-3 Relação de custos das redes simuladas cabeada versus <i>wireless</i> IEEE 802.15.4.	57
Tabela 4.2-4 Relação de custos de serviços de rede cabeada e wireless conforme estudo apresentado em fonte 1 no APÊNDICE 4.....	58
Tabela 4.4.2-1 Características das baterias utilizadas nos transmissores 802.15.4	65

ÍNDICE DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AAL	<i>ATM (Asynchronous Transfer Mode) Adaptation Layer</i> / Camada de adaptação ATM (Modo de transferência assíncrona).
ABNT NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas Norma Técnica Brasileira
AC ac	<i>Alternate Current</i> / Corrente alternada
ANATEL	Agência Nacional das Telecomunicações
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> / Instituto de padrões nacional americano
AP	<i>Access Point</i> / Ponto de acesso (equipamento)
ATEX	<i>ATmosphère Explosible (Fr.)</i> / Atmosfera explosiva
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> / Chaveamento por fase binária
CAP	Controlador Automático de Processo
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i> / Avaliação do canal livre
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> / Acesso múltiplo por divisão de código
CDV	<i>Committee Draft for Vote</i> / Comitê para votação de versão preliminar
CLP	Controlador Lógico Programável
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> / Acesso múltiplo com verificação de portadora com prevenção de colisão.
DC dc	<i>Direct Current</i> / Corrente direta
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> / Espalhamento de espectro por sequência direta
ED	<i>Energy Detection</i> / Detecção de energia
EPL	<i>Equipment Protection Level</i> / Nível de proteção de equipamento
Ex	A prova de explosão
FF	<i>Fieldbus Foundation</i> / Fundação <i>Fieldbus</i> (protocolo de rede industrial)
FFD	<i>Full-Function Device</i> / Dispositivo de função plena
FHSS	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i> / Espalhamento de espectro com salto de frequência.
GSM/GPRS	<i>Global System for Mobile communications/General Packet Radio Service</i> / Sistema global para comunicações móveis/Serviço geral de pacotes via rádio
GTS	<i>Guarantee Time Slots</i> / Intervalos de tempo garantidos
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i> / Transdutor remoto endereçável de alta velocidade
HFC	<i>Hart Communication Foundation</i> / Fundação de comunicação Hart
I/O	<i>Input/Output</i> / Entrada/saída
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> / Comissão eletrotécnica internacional
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers, Inc.</i> / Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos.
IHM	Interface Humano-Máquina
IS	Intrinsecamente Seguro (equipamento)
ISA	<i>International Society of Automation</i> / Sociedade internacional de automação
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical radio frequency bands</i> / Bandas de radiofrequência industrial, científica e médica
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> / Organização internacional para a padronização
LLC	<i>Logical Link Control</i> / Controle de enlace lógico
LLN	<i>Low-Power and Lossy Network</i> / Rede com baixa perda e baixa potência
LQI	<i>Link Quality Indicator</i> – Indicador de qualidade do enlace
LR-WPAN	<i>Low Rate - wireless Personal Área Network</i> / Rede pessoal sem fio – taxa (de transmissão) baixa
MAC	<i>Media Access Control</i> / Controle de acesso ao meio
MPDU	<i>Mac Protocol Data Units</i> / Unidades de dados do protocolo Mac
MR-WPAN	<i>Medium Rate – wireless Personnal Área Network</i> / Rede pessoal sem fio – taxa (de transmissão) média
NEC	<i>National Electric Code</i> / Código elétrico nacional
NR-10	Norma Regulamentadora no 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade.
OCD	Órgão Certificador Designado

OD	<i>Office Domain</i> / Domínio do escritório
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> / Multiplexação por divisão de frequência ortogonal
O-QPSK	<i>Orthogonal Quadrature Phase-Shift Keying</i> / Chaveamento de fase em quadratura ortogonal
OSI	<i>Open Systems Interconnection model (OSI model)</i> / Modelo de interconexão de sistemas abertos (modelo OSI).
PAC	<i>Programmable Automation Controller</i> / Controlador de automação programável
PAS	<i>Publicly Available Specification</i> / Especificação disponível publicamente
PBT	<i>PolyButylene Terephthalate</i> / Polibutileno Teraftalato
PCD	<i>Process Control Domain</i> / Domínio do controle de processo
PHY	<i>Physical</i> / Camada física do modelo de protocolo OSI
PID	Proporcional – Integral – Derivativo
PPDU	<i>Physical Layer Protocol Data Units</i> / Unidades de dados do protocolo de camada física
PZT	Piezoelétrico
RF	Radio Frequência
RFC	<i>Request For Comment</i> / Solicitação de comentário
RFD	<i>Reduced-Function Device</i> / Dispositivo de função reduzida
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RTS/CTS	<i>Request To Send/Clear To Send</i> / Solicitação de envio/libre para enviar
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> / Controle supervisão e aquisição de dados.
SGCH	Sistema de Gestão de Certificação e Homologação - ANATEL
SOE	<i>Sequence Of Events</i> / Sequência de eventos
SSCS	<i>Service Specific Convergence Sublayer</i> / Subcamada de convergência específica de serviço
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> / Banda ultra larga
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> / Protocolo de controle de transmissão/Protocolo Internet
WIA-PA	<i>Wireless networks for Industrial Automation Process – Process Automation</i> / Redes sem fio para processo de automação industrial – automação industrial
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> / Fidelidade sem fio
WiHart	<i>Wireless Hart</i> / Hart sem fio
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> / Rede local sem fio
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> / Rede de sensores sem fio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	LEGISLAÇÃO ANATEL.....	6
2.2	MÉTODOS DE TRANSMISSÃO DOS EQUIPAMENTOS DE RADIAÇÃO RESTRITA.....	9
2.3	O PADRÃO IEEE 802.15.4.....	11
2.3.1	Tipos e Classes de Dispositivos 802.15.4.....	13
2.3.2	Camada Física (PHY).....	17
2.3.3	Camada de Enlace (MAC).....	19
2.4	TEORIA DE CONTROLE.....	20
2.4.1	Equipamentos de Controle Industrial.....	21
2.4.2	Malhas de Controle.....	23
2.4.3	Redes Industriais.....	25
2.5	CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA.....	26
2.5.1	Zonas.....	29
2.5.2	Grupos.....	31
2.5.3	Tipos de Proteção de Equipamentos.....	31
2.5.4	Marcação de Equipamentos.....	35
2.5.5	Instalações em Áreas Explosivas.....	37
3	ESTUDO DE CASO.....	41
3.1	PROSPECÇÃO DOS FABRICANTES DE SOLUÇÕES WIRELESS IEEE 802.15.4 E SUAS EXPECTATIVAS NO BRASIL.....	42
3.2	ESTIMATIVA DE CUSTOS DA REDE WIRELESS EM ÁREAS CLASSIFICADAS.....	42
3.3	PROSPECÇÃO DA ACEITAÇÃO DA TECNOLOGIA IEEE 802.15.4 EM AUTOMAÇÃO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL DE PROCESSO DO BRASIL.....	45
3.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE BATERIAS DOS DISPOSITIVOS DE CAMPO.....	47
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	49
4.1	FABRICANTES DE SOLUÇÕES WIRELESS IEEE 802.15.4 E SUAS EXPECTATIVAS NO BRASIL.....	49
4.2	ESTIMATIVA DE CUSTOS DA REDE WIRELESS EM ÁREAS CLASSIFICADAS.....	53
4.3	ACEITAÇÃO DA TECNOLOGIA IEEE 802.15.4 EM AUTOMAÇÃO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL DE PROCESSO NO BRASIL.....	58
4.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE BATERIAS DOS DISPOSITIVOS DE CAMPO.....	63
4.4.1	Alimentação Elétrica dos Dispositivos IEEE 802.15.4.....	63
4.4.2	Baterias dos Dispositivos de Campo IEEE 802.15.4.....	64
4.4.3	Vida Útil das Baterias vs. Temperatura vs. Intervalo de Coleta.....	66
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Controle e Automação¹ é a área dentro da engenharia voltada ao controle de processos utilizando-se para isso elementos instrumentos sensores, atuadores, indicadores, controladores, sistemas supervisórios e de aquisição de dados e outros métodos que utilizem os recursos da eletrônica, da mecânica e da informática. Controle e Automação podem ser aplicados a várias áreas tais como indústria, fabril, médica, comercial, veicular, rodoviário, residencial, etc.

A tecnologia *wireless* vem para simplificar e baratear algumas aplicações solucionadas convencionalmente através de rede cabeada, como também para cobrir pontos de difícil acesso. Ao dispensar a instalação de cabos físicos, os instrumentos *wireless* com maior eficiência possibilitam atingir pontos com obstáculos físicos, locais com interferência elétrica, grandes distâncias, áreas classificadas e ambientes *hostis*, tão comuns neste tipo de planta.

As redes *wireless* industriais são genericamente denominadas de WPAN (*wireless Personal Area Network*) e compõem um nível que trabalha em conjunto com as demais redes de protocolos padronizados tais como WiFi IEEE 802.11, GSM/GPRS, IEEE 802.3 (IP cabeada), assim como podem ser integradas às redes industriais predecessoras tais como *ModBus*, *Fieldbus*, etc. A tendência é que as redes *wireless* na indústria operem no formato de múltiplas células sem fio (*clusters*) associadas a um *backbone* cabeado baseado no padrão Ethernet (802.3). São várias possibilidades de utilização da tecnologia *wireless* na planta industrial, podendo ser classificadas de acordo ao que se destinam, conforme mostra a Figura 1-1.

A Tabela 1-1 apresenta diferentes necessidades de aplicações *wireless* em planta industrial. Uma rede de automação e controle industrial é formada por dispositivos sensores² dispersos na planta que medem grandezas físicas (temperatura, umidade, pressão, nível, etc.) e dispositivos atuadores (chaves, válvulas, etc), os quais não necessitam de uma largura de banda elevada (baixa taxa de transmissão), daí o nome LR-WPAN (*Low Rate – wireless Personal Area Network*). Já o termo *Personnal* é por

1 Controle significa controle automático (isto é, que se move ou age por si, sem operador) de sistemas físicos quaisquer. Automação significa o emprego do computador para automatizar, com ou sem controle dinâmico.

2 Estes dispositivos podem também ser encontrados na literatura com os nomes de instrumentos, captosres, medidores (detector + transdutor), indicadores ou transmissores. Este último é o termo comercial mas que na verdade refere-se ao sensor, transdutor e transmissor no mesmo produto.

conta do alcance pequeno da rede. Na literatura outras designações podem ser encontradas também tais como WSN (*wireless Sensor Network*), RSSF (Rede de Sensores Sem Fio) ou LLN (*Low-Power and Lossy Networks*). Elas são representadas na Tabela 1-1 pelas tecnologias Zigbee, ISA-100.11a, WIA-PA e WiHart e baseiam-se no protocolo aberto IEEE 802.15.4.



Figura 1-1 Soluções wireless na planta industrial.

	<i>Bluetooth</i>	<i>Zigbee</i> (98)	ISA-100.11a, WIA-PA e WiHart	WiFi
IEEE	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11b
Grupo de rede	MR-WPAN (Medium Rate)	LR-WPAN (Low Rate)	LR-WPAN	WLAN
Camada física	FHSS	DSSS	DSSS	DSSS/OFDM
Camada de Acesso ao Meio (MAC)	CDMA	CSMA/CA	CSMA/CA + GTS	CSMA
Alcance	~10m (pequeno)	70 - 300m	70 – 300 m	~100m
Aplicação industrial	Analógico/ Digital I/O; Dados Seriais	Dados seriais e Ethernet	Analógico/ Digital I/O	Rede Ethernet SCADA e Empresa
Frequência	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz e 5GHz
Potência transmitida	[1-100] mWatts	[1-100] mW	[1-100] mW	[1-100] mW
Consumo de bateria dos dispositivo	Dias (4 a 8 horas COM streaming de áudio)	Anos	Anos	Horas
Taxa de dados	1Mbps	250kbps	250kbps (também 20kbps e 40kbps)	11Mbps (b) a 54Mbps (a, g)
Número de módulos (escalabilidade)	7	6400	255	32

Tabela 1-1 Tecnologias wireless na planta industrial.

A rede de sensores sem fio surgiu para suprir a falta de uma solução voltada especificamente para as áreas industrial e residencial. As dificuldades encontradas nas tecnologias *wireless* convencionais, no âmbito industrial, fizeram com que novos padrões *wireless* surgissem, de maneira a viabilizar a comunicação *wireless* seja na aquisição de dados ou no controle e monitoração dos processos.

Para a comunicação industrial de sensores surgiram soluções proprietárias e padronizadas (protocolos abertos). Neste trabalho, serão consideradas apenas as padronizadas, as quais tem maior credibilidade [HENNING, 2009] e favorecem a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes, fomentando consequentemente a concorrência. As soluções abertas buscam uniformizar a tecnologia de conexões (antenas), das medidas de segurança e das fontes de alimentação (baterias).

As principais características funcionais das redes *wireless* de automação industrial são:

- baixa taxa de transmissão de dados, podendo fornecer três taxas de transmissão: 250kbps, 40kbps e 20kbps³;
- fornece 16 canais na banda 2,4GHz, 10 canais na banda 915MHz e um só canal na banda 868MHz (IEEE 802.15.4);
- utiliza o protocolo CSMA/CA para o acesso ao canal compartilhado;
- garante alocação de tempo (*timeslot*) nas comunicações (GTS - *Guaranteed Time Slots*);
- baixa capacidade de armazenamento, por exemplo 4 e 128kBytes (SILVA, 2006);
- limitada capacidade de processamento (maioria usa processadores de 4MHz (SILVA, 2006);
- baixo consumo de energia elétrica dos instrumentos visando aumentar ao máximo a vida útil das baterias;
- baixa latência que é o período que o dispositivo leva para “ativar” após sair do estado de repouso (*standby*);
- é robusta para poder operar sob condições ambientais *hostis* e sujeitas a interferências eletromagnéticas;
- é gerenciável e possui auto-monitoramento e diagnóstico fornecendo informações como nível de potência do sinal transmitido, estado da bateria (ED

- *Energy Detection*) dos dispositivos, identificação de erros ou ataques provenientes de usuários não autorizados, carga da rede *wireless*, latência, etc;
- deve coexistir, sem interferir, com outras tecnologias *wireless* tais como *Bluetooth*, *Wifi*, assim como os sistemas de radiocomunicação de emergência (convencional ou troncalizado);
- tem escalabilidade (dos nós, range de RF, *throughput*) e ser de fácil instalação e manutenção, gerenciamento, alimentação energia e
- pode ter endereços MAC curtos (16 bits) ou estendidos (64 bits);

Atualmente há três vertentes de padronização tecnológica para as redes *wireless* de automação e controle:

- **WirelessHART:** criado pela organização internacional *HART Communication Foundation* (HCF) para padronizar as características *wireless* ao existente protocolo de comunicação industrial HART. O *WiHart* foi projetado especificamente para garantir a interoperabilidade entre produtos HART com *wirelessHART*, ou seja, ele somente padroniza a transmissão *wireless* de mensagens HART. O *Wi-Hart* foi aprovado e publicado em 2010 como padrão IEC62591 pela IEC⁴.
- **ISA100.11a wireless Systems for Industrial Automation:** padrão elaborado pelo ISA100.11a *Committee* da *International Society of Automation* (ISA).
- **WIA-PA (wireless networks for Industrial Automation Process – Process Automation):** padrão elaborado pela *League of China industrial wireless* projetado para aplicações de automação de processo. Em Outubro de 2008, a especificação WIA-PA foi aprovada como uma especificação pública IEC/PAS 62601 e em Setembro de 2010, compondo o IEC 65C/596/CDV*IEC 62601 - Ed. 1.0 - *Industrial communication networks - Fieldbus specifications - WIA-PA communication network and communication profile* (WEI et al., 2011).

Estes três padrões, embora muito parecidos, pois utilizam os mesmos protocolos de camada física (802.15.4) e de enlace (CSMA-CA), não constituem um padrão único. O ISA100.11a é desenvolvido por um grupo aberto a sugestões dos usuários usando procedimentos endossados pela ANSI - *American National Standards Institute*. Desta forma, o ISA100.11a tem uma abrangência maior pois suporta múltiplos protocolos

4

A IEC - International Electrotechnical Commission é uma organização para a elaboração e publicação de padrões internacionais para todas as tecnologias relativas a elétrica e eletrônica. A IEC promove a cooperação de companhias, indústrias e governos para discutir e desenvolver os padrões internacionais que precisam. Todos os padrões internacionais da IEC são totalmente baseados no consenso e representam as necessidades dos interessados-chave de cada nação participante. A IEC colabora com a International Organization for Standardization (ISO) em concordância com condições fixadas por acordo entre as duas organizações.

com uma única infraestrutura *wireless* (HART, *Profibus*, *Modbus*, FF, etc.), permitindo tunelamento de protocolos e assegurando assim a interoperabilidade entre fabricantes [HENNING, 2009]. O ISA100.11a suporta também níveis de desempenho que permitem algumas aplicações de automação de fábrica e não só de processos⁵.

Os transceptores baseados no padrão 802.15.4, no Brasil, utilizam a frequência de 2,4GHz não licenciada, denominada também de frequência global ou ISM (*Industrial, Scientific and Medical radio bands*) e técnica de espalhamento espectral DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Estes equipamentos são classificados pela ANATEL como Transceptores de Radiação Restrita.

1.1 OBJETIVO

Os fabricantes tem investido bastante na divulgação de suas soluções para as redes *wireless* industriais. Porém, a adesão a estas redes mostra-se pouco significativa em nível mundial. Este trabalho tem por objetivo geral avaliar quais são as perspectivas atuais para o emprego de redes sem fio no campo da Automação Industrial. Isto será feito através dos seguintes objetivos específicos:

- prospectar os fabricantes de solução *wireless* baseada no padrão aberto IEEE 802.15.4 para automação na indústria de processos e suas expectativas quanto à tecnologia em questão;
- estimar custos de uma rede *wireless* para automação de processo;
- prospectar o grau de aceitação do corpo técnico para a tecnologia IEEE 802.15.4 em uma unidade industrial de processo atuante no Brasil e
- avaliar alguns aspectos considerados importantes sobre as baterias autônomas de alimentação dos dispositivos de campo.

Crê-se que os resultados obtidos neste trabalho podem trazer mais esclarecimento para as condições de aplicação em curto e médio prazo das redes IEEE 802.15.4 na Automação Industrial, podendo contribuir nas ações futuras tanto para os fabricantes quanto para os usuários das soluções *wireless* LR-WPAN.

⁵ Processos industriais são procedimentos envolvendo passos químicos ou mecânicos que fazem parte da produção de um ou vários itens, usualmente em grande escala (indústria pesada). No processo industrial, o produto é tipicamente um fluido (óleo, gás, químicos, etc). Na Automação de fábrica os produtos são elementos individuais discretos (carros, bonecas, etc).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LEGISLAÇÃO ANATEL

A Resolução 506 de 01/07/08 – Regulamento sobre Equipamentos de Radiação Restrita da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) dispõe que, exceto para equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita, faixas exclusivamente militares e estações exclusivamente receptoras, os demais equipamentos transceptores no Brasil dependem de Autorização da ANATEL.

São três faixas de radiofrequências que são livres de autorização do órgão regulador em âmbito mundial (bandas ISM) as quais estão listadas na Tabela 2.1-1. No Brasil, os transceptores para Automação/Instrumentação Industrial operam na faixa global de 2,4GHz e utilizam Tecnologia de Espalhamento Espectral.

Frequência Central	Faixa [MHz]	Sistemas (exemplos)
915MHz	902-907,5	Telefone sem Cordão; Identificação por RF; Telemedição de Características de Material
	915-928	Equip. com Tecnologia de Espalhamento Espectral; Identificação por RF.
2,45GHz	2.400-2.483,5	Equip. com Tecnologia de Espalhamento Espectral (automação <i>wireless</i> , <i>Bluetooth</i> , <i>Zigbee</i> ; Wi-Fi)
5,8GHz	5.725- 5.850	Equip. com Tecnologia de Espalhamento Espectral; Acesso sem Fio em Banda Larga para Redes Locais (Wi-Fi, Hiperlan)

Tabela 2.1-1 Bandas para Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita no Brasil.

Nesta resolução, os transmissores *wireless* para instrumentação industrial são classificados como Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita, sendo definidos como “aqueles cuja emissão de radiação na frequência utilizada produz um campo eletromagnético com intensidade dentro de limites estabelecidos”.

A explicação técnica para que as frequências tenham normalmente que ser licenciadas, é que elas transmitem um sinal com uma específica largura de canal (em geral muito estreita) ou frequências fixas. O transmissor de um rádio de frequência fixa tipicamente tem nível de potência mais alto, o que pode causar interferência sobre outro transmissor de frequência fixa em faixa próxima. A exigência de licenciamento

evita que um sistema interfira sobre outro que esteja próximo e opere na mesma frequência.

Porém, o fato dos equipamentos de radiação restrita não precisarem de autorização da ANATEL em termos de frequência, não invalida a obrigatoriedade de terem que ser homologados pela ANATEL a fim de garantir que não ultrapassem certos limites de espectro e potência. E para ser homologado, o equipamento tem de passar por uma certificação.

A Homologação⁶ não é só o reconhecimento oficial pela autoridade competente da aprovação do equipamento. É também uma garantia para o usuário do equipamento. A empresa que solicita a homologação obrigatoriamente tem que ter escritório no Brasil visto que ela é a responsável pelo suporte ao equipamento perante o usuário. Isto é importante principalmente no caso de equipamentos importados, pois, sem a devida homologação, o usuário corre o risco de descobrir que o produto possui alguma incompatibilidade técnica, ou que suas funcionalidades não estejam de acordo.

A Certificação⁷, emitida por um OCD⁸, garante ao consumidor que os produtos de telecomunicações adquiridos atendem aos requisitos básicos de segurança e saúde (prevenção de choques elétricos), de controle emissões de radiofrequência e de não agressão ao meio ambiente (mitigação dos níveis de ruídos), além de qualidade e adequação aos serviços a que se destinam.

O consumidor, portanto, deve, antes de comprar um produto, verificar sua compatibilidade com as tecnologias usadas no Brasil, o que pode ser feito por meio do Sistema de Gestão de Certificação e Homologação (SGCH) no web site da ANATEL. A consulta permite saber se um determinado produto está ou não homologado, garantindo ao usuário que ele não terá problemas ao usá-lo no Brasil.

6 Homologação: ato privativo da Anatel pelo qual, na forma e nas hipóteses previstas neste Regulamento, a Agência reconhece os certificados de conformidade ou aceita as declarações de conformidade para produtos de telecomunicação. [Website ANATEL].

7 Certificação: conjunto de procedimentos regulamentados e padronizados que resultam na expedição de Certificado ou Declaração de Conformidade específicos para produtos de telecomunicação. O Certificado é documento atestatório da conformidade de um produto em relação à regulamentação expedida pela ANATEL ou por ela adotada. [Website ANATEL].

8 OCD (Órgão Certificador Designado) é a instituição técnica legalmente constituída que, por delegação da ANATEL, conduz processos de avaliação da conformidade de produtos para telecomunicações e expede os certificados de conformidade correspondentes.



Figura 2.1-1 Exemplo de selo de equipamento homologado pela ANATEL.

É obrigatório que todo produto homologado apresente um selo contendo a logomarca ANATEL, o código de Homologação e o código de barras. O selo pode ser em cores ou monocromático. Caso o espaço para colocação do selo seja insuficiente (equipamento muito pequeno) é permitido que o fabricante coloque o selo completo no manual do usuário e, no produto, apenas o número de homologação (syntaxe: ANATEL HHHH-AA-FFFF). A Figura 2.1-1 ilustra o selo de um equipamento de radiação restrita da empresa Rosemount. O selo deve conter texto indicando que o Equipamento de Radiação Restrita opera em caráter secundário o que, de acordo com a Resolução 506, indica que ele não tem direito a proteção contra interferências prejudiciais provenientes de qualquer outra estação de radiocomunicação e que não pode causar interferência em qualquer sistema operando em caráter primário.

Os equipamentos *wireless* para automação/instrumentação industrial no Brasil estão regulamentados pela Seção IX, a qual abrange os artigos 39 a 44 na Resolução 506. Os equipamentos *wireless* de banda larga (rede IEEE 802.11a/b/g) também são regidos pela Resolução 506, porém encontram-se regulamentados pela seção X.

2.2 MÉTODOS DE TRANSMISSÃO DOS EQUIPAMENTOS DE RADIAÇÃO RESTRITA

Um transmissor normalmente opera em uma faixa de frequência a qual pode ser usada em toda a sua extensão ou em seções menores, tipicamente chamadas de canais. Os transmissores que operam nas faixas livres não podem utilizar a banda inteira, devendo usar canais cuja largura de banda do canal refere-se à quantidade de dados que pode ser transmitida pelo sinal em “bit por segundo”. Taxas de transmissão altas exigem maior largura de banda e resultam em transceptores mais suscetíveis a interferência porque há menos energia por *databit*. Os transmissores de automação industrial, por operarem em taxas baixas (até 250kbps), sofrem menos interferência que um AP (*Access Point*) de Banda Larga. Eles também tem alcance superior ao dispositivo de Banda Larga pois sua baixa taxa de transmissão tem nível de energia por bit maior, resultando em maior distância de alcance de transmissão. A Figura 2.2-1 ilustra a relação largura de banda versus potência do canal.

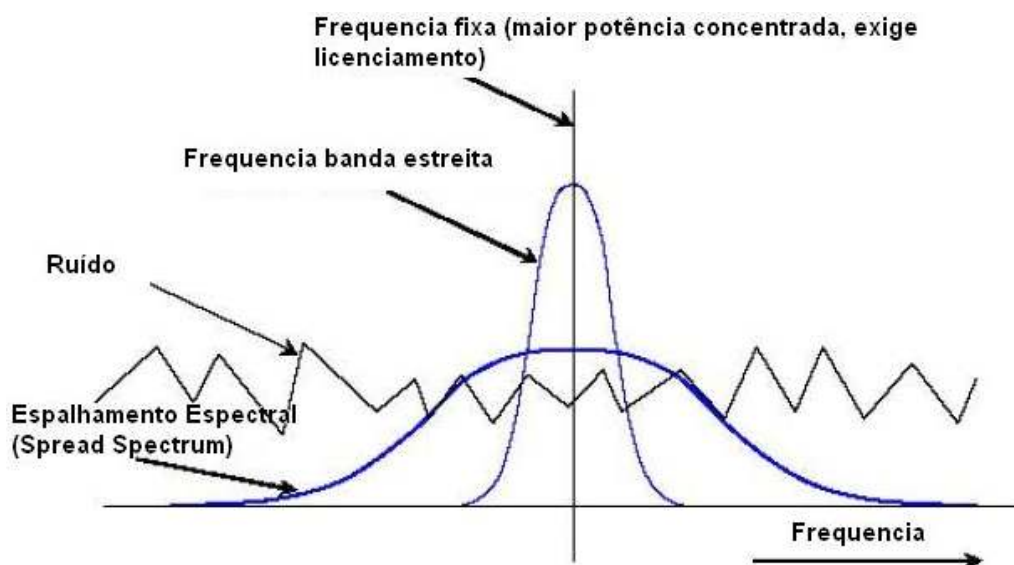


Figura 2.2-1 Largura de Banda do canal versus Potência do canal.

Os seguintes métodos de transmissão – ilustrados também na Figura 2.2-2 - são usados em equipamentos de radiação restrita:

Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS): transmite sinais de RF pelo chaveamento rápido de uma portadora entre vários canais de frequências (saltos de frequência) em uma sequência pseudorandômica conhecida tanto pelo transmissor quanto pelo receptor. Na técnica FHSS, a probabilidade de haver interferência entre

dois sistemas é extremamente reduzida, visto que, caso ocorra o fato dos dois sistemas estarem na mesma frequência em um determinado instante, a sequência pseudorandômica de cada um faz com que, no instante imediatamente seguinte, os dois sistemas estejam operando em frequências diferentes. No caso do *Bluetooth* (79 canais), que usa o FHSS, o conflito de canal é de 1:79, isto é, 1,26% de conflito.

Direct-Sequence Spread Spectrum (DSSS): emite sinais de transmissão que são espalhados sobre uma largura de banda de canal na frequência do dispositivo de transmissão. Os dados de informação são combinados com um código de espalhamento (*spreading code*) antes de serem enviados via aérea, criando uma transmissão com grande largura de banda. A interferência é primariamente rejeitada no processo de demodulação no receptor. Quando o código de espalhamento é removido para extrair a informação, o sinal de ruído é simultaneamente eliminado. Esta é a técnica aplicada nos equipamentos baseados no padrão 802.15.4, conforme o Artigo 41 da Resolução 506 da ANATEL.

Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM): emite em múltiplas frequências de subportadoras simultaneamente. Cada subportadora é essencialmente uma transmissão em banda estreita, permitindo assim altas taxas de dados. A técnica OFDM é flexível para lidar com severas condições do canal. A interferência de banda estreita é tolerada devido ao alto número de subportadoras intercaladas e mecanismos de codificação de canal similar ao DSSS.

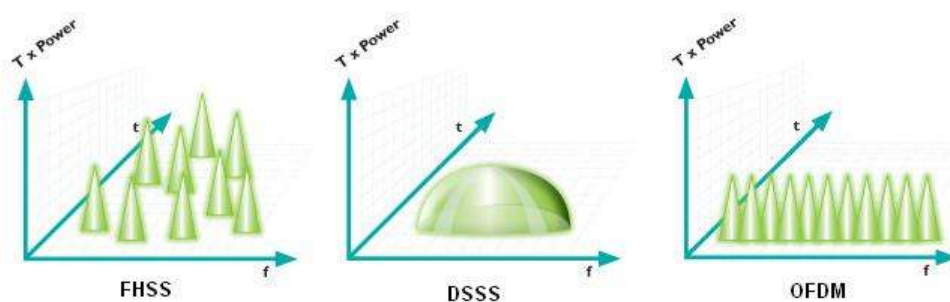


Figura 2.2-2 Métodos de transmissão utilizados em equipamentos de radiação restrita (SHARP, 2010, il).

2.3 O PADRÃO IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 é uma norma de comunicação de baixa taxa de transmissão concebida especialmente para as redes de sensores sem fio. Esta norma define somente a camada física e a camada de enlace (ou de acesso ao meio), tendo introduzido muitas modificações e acrescentado funcionalidades aos outros padrões sem fio, notadamente o padrão IEEE 802.2, conforme ilustrado na Figura 2.3-1. Ela foi projetada para ser simples e flexível, visando fácil instalação, confiabilidade máxima na transferência dos dados, operabilidade em curto prazo e máxima economia possível de bateria.

As camadas superiores à camada física e à camada de enlace, não foram definidas no padrão IEEE 802.15.4. Cada fabricante pode implementar as demais camadas conforme desenvolvimento próprio. Daí a existência de dispositivos que, apesar de serem 802.15.4, não tem interoperabilidade com o dispositivo de outro fabricante. A ISA100a nasceu da intenção de obter-se esta interoperabilidade entre fabricantes diferentes. A Figura 2.3-2 compara as camadas do IEEE 802.15.4 e as do modelo OSI.

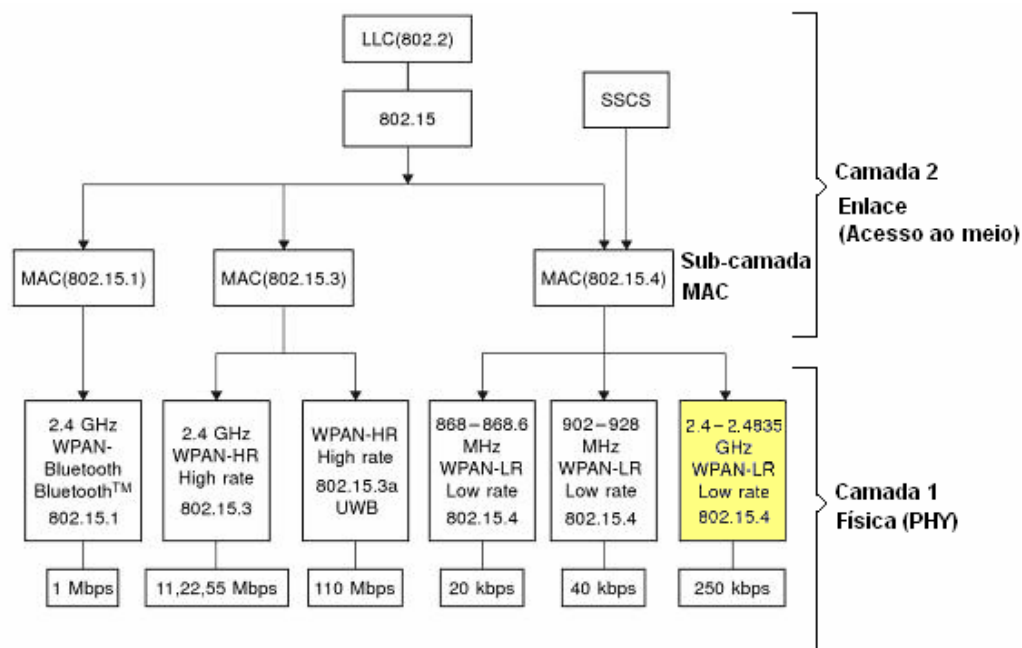


Figura 2.3-1 Evolução das redes do padrão IEEE 802.15.4 (GARG, 2007, p.675, il).

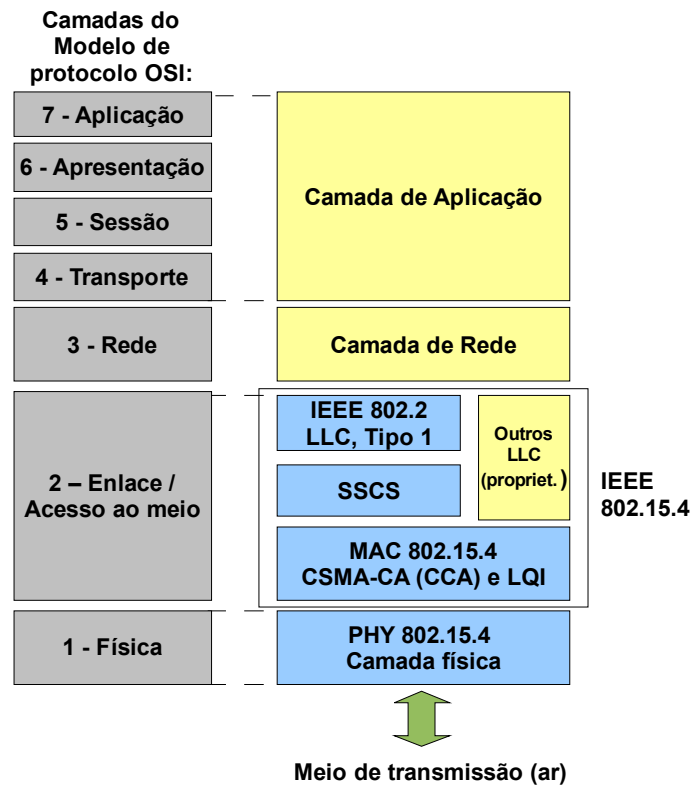


Figura 2.3-2 Camadas de protocolos da rede padrão IEEE 802.15.4.

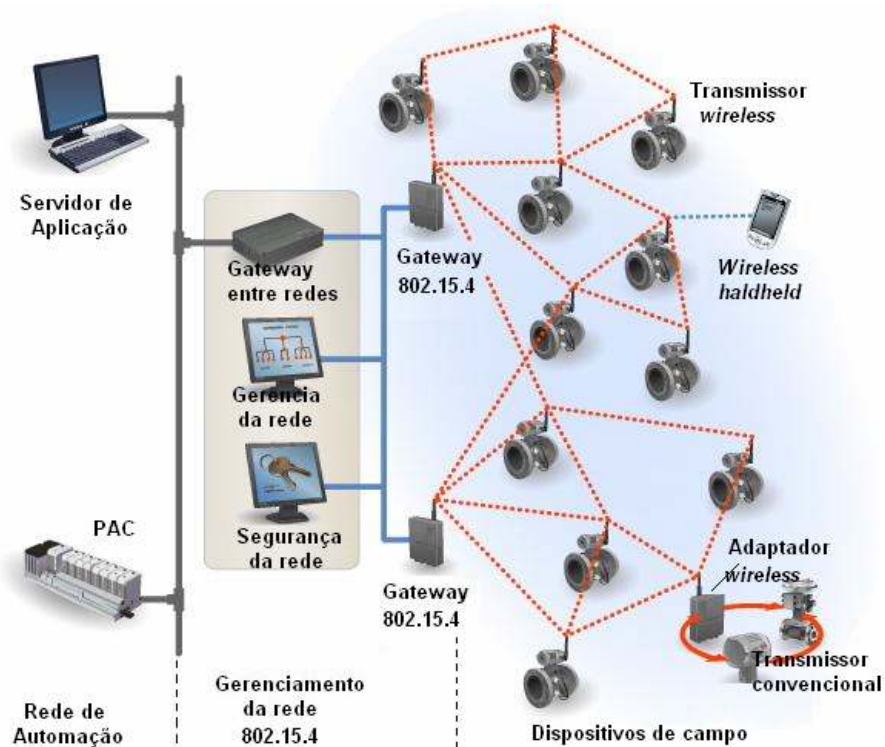


Figura 2.3-3 Exemplo rede IEEE 802.15.4 wirelessHart (HART, 2011, il).

Uma rede IEEE 802.15.4 compõe-se de três elementos principais, ilustrados na Figura 2.3-3 e descritos a seguir:

Dispositivos de campo *wireless*: pode ser um sensor/transmissor *wireless* ou um transmissor convencional (originalmente previsto para ser cabeado) com um adaptador 802.15.4 associado a ele para fazer a comunicação RF.

Gateways: habilitam a comunicação entre os dispositivos de campo e os *hosts* de aplicações conectados a um *backbone* de alta velocidade ou outra rede de comunicação existente.

Gerenciador de Rede: nele pode-se configurar a rede, agendar comunicações entre dispositivos, gerenciar as rotas de mensagens e monitorar o desempenho da rede. O Gerenciador da rede pode ser integrado ao *gateway*, ao servidor de aplicação ou ao Controlador Automático de Processo (CAP ou PAC).

2.3.1 Tipos e Classes de Dispositivos 802.15.4

A rede IEEE 802.15.4 possui três tipos de dispositivos lógicos:

- **Nó “*sink*” (sumidouro):** é o coordenador principal da rede LR-WPAN responsável pela criação e manutenção da rede, armazenando informações de gestão interna relevantes para o seu funcionamento. Ele faz a interconexão da rede onde estão localizadas as aplicações-clientes com a LR-WPAN. O Nó *Sink* é encarregado de encaminhar as solicitações (comando) provenientes da aplicação para as redes de sensores executá-las, bem como repassar para o controle as informações de sensoriamento em campo. Este dispositivo pode também funcionar como meio de ligação ou *bridge* entre diferentes redes LR-WPAN. Na literatura comercial é comumente chamado de *gateway*.
- **Nó Roteador (ou Mestre):** coordena, controla e monitora todos os dispositivos finais (nós escravos) de seus *clusters* além de memorizar a identificação de todos os nós escravos. Ele pode também servir de nó normal (sensor) mas com a funcionalidade extra do roteamento de pacotes da rede, permitindo a comunicação entre nós sem a intervenção do coordenador principal (*sink*). Este

tipo de nó fornece serviços de sincronização e gestão da rede por meio da transmissão de *beacons* (dados especiais enviados periodicamente). Uma de suas principais funcionalidades está relacionada com a capacidade de convergir os dados, a qual deve ser bem executada para não haver queda no desempenho da rede, caso os nós escravos enviem quantidades maiores de informação.

- **Nó Escravo/Sensor ou Dispositivo final (periférico):** apenas comunica-se com a rede sem nenhuma função de gestão. Assim, eles podem ser implementados com poucos recursos de programação e pequena capacidade de memória, consumindo menos energia. Geralmente realizam operações de sensoriamento e transmissão de dados. Em determinados momentos apenas transmitem e, em outros, detectam informações. Após coletar os dados, estes nós transmitem-nos para o seu respectivo nó mestre, localizado dentro de seu *cluster*.

Os dispositivos lógicos são fabricados de acordo com seus recursos e capacidade de comunicação, constituindo duas classes que são:

- **FFD (*Full-Function Devices*):** implementam todas as funções primitivas definidas pela norma, comunicando-se entre eles mesmos e com os RFD. Um FFD pode ser um coordenador/roteador, um coordenador da rede LR-WPAN ou apenas um simples periférico.
- **RFD (*Reduced-Function Devices*):** comunicam-se apenas com os FFD e portanto não tem, em geral, necessidade de transmitir muitos dados, sendo projetados com um mínimo de recursos. Todos os dispositivos possuem endereçamento de 64 bits, contudo, um dispositivo RFD pode obter endereços de apenas 16 bits do Coordenador da rede PAN (WILLIG et al. apud CAMPOS, 2006).

Os dispositivos coordenadores (principal ou não) são implementáveis somente com base em dispositivos físicos da classe FFD, já os dispositivos finais podem ser dispositivos físicos da classe FFD ou RFD.

A Figura 2.3.1-1 e a Figura 2.3.1-2 ilustram tanto os tipos de dispositivos quanto suas classes nos dois tipos possíveis de topologia de rede padrão 802.15.4 nas quais eles podem ser implementados, a saber:

- **Rede em Estrela:** dispositivos comunicam-se diretamente com um Coordenador principal, nó central representado pelo *Gateway*.
- **Rede Mesh** (trama/malha em inglês): também tem um Coordenador principal, porém os demais dispositivos também podem comunicar-se entre si. Esta rede em algumas literaturas é referida como uma variação da rede ponto a ponto.

Cada dispositivo na rede *Mesh* pode servir de roteador para mensagens de outros dispositivos, isto é, um dispositivo não precisa se comunicar diretamente com um *gateway*, mas apenas encaminhar sua mensagem para o dispositivo mais próximo a ele. Isto estende a abrangência da rede e provê rotas de comunicação redundantes visando aumentar a disponibilidade.

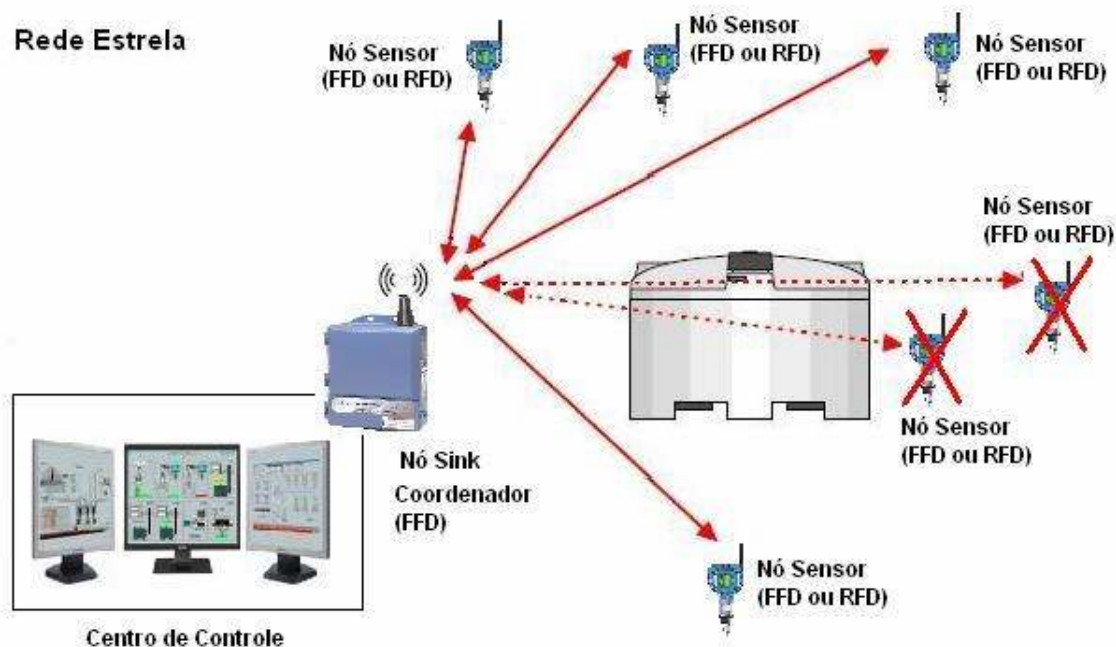


Figura 2.3.1-1 Exemplo de Rede em Estrela.

O Gerente da Rede determina rotas redundantes baseadas na latência do sinal, eficiência e confiabilidade. Para assegurar que rotas redundantes permaneçam livres e não obstruídas, mensagens continuamente alternam-se nos percursos redundantes. Consequentemente, similar à internet, se a mensagem não alcança seu destino por um caminho, ela é automaticamente re-roteada para seguir por outro caminho sem perdas de dados. Este recurso é chamado de *Auto-organização da Rede (Self-organizing)* ou *Roteamento Mesh Adaptativo*.

Se uma obstrução ocorrer na rede *Mesh*, os dispositivos automaticamente encontrarão outra alternativa de comunicação para eles. Este recurso chama-se *Self-healing* (Auto-recuperação) da rede *Mesh*.

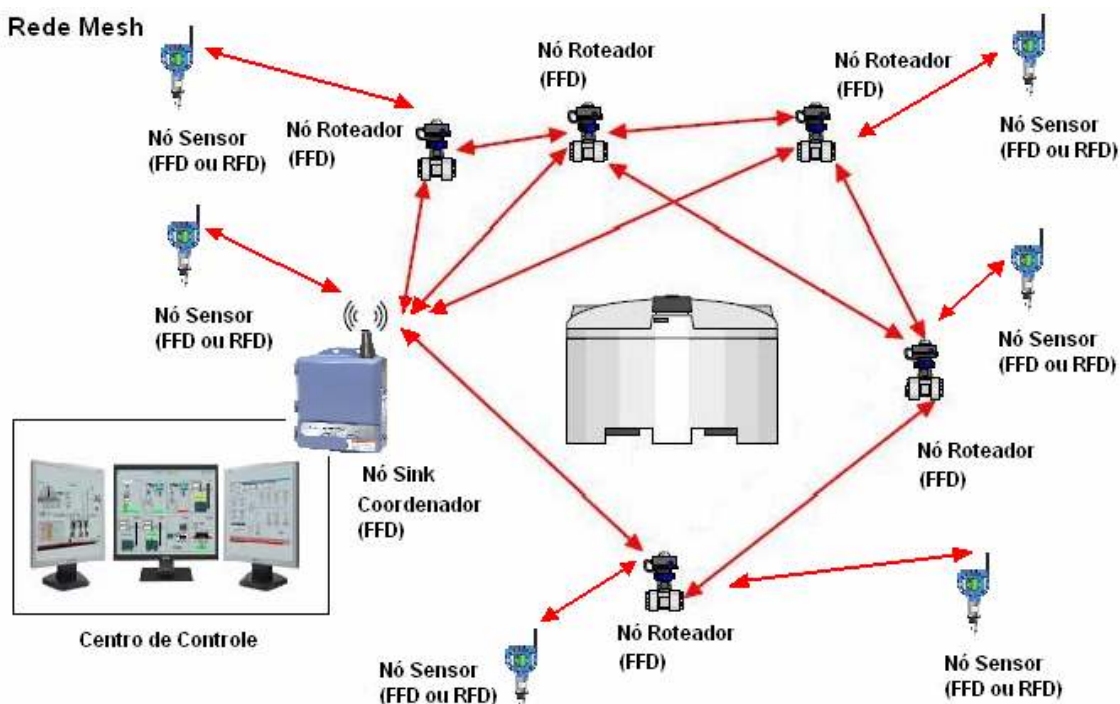


Figura 2.3.1-2 Exemplo de Rede *Mesh*.

A rede *Mesh* também significa a adição e movimentação fácil dos dispositivos. Tão logo um dispositivo sensor estiver no alcance de RF de outros na rede, ele pode se comunicar.

Cabe destacar que a topologia de rede é configurada através da camada de rede (nível 3), responsável pelo roteamento dos dados, a qual não faz parte do padrão IEEE 802.15.4, como pode ser visto na Figura 2.3-2.

Na rede LR-WPAN *Mesh*, a função de roteamento deve ser tão simples que qualquer dispositivo de campo possa assumir o papel de roteador, dependendo da auto-descoberta da topologia e da situação de alimentação de energia de seus vizinhos. Porém, apenas dispositivos equipados com a combinação apropriada de *hardware* e *software* podem assumir o papel de um dispositivo final para um dado propósito, tal como um sensor ou atuador.

2.3.2 Camada Física (PHY)

Essencialmente a camada física oferece uma interface entre a subcamada MAC e o canal de radio, fornecendo dois serviços: o serviço de dados e o serviço de gestão da camada física. O primeiro permite a transmissão e recepção de PPDU's (*Physical Layer Protocol Data Units*) através do canal de radio. O segundo, oferece funcionalidades de gestão relativa à camada física como, por exemplo, o teste de disponibilidade de canal (CCA para CSMA-CA), a detecção de energia, controle da ativação e desativação do transceptor, ao mesmo tempo que atualiza a base de informação física da LR-WPAN.

O CCA (*Clear Channel Assessment*) para CSMA-CA é a técnica aplicada para avaliar a disponibilidade do canal. Neste modo, o canal assume que está disponível se o nível de potência do canal estiver abaixo de um dado limiar chamado de limiar CCA (selecionado pelo usuário), do contrário ele assume que está ocupado (BERTOCCO et al., 2008).

Visando otimizar o uso da bateria, a camada física 802.15.4 aplica o mecanismo LQI (*Link Quality Indicator*) como parâmetro para, dinamicamente, ajustar a potência dos rádios transmissores. O LQI baseia-se na intensidade do sinal da mensagem recebida, na potência interferente e na potência de ruído. O LQI mostra a intensidade do link entre os nós. Se o valor LQI for maior, a intensidade do sinal é alta e a potência deve ser diminuída, se LQI for menor, será exigido aumento na potência do transmissor (TANTUBAY & SHARMA, 2011).

A IEEE 802.15.4 permite na camada física o uso das bandas 2,4 GHz, 868 MHz e 915MHz conforme detalhado na Tabela 2.3.2-1. Todas baseiam-se na técnica DSSS (descrita em 2.2) e devem coexistir em um equipamento 802.15.4.

Faixa [MHz]	Quantidade de canais	Países	Modulação	Taxa transmissão [kbps]
868 – 868,6	1	Europa	BPSK	20 (2003) e 100 (2006)
902 – 907,5 915 – 928	10 extensível a 13	América Norte, Austrália e Israel	BPSK	40 (2003) e 250 (2006)
2400 – 2483,5	16	Global	O-QPSK	250

Tabela 2.3.2-1 Frequências e modulação aplicadas na camada física do IEEE 802.15.4 no mundo.



Figura 2.3.2-1 Os 16 canais de frequências do padrão IEEE 802.15.4 (LOULA & CESAR, 2011, il).

Não há uma topologia física específica para a rede de controle do processo industrial, pois a aplicação depende muito do local e aplicação. As redes *mesh*, por exemplo, são bastante úteis em áreas monitoradas altamente compactas com equipamentos rotativos e/ou tubulações. A maioria das aplicações existentes são redes de 10 a 200 dispositivos de campo e um número máximo de 20 saltos (*hops*⁹) (PISTER, K et al., 2009).

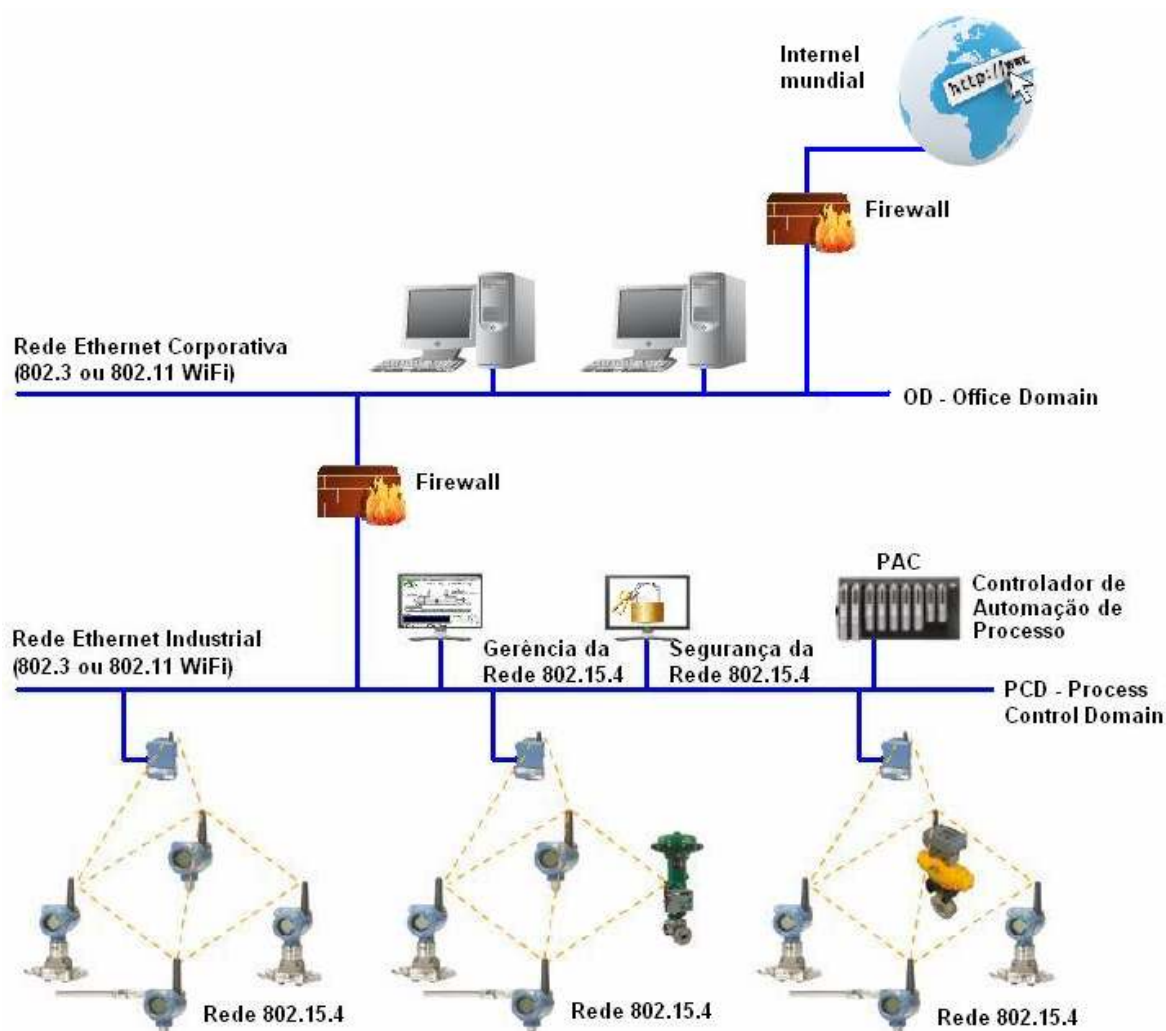


Figura 2.3.2-2 Topologia da rede IEEE 802.15.4 com *backbone* 802.3 ou 802.11.

⁹ Não confundir saltos (*hops*) entre dispositivos dos saltos (*hopping*) de frequência que ocorre no meio aéreo (camada PHY). O primeiro refere-se aos saltos dos dados de dispositivo para dispositivo durante uma transmissão enquanto que o segundo refere-se à alocação dinâmica de frequência do DSSS.

A RFC 5673 (PISTER, K et al., 2009) cita três topologias físicas mais comuns vistas na prática, mas cabe destaque à topologia de rede IEEE 802.15.4 composta de um *backbone* como um “dossel” que agrega múltiplos *clusters* de rede *wireless* 802.15.4 menores. O *backbone* é uma rede industrial de alta velocidade (Ethernet IEEE 802.11 a/b/g/n ou 802.3) que pode interconectar múltiplas LR-WPAN através de seus roteadores. Em geral, este *backbone* interconecta a infraestrutura legada cabeada da planta, conhecida como rede da planta ou *Process Control Domain* (PCD). Estas redes de automação da planta são segregadas da rede do escritório ou *Office Domain* (OD), que por sua vez é, em geral, segregada da internet mundial. Esta arquitetura, ilustrada na Figura 2.3.2-2, possui a vantagem de melhor escalar o controle de uma rede em termos de densidade e, portanto, supõe-se que ela será a mais provável de ser encontrada na planta.

2.3.3 Camada de Enlace (MAC)

A estrutura da trama MAC muda em função da natureza da mensagem a transmitir. A subcamada MAC suporta dois modos de acesso que podem ser selecionados pelo Coordenador da rede:

- O modo sem *beacon*, no qual o acesso é comandado pelo protocolo CSMA/CA não alocado. Este modo é o adotado pela topologia em estrela, sem roteamento.
- O modo com *beacon*, estes são regularmente emitidos pelo Coordenador da rede para sincronizar os nós associados e para identificar a LR-WPAN em topologia *Mesh*. Neste caso, uma estrutura de super-trama é definida entre duas transmissões sucessivas de *beacons*. O acesso neste modo é comandado essencialmente pelo protocolo CSMA/CA alocado, mas ele implementa igualmente um mecanismo de alocação de períodos de tempos predeterminados GTS (*Guaranteed Time Slot*) para os nós que necessitam dos serviços garantidos (aplicações críticas).

A camada de Enlace realiza o controle de acesso ao meio de transmissão. É constituída das subcamadas MAC (*Medium Access Control*) e SSCS (*Service Specific Convergence Sublayer*). A subcamada SSCS é uma das duas subcamadas de

qualquer ATM *Adaptation Layer* (AAL), sendo um serviço dependente que assegura a transmissão de dados. A subcamada LLC (*Link Logical Control*) é definida pelo padrão IEEE 802.2. e faz o controle lógico de enlace, fornecendo serviços de conexão lógica no nível 2, implementando funcionalidades para transmissão confiável (conexões, controle de erro, controle de fluxo).

A subcamada MAC da norma IEEE 802.15.4 lembra muito a da IEEE 802.11, entretanto, as especificações desta subcamada foram adaptadas às necessidades da rede LR-WPAN. Ela, por exemplo, eliminou o mecanismo RTS/CTS e acrescentou a nova variante do protocolo CSMA/CA. Essencialmente, a subcamada MAC fornece dois serviços:

- Serviço de dados: transmite e recebe os MPDUS (*Mac Protocol Data Units*),
- Serviço de gestão: provê uma interface de gerenciamento que gerencia o acesso ao canal físico e os *beacons* da rede, valida os quadros (*frames*), garante os *time-slots* GTS, entrega as aquisições e manipula as associações e desassociações dos nós.

2.4 TEORIA DE CONTROLE

Os sistemas de controle automático na indústria operam em paralelo à linha de produção e são utilizados para coordenar, monitorar, alterar e registrar as condições de máquinas, produtos e processos. Têm requisitos que devem ser atendidos simultaneamente tais como a minimização da intervenção humana, a manutenção de condições de segurança operacional e a garantia de respostas em tempo real (SIMON & KOO PAN, 2008). A automação de um processo produtivo emprega dispositivos mecânicos, elétricos e eletrônicos que desempenham funções equivalentes às humanas nas atividades de supervisão e controle, tais como coleta e análise de dados e correção de rumos.

2.4.1 Equipamentos de Controle Industrial

Os principais equipamentos que compõem uma malha de controle na planta industrial, estejam eles no campo ou na sala de controle, são:

Nós sensores ou instrumentos de medição (Medidor): medem o valor de uma variável e informam os dados sobre o andamento do processo. É composto pelas seguintes partes: o elemento de detecção que é o que sofre uma alteração física proporcional à variação do fenômeno que está sendo medido; o transdutor que converte a variação física sofrida pelo elemento de detecção em outra grandeza física mais adequada à medição e à leitura; e o indicador que é a parte que apresenta o valor medido de uma variável. Comercialmente, o termo “transmissor” é utilizado para designar dispositivos que incorporam as três funções – sensor, transdutor e transceptor – em um único produto. Neste trabalho, os termos sensor, transdutor, transmissor, transceptor referem-se a uma mesma coisa.

Controladores: dispositivo que manipula determinada variável de entrada do sistema de forma a manter a variável de saída em um valor de referência pré-definido (*set point*). Em suma, eles recebem e processam as informações fornecidas pelos sensores, calculando as medidas a adotar e emitindo instruções para os atuadores. Pode ser mecânico, pneumático, elétrico, eletrônico, podendo este último ser analógico ou digital. Todos têm lógicas de controle implementadas na sua estrutura física, à exceção do dispositivo eletrônico digital, no qual a lógica de controle é implementada por meio de *software*, executado em seus circuitos. O controlador, em intervalos periódicos de tempo (*scan time*), realiza leituras das entradas provenientes do campo, processa-as e compara-as com seus *set points* e, então envia comandos pertinentes às saídas. Ele pode realizar operações de conversão de sinais analógicos em digitais e vice-versa e, também, comunicar-se com a Interface Humano-Máquina (IHM), responsável pela interação do sistema com o operador.

O Controlador Lógico Programável (CLP) é o tipo de controlador de maior aplicação na indústria. Possui elevada capacidade de processamento. Funciona em tempo real, é projetado para controlar múltiplas entradas e saídas e também para funcionar em ambientes *hostis*, pois suporta grandes variações de temperatura e tem imunidade a ruídos elétricos e resistência a vibração e impacto. Os programas são carregados no CLP por cabo ou via rede, sendo armazenados em memórias não-voláteis. O

equipamento é fornecido com um *software* de programação que possibilita ao usuário desenvolver aplicativos voltados às suas necessidades específicas.

Um dos grandes desafios da automação consiste em determinar com precisão quais são as variáveis que devem ser manipuladas e em que magnitude, para que as variáveis controladas mantenham-se nos valores desejados. Os cálculos efetuados com esse objetivo são incorporados aos algoritmos executados pelos controladores, para emissão das ordens enviadas aos atuadores. O procedimento mais adotado para esses cálculos, e também o mais tradicional, é o controle PID (Proporcional – Integral – Derivativo), que baseia-se nos desvios já ocorridos.

O *Programmable Automation Controller* (PAC) é um tipo de controlador PLC que dispõe de recursos mais sofisticados de *hardware* e *software* que facilitam a integração e a troca de informações com outros dispositivos e programas de controle. À funcionalidade lógica de um PLC, o PAC acrescenta a capacidade de controlar também processos contínuos e movimentos, podendo executar aplicações de automação tanto em indústrias de processo como em indústrias discretas (fabris).

Atuadores: dispositivos que, recebendo o comando do sistema de controle, convertem-no em uma ação física com o fim de ajustar a variável manipulada. Os atuadores mais utilizados na indústria são aqueles associados a válvulas de controle e a motores. As válvulas de controle, muito usadas em indústrias de processo contínuo, regulam a vazão de um fluido – líquido, gás ou vapor – por meio de ajustes na abertura pela qual o fluido escoar.

Adaptador: dispositivo utilizado para permitir a comunicação entre redes. Estão incluídos nesta categoria o *gateway*, ou porta de ligação, e o *linking device*, que viabilizam a troca de dados entre redes diferentes.

Interface Humano-Máquina (IHM): dispositivo utilizado para visualização de dados do processo, bem como para alteração de seus parâmetros e de condições de operação das máquinas. É através da IHM que o operador pode interagir com o sistema controlado. São basicamente monitores de vídeo (*displays*), teclas e botões para navegação ou inserção de dados, barramentos para placas de expansão, portas de comunicação e *software*.

São estes equipamentos que realizam o ciclo de ações básicas necessárias ao controle automático de um processo produtivo. Uma máquina ou uma planta industrial

completa pode ser composta por apenas uma ou por centenas de malhas de controle que, em conjunto, executam a automação total da máquina ou unidade produtiva.

2.4.2 Malhas de Controle

A Teoria de controle utiliza dois conceitos de Malha de Controle:

Malha de Controle fechada: malha que possui realimentação (*feedback*), na qual a variável de saída é realimentada no controlador. Este compara o nível da saída com o valor de referência (*set point*) e, em função da diferença (erro), aumenta ou diminui o valor da entrada, até que o valor da saída alcance o valor ideal. Casos imprevistos são detectados e tratados pelo controlador, porém, caso haja um desvio muito grande do valor de referência, pode ser necessário um certo tempo para que seja recobrado o equilíbrio do sistema. A Figura 2.4.2-1 ilustra um sistema de controle de malha fechada.

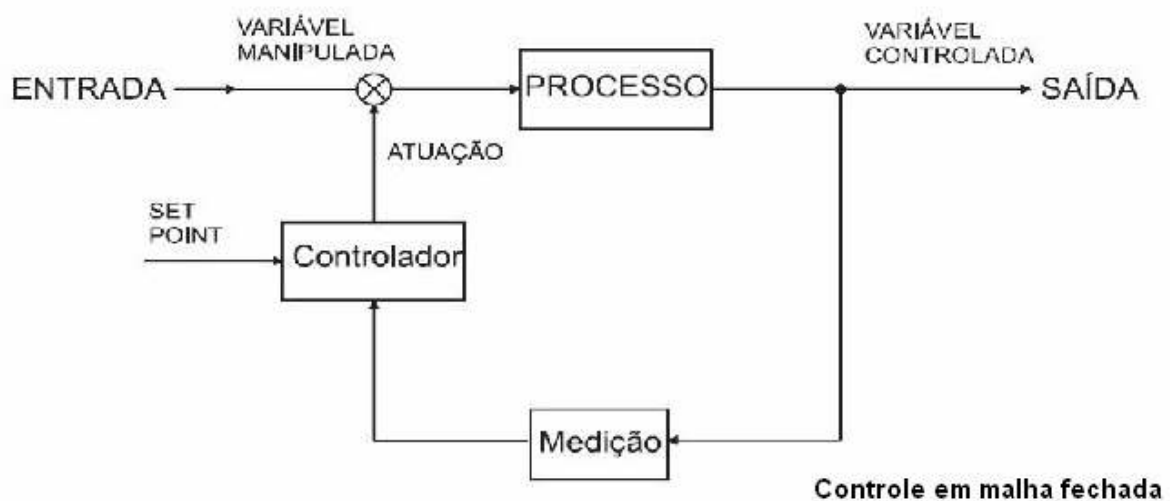


Figura 2.4.2-1 Controle em Malha Fechada (SIMON & KOO PAN, 2008, il).

Malha aberta: este controle é conhecido como antecipativo (*feedforward*), não possuindo realimentação. Tal controle é adequado aos processos em que é muito longo o tempo necessário para que as variáveis de saída apresentem mudanças em função da realimentação. Contudo, é fundamental que o comportamento do processo controlado seja perfeitamente conhecido para que as respostas possam ser adequadamente antecipadas. Ao ser detectado qualquer distúrbio que afete a variável

de entrada, imediatamente é tomada uma ação corretora. O inconveniente da malha aberta é que, caso ocorram variações imprevistas, não há como o sistema corrigir sua atuação. A Figura 2.4.2-2 ilustra um sistema de controle de malha aberta.

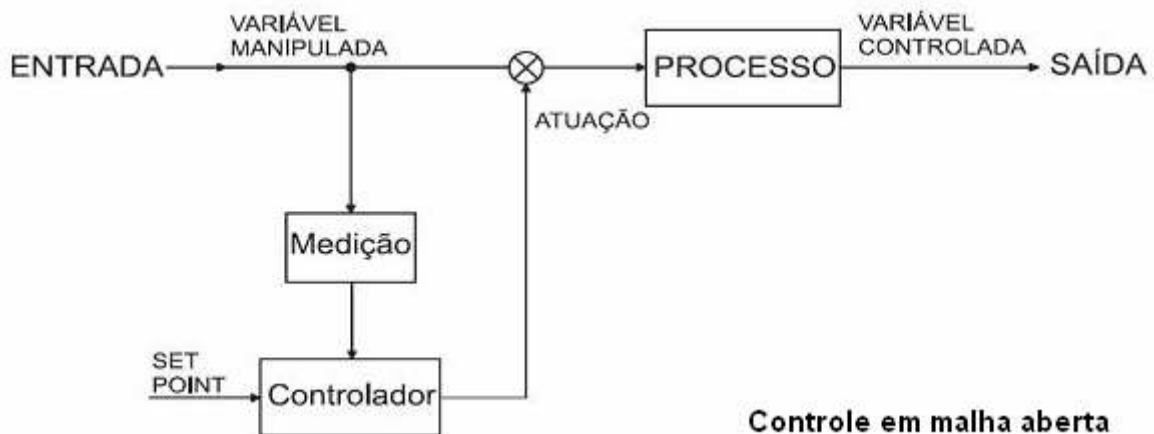


Figura 2.4.2-2 Controle em Malha Aberta (SIMON & KOO PAN, 2008, il).

Independente do tipo de controle da malha, as variáveis de saída recebem o nome de controladas, enquanto que as variáveis de entrada são chamadas de manipuladas. Podem ser variáveis, seja de entrada ou de saída, temperatura, pressão, nível, vazão, densidade, tempo, velocidade, potência, tensão elétrica, corrente, frequência, estado (ligado ou desligado), peso, dimensão e posição.

De maneira geral, os instrumentos de controle recebem o nome da variável do processo à qual estão relacionados. Por exemplo, indicador de nível, sensor de pressão etc. Essa variável pode ser de natureza contínua, como pressão, temperatura ou vazão, ou pode ser de natureza discreta, como aquelas condicionadas à ocorrência de eventos – detecção de presença, estado de ligado ou desligado ou fim-de-linha. Na indústria de processos predominam os sistemas de controle contínuo enquanto que na indústria fabril predominam os sistemas de controle discreto.

Como o sistema de automação precisa atuar de forma interativa, coordenada e integrada, o desempenho de cada componente é crítico para a eficiência do conjunto, o que, por sua vez, pode afetar o desempenho de toda a planta. Entre os vários fatores que podem afetar o desempenho do sistema de controle automático, podem ser citados os seguintes:

- a qualidade dos dispositivos sensores, controladores e atuadores, pois deles dependem diretamente a precisão e a velocidade de resposta do sistema;

- as estratégias de controle adotadas, inseridas nos algoritmos executados pelo controlador, as quais determinam as ações a serem executadas;
- as velocidades de processamento e de resposta do controlador; e
- a qualidade da rede de comunicação de dados intra-sistema.

2.4.3 Redes Industriais

A classificação das redes industriais, tal qual ilustrado na Figura 2.4.3-1, é basicamente dividida em três níveis hierárquicos responsáveis pela interconexão de diferentes tipos de equipamentos:

Fieldbus (dados no formato de pacotes de mensagens): a rede *fieldbus* interliga os equipamentos de I/O mais inteligentes e pode cobrir distâncias maiores. Os equipamentos acoplados à rede possuem inteligência para desempenhar funções específicas de controle tais como *loops* PID, controle de fluxo de informações e processos. A *Sensorbus* (dados no formato de bits) é uma subdivisão da rede *Fieldbus*, situando-se no nível mais baixo. Ela é composta de equipamentos mais simples (em complexidade e opções de comandos), pequenos e de baixo custo diretamente conectados à rede e são tipicamente sensores, atuadores, contadores, etc. Estas redes não almejam cobrir grandes distâncias, sua principal preocupação é manter os custos de conexão tão baixos quanto possível.

Devicebus (dados no formato de bytes): a rede *devicebus* é o nível intermediário entre as redes *Sensorbus* e *Fieldbus* e pode cobrir distâncias de até 500 m. Os equipamentos conectados a esta rede são os controladores CLP e CAP. Neste nível de rede trafegam informações de controle e condição (*status*) dos equipamentos de campo (máquinas, sensores, bombas, atuadores, etc). Nesta camada ocorre a transferência de blocos de dados, tendo os mesmos requisitos de transferência rápida de dados da rede *Sensorbus*, porém ela consegue gerenciar mais equipamentos e dados.

Supervisão e Controle: é o nível mais alto que interliga os equipamentos responsáveis pelo planejamento da produção, agendamento, gerenciamento e controle dos equipamentos de campo, através da interface IHM, na qual está instalado

algum *software* supervisor (SCADA, por exemplo). O protocolo padrão ethernet é TCP/IP IEEE 802.3 é o mais utilizado nesse nível.

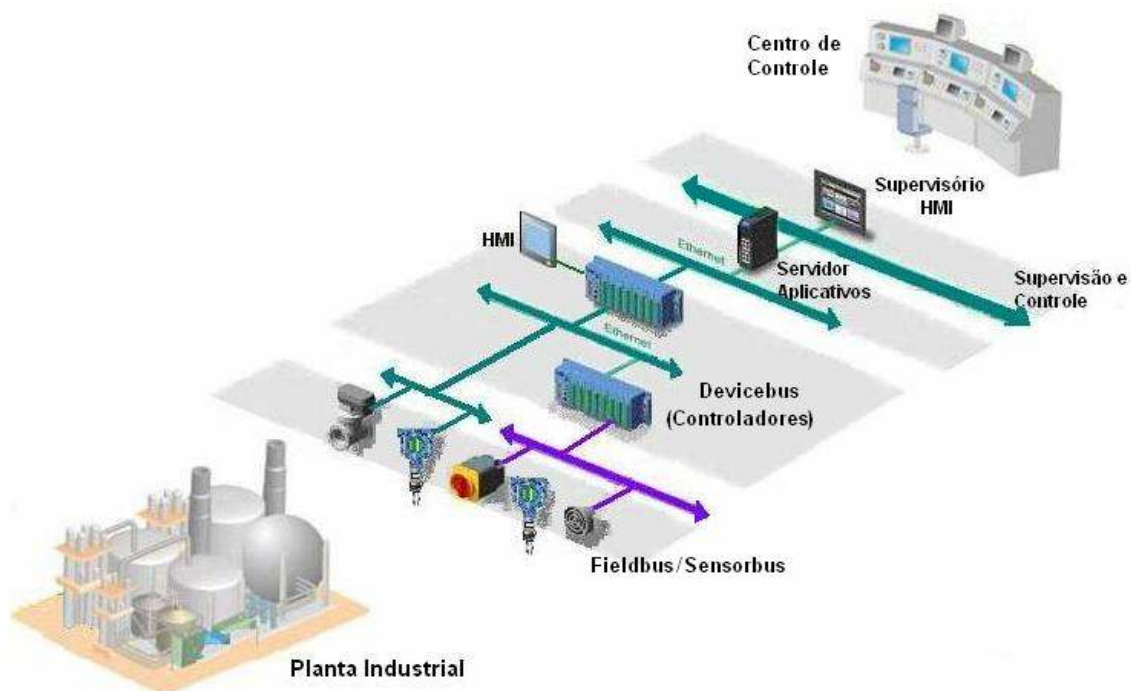


Figura 2.4.3-1 Níveis da rede industrial: *Fieldbus*, *Devicebus* e Supervisão e Controle.

As redes industriais distinguem-se das redes de comunicação corporativas por precisar atender a requisitos mais rigorosos de resistência mecânica, por serem compatíveis com ambientes agressivos e corrosivos, com operação em temperaturas elevadas, e por possuírem maior imunidade a interferências eletromagnéticas.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA

Em sua forma pura, muitos vapores de produtos químicos orgânicos (a 25°C / 1 atm) possuem uma faixa de flamabilidade, delimitada por um limite inferior e outro superior, dentro dos quais chamas e explosões podem ocorrer. Cada produto também tem a sua temperatura de autoignição, acima da qual, o produto é capaz de extrair energia suficiente do próprio meio para iniciar uma ignição. Sendo assim, o projeto da planta industrial tem de ser elaborado e executado para manter as concentrações dos produtos longe desta faixa de flamabilidade e da sua temperatura de auto-ignição. Para o caso de misturas de produtos químicos, os limites de flamabilidade são

estimados através de equações empíricas. Da mesma forma pode-se estender os limites para temperaturas e pressões mais elevadas do que 25°C e 1 atm.

A prevenção de vazamentos, derrames, mau funcionamento do equipamento, excesso de pressão, excesso de temperatura, corrosão, fadiga do metal e outras condições semelhantes. Também deve ser levado em conta nos projetos e engenharia de instalações, manutenção de equipamentos, instrumentação, alarmes eficazes, pontos de controle eficazes, procedimentos e treinamento. Isto é chamado de “Segurança do Processo”, a qual tem por função prevenir a liberação acidental de produtos químicos, energia ou outros materiais potencialmente perigosos (inclusive vapor) durante o curso de processos industriais.

Adicionalmente, os equipamentos elétricos, por sua própria natureza, podem constituir uma fonte de ignição quando operam em uma atmosfera explosiva. Essa fonte de ignição pode ser ocasionada pelo centelhamento normal, devido à abertura e fechamento de seus contatos, ou por apresentar temperatura elevada, esta podendo ser intencional (para atender a uma função própria do equipamento) ou provocada por correntes de defeito (curto-circuito). A quantidade de energia elétrica usual na indústria para fins de acionamento de máquinas, iluminação, controle, automação, etc, é muitas vezes superior à mínima energia necessária para causar a inflamação de uma atmosfera explosiva¹⁰. Por isso, foram desenvolvidas normas técnicas bem definidas de proteção para a fabricação dos equipamentos elétricos, em busca de um nível de segurança aceitável para as instalações.

Foram também estabelecidas regras para a elaboração do diagrama denominado Mapa da Classificação de Áreas, o qual representa o grau de risco da existência ou aparição de atmosferas explosivas nos diferentes locais da planta industrial. A Figura 2.5-1 ilustra um exemplo de Mapa de Classificação de área.

Área Classificada “é todo local sujeito à probabilidade da existência ou formação de misturas explosivas pela presença de gases, vapores, poeiras ou fibras combustíveis misturadas com o ar (ou com O₂)” (AREAS...,2011). Produtos que geram atmosferas explosivas (gases inflamáveis, líquidos inflamáveis ou ainda poeiras/ fibras combustíveis) representam fontes potenciais de risco.

¹⁰ Atmosfera Explosiva é a mistura com o ar, de substâncias inflamáveis na forma de gases, vapores, névoas, poeiras ou fibras na qual após a ignição, a combustão se propaga através da mistura remanescente.

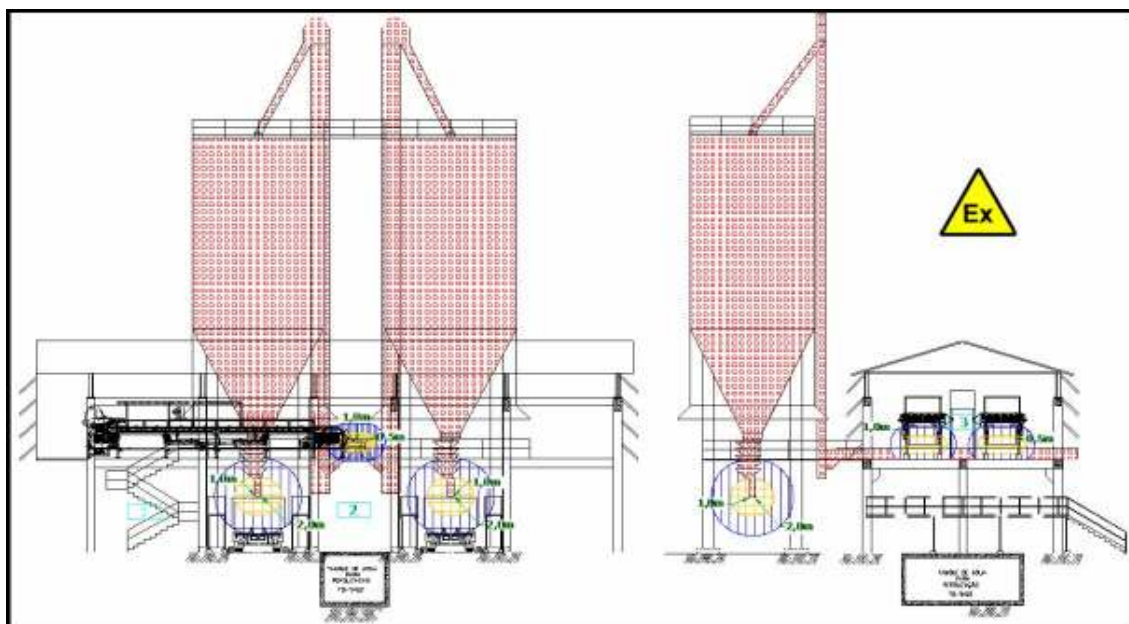


Figura 2.5-1 Exemplo de Mapa da Classificação de Área Fonte da figura: (COBEI, 200-?).

A classificação de áreas é regida pela norma internacional IEC 60079.10 - *Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres Part - 10: Classification of Hazardous Areas* cujo objetivo é prover os equipamentos elétricos a serem instalados nestes locais de um tipo específico de proteção com o fim de eliminar ou isolar a fonte de ignição, evitando a ocorrência simultânea de um dos componentes do “triângulo do fogo” (ar/oxigênio, combustível e a fonte de ignição) necessários para que ocorra uma explosão. A ABNT IEC baseia-se na classificação em Zonas (graus de risco de explosão) e Grupos (tipos de substâncias).

O Brasil adotou a Norma ABNT NBR IEC para os projetos de classificação de áreas. As empresas elaboram-no com base nas características de seus processos, dos produtos manipulados (explosividade, volume dos inventários, níveis de pressão, temperatura e vazão) e nos arranjos de suas instalações (expostos ao tempo ou no interior de prédios fechados). Porém, é importante conhecer a equivalência com a Norma americana NEC, visto que muitos dos equipamentos e materiais na indústria de processos são importados dos Estados Unidos.

2.5.1 Zonas

Estas fontes de risco são classificadas de acordo com o grau da duração e frequência das atmosferas explosivas geradas por elas (AREAS..., 2011). Ou seja, a Zona designa o grau de risco no local. Para áreas de gases e vapores, como é o caso da indústria de processo, a classificação de acordo com a norma NBR IEC 60079-10 é:

- ZONA 0 – É um local em que a atmosfera explosiva está presente de modo permanente, por longos períodos ou ainda frequentemente (fontes de risco contínuo).
- Zona 1 – É um local onde a atmosfera explosiva está presente em forma ocasional e em condições normais de operação (fontes de risco de grau primário).
- Zona 2- É um local onde a atmosfera explosiva está presente somente em condições anormais de operação e persiste somente por curtos períodos de tempo (fontes de risco de grau secundário).

Deve-se entender como condições “normais de operação” aquelas encontradas nos equipamentos operando dentro dos seus parâmetros de projeto. Um exemplo de Zona 0 é a área de um tanque de armazenamento de inflamáveis do tipo atmosférico, mostrado na Figura 2.5.1-1, onde haverá permanentemente a presença da mistura explosiva enquanto houver produto no tanque. Neste mesmo tanque, o respiro dele, por ter a saída de vapores do produto toda vez que o nível de combustível dentro aumentar (com exceção de líquidos altamente voláteis, isto não acontece permanentemente, mas apenas quando o nível sobe), será classificado de Zona 1. Ainda neste tanque, serão Zonas 2, por exemplo, as flanges (que por envelhecimento da junta ou afrouxamento dos parafusos podem vaziar) ou também por perda do controle de nível (que provocará o derramamento de líquido na bacia). Estas duas situações representam condições anormais, não sendo, portanto frequentes nem de longa duração.



Figura 2.5.1-1 Exemplos de Zonas de classificação em um tanque de inflamáveis.

As Zonas no Mapa de Classificação de Área em duas dimensões tem de ser ilustradas com elevação, denotando os volumes ao redor da fonte de risco e respectivas extensões (em metros). Em Mapas de Classificação de Área em 3 dimensões, a característica volumétrica das zonas de risco fica melhor evidenciada, tal como mostra a Figura 2.5.1-2 . Ainda, segundo a norma, devem ser identificadas no mapa todas as fontes geradoras de riscos, os produtos que geram o risco e suas condições de processo. Em atendimento à NR-10, todas estas áreas devem também estar “sinalizadas” em campo.

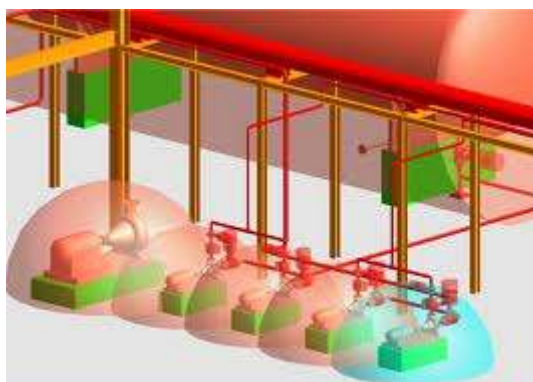


Figura 2.5.1-2 Característica volumétrica das Zonas de risco ao redor de bombas (COBEI, 200-?, il).

2.5.2 Grupos

Os Grupos são estabelecidos em função dos gases explosivos presentes no ambiente sendo subdivididos em Grupo I ou Grupo II conforme mostra a Tabela 2.5.2-1.

Grupo IEC (Europa)	Descrição		Grupo NEC (EUA)
I	Ocorrem em instalações subterrâneas, como as minas de carvão nas quais prevalece o gás da família do metano (grisu) e poeiras de carvão.		- x -
II	Ocorre em indústrias de superfície (químicas, petroquímicas, farmacêuticas, etc). Subdivide-se em IIA, IIB e IIC de acordo com o gás representativo no local da instalação.		- x -
	IIA	Ocorre em atmosferas explosivas, onde prevalece os gases da família do propano (plataformas de perfuração e produção).	D
	IIB	Ocorre em atmosferas explosivas, onde prevalece os gases da família do etileno .	C
	IIC	Ocorre em atmosferas explosivas, onde prevalece os gases da família do hidrogênio (incluindo o acetileno).	B – Hidrogênio A - Acetileno

Tabela 2.5.2-1 Classificação de Grupos conforme a Norma NBR IEC e seu equivalente IEC.

Estes Grupos podem ser entendidos como a gradação de periculosidade da substância do ponto de vista de seu comportamento durante uma explosão.

2.5.3 Tipos de Proteção de Equipamentos

No Brasil há um número muito grande de indústrias de processo que ainda adotam a tecnologia americana por força de origem de seus projetos. A internacionalização da economia, os programas de produtividade e de qualidade industrial estão exigindo uma reavaliação dos métodos e técnicas atualmente empregados. A adoção de uma tecnologia internacional possibilita uma maior aproximação com mais países desenvolvidos com o aproveitamento de soluções técnicas evoluídas, tanto do ponto de vista econômico, quanto do ponto de vista de segurança.

Os métodos de instalação previstos pela normalização internacional IEC 60079-14 – *Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres - Part 14: Electrical Installations in Hazardous Areas (Other Than Mines)* incluem também a prática americana, uma vez

que o objetivo do organismo de normalização internacional é equalizar, não restringir a tecnologia que é adotada pelos países membros, trazendo mais opções de escolha. O documento que define a forma de aplicação dos equipamentos elétricos nas áreas classificadas é o NEC (*National Electric Code*), que estabelece os requisitos que devem ser obedecidos quando da construção e montagem desses equipamentos (BULGARELLI, 2011).

Os equipamentos e dispositivos elétricos devem possuir características inerentes que os capacitem a operar em Áreas Classificadas com o mínimo de risco. Para isso são utilizados métodos de prevenção através de técnicas construtivas para seus invólucros que visam reduzir o risco de explosão ou incêndio provocado pela sua operação. Estes métodos de proteção baseiam-se em um dos princípios que seguem:

- **Segregação de faísca (encapsulamento, imersão ou pressurização):** método que visa separar fisicamente a atmosfera potencialmente explosiva da Área Classificada da fonte de ignição. São equipamentos pressurizados, imersos ou encapsulados, conforme segue:
 - Invólucro pressurizado Ex-p: o invólucro é mantido com pressão interna superior à pressão atmosférica, evitando que haja ingresso da atmosfera ao seu redor no seu interior.
 - Imersão em óleo Ex-o ou areia Ex-q: as partes que podem causar a ignição de uma atmosfera explosiva (por centelha ou alta temperatura) ficam imersas em um meio isolante.
 - Encapsulamento Ex-m: as partes que podem causar a ignição de uma atmosfera explosiva (por centelha ou alta temperatura) são encapsuladas em um composto (resina, por exemplo) que impede qualquer ignição da atmosfera explosiva.
- **Prevenção Intrinsecamente Segura:** método que controla a fonte de ignição de forma a não possuir energia elétrica e/ou térmica suficiente para detonar a atmosfera explosiva da Área Classificada.
- **Confinamento da explosão:** método que evita a detonação da atmosfera explosiva confinando a explosão em um compartimento. O confinamento da explosão pode ser feito das seguintes maneiras:
- **À prova de explosão Ex-d:** as partes que possam causar a ignição de uma atmosfera explosiva são instaladas dentro de um invólucro capaz de suportar uma explosão interna (sem se romper) e sem permitir que ela propague-se para o meio externo.

- **Não Acendível Ex-n:** proteção aplicada a equipamentos que, em operação normal ou em certas condições anormais específicas, impedem que eles causem a ignição de uma atmosfera explosiva ambiente.
- **Segurança aumentada Ex-e:** Medidas construtivas adicionais aplicadas aos equipamentos, visando aumento de segurança contra temperaturas excessivas ou a ocorrência de arcos ou centelhas em regime normal ou sob condições anormais especificadas.

Os tipos de proteção para equipamentos, os níveis de proteção dos equipamentos (EPL *Equipment Protection Level*), seus códigos de marcação (símbolos) assim como as normas aplicáveis estão relacionadas na Tabela 2.5.3-2. A identificação do EPL na Tabela 2.5.3-2 deve ser entendida da seguinte maneira:

- 1ª letra/maiúscula: local da instalação M (*Mining*) - Mina, G (*Gas*) ou D (*Dust*) – Poeira.
- 2ª letra/minúscula: proteção proporcionada sendo “a” (muito alta), “b” (alta) ou “c” (elevada) conforme explicado na Tabela 2.5.3-1.

Proteção	Desempenho da proteção
Muito alta a	Dois meios de proteção ou segurança independentes, mesmo quando duas falhas ocorrem, independentemente um a da outra.
Alta b	Adequado para operação normal e com distúrbios de ocorrência frequente ou equipamento onde falhas são normalmente levadas em consideração.
Elevada c	Adequado para operação normal

Tabela 2.5.3-1 Proteção proporcionada na marcação EPL dos equipamentos.

Dentro os diversos tipos de proteção existentes, os únicos que dependem do grupo de gás são os Ex-d e o Ex-i. Portanto quando se especifica qualquer um destes tipos de proteção deve-se citar também o grupo de gás para o qual eles devem atender e a classe de temperatura. As classes de temperaturas estão listadas na Tabela 2.5.3-3. Um equipamento instalado dentro de uma área classificada é classificado quanto à temperatura superficial máxima que ele pode apresentar em funcionamento normal ou em caso de falha. A ABNT NBR IEC 60079-14 especifica a temperatura superficial máxima em seis níveis, assumindo como temperatura ambiente de referência 40°C:

EPL	Tipo de proteção	Código	De acordo com
'Ga'	Intrinsecamente seguro	'ia'	IEC 60079-11
	Encapsulamento	'ma'	ABNT NBR IEC 60079-18
	Dois tipos de proteção independentes, cada um atendendo ao EPL 'Gb'		ABNT NBR IEC 60079-28
	Proteção de equipamento e sistemas de transmissão utilizando radiação óptica		IEC 60079-28
'Gb'	Invólucros à prova de explosão	'd'	ABNT NBR IEC 60079-1
	Segurança aumentada	'e'	ABNT NBR IEC 60079-7
	Intrinsecamente seguro	'ib'	IEC 60079-11
	Encapsulamento	'm' ou 'mb'	ABNT NBR IEC 60079-18
	Imersão em óleo	'o'	IEC 60079-6
	Invólucros pressurizados	'p', 'px' ou 'py'	ABNT NBR IEC 60079-2
	Imersão em areia	'q'	ABNT NBR IEC 60079-5
	Conceito de Fieldbus intrinsecamente seguro (FISCO)		ABNT NBR IEC 60079-27
	Proteção de equipamento e sistemas de transmissão utilizando radiação óptica		IEC 60079-28
'Go'	Intrinsecamente seguro	'ic'	IEC 60079-11
	Encapsulamento	'mc'	ABNT NBR IEC 60079-18
	Não acendível	'n' ou 'nA'	ABNT NBR IEC 60079-15
	Respiração restrita	'nR'	ABNT NBR IEC 60079-15
	Limitação de energia	'nL'	ABNT NBR IEC 60079-15
	Equipamento centelhante	'nC'	ABNT NBR IEC 60079-15
	Invólucros pressurizados	'pz'	ABNT NBR IEC 60079-2
	Conceito de Fieldbus intrinsecamente seguro (FISCO)		ABNT NBR IEC 60079-27
	Proteção de equipamento e sistemas de transmissão utilizando radiação óptica		IEC 60079-28
'Da'	Intrinsecamente seguro	'iD'	IEC 60079-11
	Encapsulamento	'mD'	ABNT NBR IEC 60079-18
	Proteção por invólucro	'tD'	IEC 60079-31
'Db'	Intrinsecamente seguro	'iD'	IEC 60079-11
	Encapsulamento	'mD'	ABNT NBR IEC 60079-18
	Proteção por invólucro	'tD'	IEC 60079-31
	Invólucros pressurizados	'pD'	IEC 61241-4
'Dc'	Intrinsecamente seguro	'iD'	IEC 60079-11
	Encapsulamento	'mD'	ABNT NBR IEC 60079-18
	Proteção por invólucro	'tD'	IEC 60079-31
	Invólucros pressurizados	'pD'	IEC 61241-4

Tabela 2.5.3-2 Tipos de Proteção segundo a Norma IEC (IEC 60079-14, 2009).

CLASSES de TEMPERATURA requerida pela CLASSIFICAÇÃO de ÁREA	TEMPERATURA de IGNIÇÃO do gás ou vapor inflamável existente na área classificada onde o equipamento será instalado	Máxima temperatura de SUPERFÍCIE DO EQUIPAMENTO	CLASSES de TEMPERATURA do equipamento permitidas para instalação
T1	T ignição gás > 450 °C	450 °C	T1 – T6
T2	T ignição gás > 300 °C	300 °C	T2 – T6
T3	T ignição gás > 200 °C	200 °C	T3 – T6
T4	T ignição gás > 135 °C	135 °C	T4 – T6
T5	T ignição gás > 100 °C	100 °C	T5 – T6
T6	T ignição gás > 85 °C	85 °C	T6

Tabela 2.5.3-3 Temperaturas máximas da superfície dos equipamentos (COBEI, 200-?, il).

A Temperatura Máxima de Superfície é a mais alta temperatura que o equipamento elétrico pode atingir quando em serviço, sob as mais adversas condições (porém dentro das tolerâncias), por qualquer parte ou superfície do equipamento, que seja capaz de provocar a ignição de uma atmosfera inflamável dentro da Área Classificada ao redor do equipamento. Por exemplo, um equipamento classificado como T3 pode ser utilizado em ambientes cujos gases possuem temperatura de combustão superior a 200°C.

Em locais sujeitos a emissões de gases explosivos e inflamáveis, as instalações elétricas e equipamentos tem de ser a prova de explosão (Ex-d).

2.5.4 Marcação de Equipamentos

No Brasil, um equipamento para áreas perigosas deve apresentar a marcação “Ex” cujo símbolo está ilustrado na Figura 2.5.4-1. A marca Ex significa que o equipamento é compatível com as exigências dos padrões europeus que estão harmonizadas com a Diretiva 94/9/EC - Diretiva ATEX, do francês "*ATmosphère EXplosible*").



Símbolo para placas de sinalização de áreas classificadas. Padrão DIN 40012-3 / 1984 e ATEX (CE)



Símbolo para identificação de equipamentos certificados para uso em atmosferas explosivas. Padrão DIN 40.012 3 / 1984 .

Figura 2.5.4-1 Símbolos de sinalização “Ex”.

Todos os equipamentos elétricos certificados possuem uma marcação que foi concedida no processo de certificação e que obedece a um padrão pré-definido. Alguns fabricantes afirmam "adequação" ou *built-to* à área de risco em seu material técnico mas, na verdade, a falta de certificação da agência de testes é inaceitável para a autoridade competente permitir a operação da instalação elétrica / sistema. Todos os

equipamentos certificados para uso em áreas perigosas devem ser marcados para mostrar o tipo e nível de proteção aplicado.

Na marcação do equipamento Ex deve constar o símbolo Ex, o tipo de proteção, o grupo de periculosidade do equipamento, a classe de temperatura e a temperatura máxima de superfície, além de outras identificações adicionais exigidas pela norma específica para o respectivo tipo de proteção e o número do certificado.

A Figura 2.5.4-2 exemplifica as aprovações para áreas perigosas para os quais a solução *Essential Insight.mesh*, do fabricante *Bentley Nevada*, foi projetada. Note que o fabricante informa as diretivas aplicadas na América do Norte (NEC), as aplicadas na Europa (também utilizados pelo Brasil) e a Internacional (IEC).

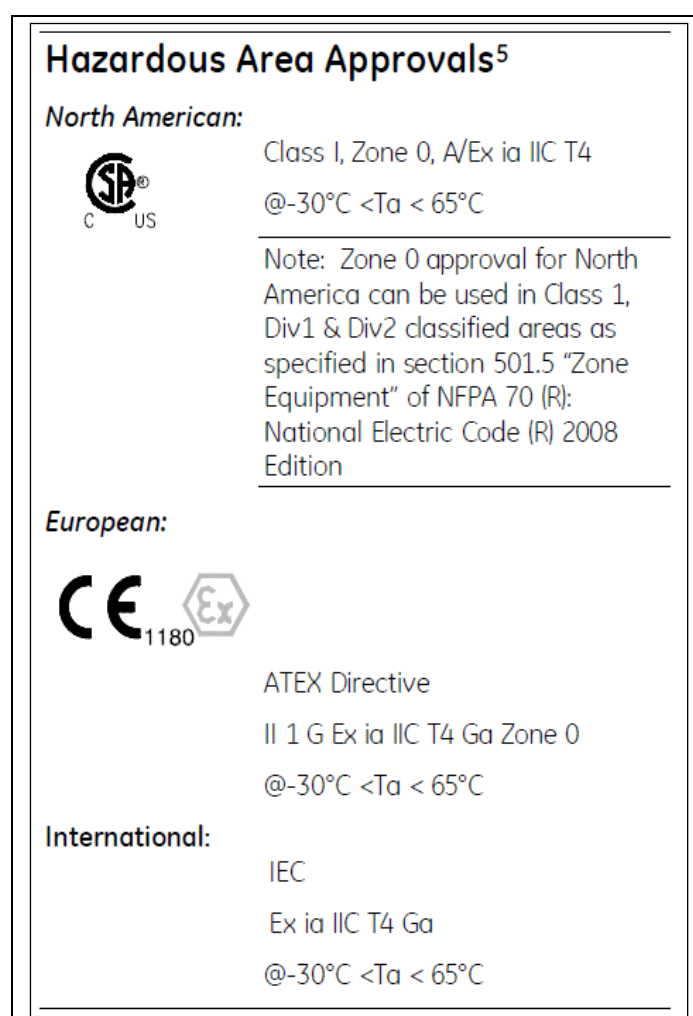


Figura 2.5.4-2 Exemplo de marcação de equipamento (BENTLEY, 2009-2010, p.9, il).

Os fabricantes devem fornecer instruções de instalações específicas, que devem ser seguidas para o equipamento para funcionar adequadamente, e para fornecer a proteção projetados na área classificada de acordo com marcação.

Quando um equipamento elétrico ou de instrumentação é marcado indicando que ele é adequado para um gás ou vapor particular, este não deve ser utilizado com outros gases ou vapores sem que uma completa avaliação de risco seja realizada por um profissional ou instituição competente e os resultados da avaliação mostrem que ele é adequado para tal utilização.

2.5.5 Instalações em Áreas Explosivas

A norma IEC 60079-14 prevê três métodos de instalação para o cabeamento dos instrumentos na área industrial:

- Conexão por eletrodutos (conexão direta) ao invólucro a prova de explosão;
- Sistema por cabos com conexão indireta ao compartimento à prova de explosão (Ex-d);
- Sistema por cabos com conexão direta ao compartimento à prova de explosão aumentada (Ex-a).

Sistema com eletrodutos:

Esta normalização só admite fiação contida em eletrodutos rígidos metálicos roscados (mais comum) ou na forma de cabos com isolamento mineral (cabo do tipo MI). Todas as conexões devem ter no mínimo cinco fios de rosca perfeitamente encaixados. Este método de instalação implica o uso de equipamentos Ex-d. Cada invólucro alojando um equipamento deve ser estanque com relação ao eletroduto de conexão, e isto é conseguido com uso de unidades seladoras. Unidades seladoras e drenos em áreas perigosas são essenciais para impedir que a pressão de uma explosão, num invólucro à prova de explosão, propague-se através dos eletrodutos conectados a ele.

Nesta instalação, os eletrodutos devem ser de aço, classe pesada, roscados, com ou sem costura, atendendo à ABNT NBR 5597. As unidades seladoras Ex-d devem ser instaladas no invólucro, na parede do invólucro ou o mais próximo possível dele, de forma a limitar os efeitos de precompressão e evitar a entrada de gases quentes no sistema de eletrodutos a partir de um invólucro contendo uma fonte de ignição. Ela deve ser selada com fibra e massa certificada. Unidades seladoras também devem ser instaladas de acordo com os critérios da fronteira entre zonas 1 e 2 e zonas 2 e área classificada.

Conexão direta de cabos:

Neste caso os cabos são introduzidos diretamente nos invólucros à prova de explosão através de um prensa-cabo também à prova de explosão. Os cabos e acessórios devem ser instalados, tanto quanto possível, em locais que não sejam expostos a danos mecânicos, à corrosão ou a influências químicas (por exemplo, solventes) e aos efeitos do calor. Quando a exposição desses sistemas a efeitos dessa natureza for inevitável, medidas de proteção, como a instalação em eletrodutos parciais, devem ser tomadas ou devem ser especificados cabos apropriados. Para minimizar o risco de danos mecânicos, por exemplo, devem ser utilizados cabos armados, com proteção metálica, com cobertura de alumínio sem costura, com cobertura de metal e com isolamento mineral ou cabos com coberturas semi-rígidas. O prensa-cabo que faz a conexão de cabos aos equipamentos elétricos deve ser feito de acordo com os requisitos do respectivo tipo de proteção. Por exemplo, se o equipamento for Ex-d, o prensa-cabo deve ser do mesmo tipo.

Conexão indireta de cabos:

Neste sistema os cabos são conectados indiretamente ao compartimento à prova de explosão. Esse sistema baseia-se no emprego de equipamentos “Ex-d e”, ou seja, que combinam em sua concepção as técnicas de proteção à prova de explosão (Ex-d) e de segurança aumentada (Ex-e). O compartimento Ex-e dispensa o emprego cabeamento confinado em eletrodutos. Assim, o invólucro que contém o dispositivo de manobra é dividido em duas partes: o compartimento à prova de explosão, propriamente dito, e que contém apenas as partes do aparelho passíveis de produzir centelha, arco ou

faísca (como a bobina e contatos de um contator, por exemplo); e outro compartimento, basicamente contendo a caixa de ligação, do tipo segurança aumentada (Ex-e).

Os cabos, do tipo industrial comum, são introduzidos através de prensa-cabo também comuns no compartimento Ex-e. Entre este compartimento e o Ex-d, existem buchas passantes, que já vêm moldadas de fábrica. Do lado Ex-e, os terminais das buchas obedecem às normas específicas da técnica de segurança aumentada. Entre si, os terminais devem obedecer às distâncias mínimas de isolamento e não devem sofrer afrouxamento. Do outro lado das buchas, já dentro do compartimento Ex-d, é conectado o dispositivo.

O custo dos sistemas de eletrodutos com unidades seladoras é bastante alto. Uma alternativa é utilizar equipamentos com segurança aumentada Ex e ou Equipamentos de Segurança Intrínseca Ex-i, ou outros tipos normalizados, que apresentam o mesmo grau de segurança mas com custo relativamente mais baixo.

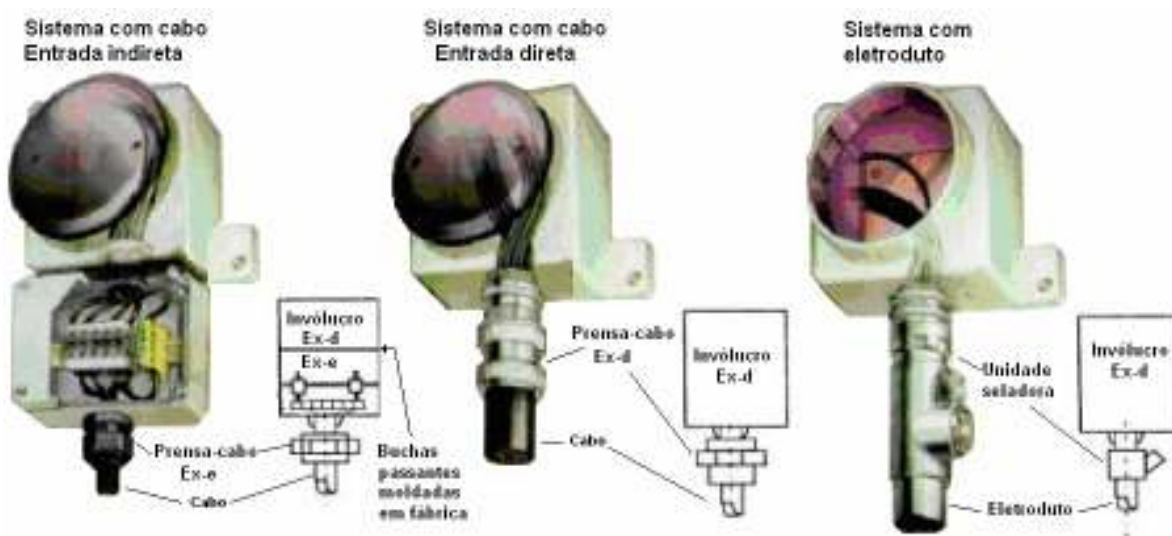


Figura 2.5.5-1 Tipos de entradas em cabos em invólucros conforme a norma IEC.

Instalação de circuitos intrinsecamente seguros:

Nos outros tipos de instalações, toma-se o devido cuidado para confinar a energia elétrica no sistema instalado de forma que uma área classificada não possa ser inflamada. No circuito intrinsecamente seguro, protege-se-o da entrada de energia de outras fontes elétricas, de forma a limitar a energia no circuito para que ela não seja

excedida, mesmo se ocorrer aberturas de circuitos, curtos-circuitos ou ligação à terra do circuito.

As instalações com circuitos intrinsecamente seguros devem ser instaladas de tal modo que sua segurança intrínseca não seja afetada por campos elétricos e magnéticos externos, tais como a proximidade de linhas aéreas de potência ou cabos unipolares conduzindo elevada corrente. Os cabos intrinsecamente seguros que fazem parte de circuitos intrinsecamente seguros devem ser marcados para identificá-los como parte de um circuito de segurança intrínseca.

3 ESTUDO DE CASO

As vantagens da aplicação de redes de instrumentação industrial *wireless* são claras e de rápida aceitação pelos operadores, engenheiros e corpo executivo das indústrias devido ao seu potencial de facilitar a instalação e manutenção, bem como na economia de custos em cabeamento e manutenção. Entretanto, quando se fala em segurança operacional em uma planta industrial, o uso de tecnologias *wireless* é visto com certa reserva pelos profissionais de operação e técnicos em instrumentação, pois, os processos industriais, quando mal conduzidos, implicam em riscos ambientais, humanos e materiais, dentre outras consequências.

Visando estimar quais são as perspectivas no momento para o emprego de redes sem fio no campo da Automação Industrial foram levantados e avaliados neste trabalho alguns aspectos tecnológicos, econômicos e de aplicação, a saber:

- prospecção dos fabricantes de solução wireless baseada no padrão aberto IEEE 802.15.4 para automação na indústria de processos e suas expectativas quanto à tecnologia em questão;
- estimativa de custos de uma rede wireless para automação de processo;
- prospecção do grau de aceitação do corpo técnico para a tecnologia IEEE 802.15.4 em uma unidade industrial de processo atuante no Brasil e
- análise de aspectos de consumo das baterias de alimentação dos dispositivos de campo.

As metodologias adotadas para atingir os objetivos específicos deste trabalho estão apresentadas a seguir.

3.1 PROSPECÇÃO DOS FABRICANTES DE SOLUÇÕES WIRELESS IEEE 802.15.4 E SUAS EXPECTATIVAS NO BRASIL

Para identificar os fabricantes que possuem soluções de rede *wireless* baseadas no padrão IEEE 802.15.4 foram pesquisados vários fabricantes que atuam na área de automação e controle em nível mundial. Após, foram identificados quais deles já possuem equipamentos homologados na ANATEL com a finalidade de obter uma estimativa da expectativa da venda de sistemas IEEE 802.15.4 para a indústria de processos no Brasil. Os resultados obtidos para este item estão apresentados no item 4.1.

3.2 ESTIMATIVA DE CUSTOS DA REDE WIRELESS EM ÁREAS CLASSIFICADAS

Em vários artigos são mencionadas as vantagens da economia de custos da aplicação de uma rede *wireless* em detrimento da convencional rede de instrumentos cabeada. Foram selecionados, no site da Revista Controle e Automação, dez artigos que mencionavam a economia de custos de instalação e manutenção da aplicação de soluções *wireless* IEEE 802.15.4 na indústria de processo. O resultado está apresentado na tabelas do APÊNDICE 4. Dos artigos, apenas um dá alguma quantificação da economia de custos, que é o caso de uma Refinaria na América do Norte, na área de Operação de calcinação para coque (Fonte1), no qual afirma-se ter havido uma economia de 90%, tendo sido mencionado que o custo de instalação por ponto cabeado ficou entre U\$ 8,000 a U\$ 15,000, incluindo a engenharia, o projeto elétrico e de comunicação, a instalação e os materiais mas exclui o custo dos instrumentos. Já para um ponto sensor sem fio o custo informado foi de U\$ 1,000.

Não foram feitas estimativas de redução de custos para a manutenção visto que a quantidade de variáveis é ainda maior do que para a estimativa de custos de implementação.

Neste item, buscou-se fazer uma simulação de custos entre os dois tipos de rede – cabeada e *wireless* no Brasil. As **premissas adotadas** para estas simulações estão listadas a seguir:

Fontes de consultas de preços:

- Consulta a contratos de materiais e serviços, somente os pertinentes ao ano de 2011, publicados no *website* da empresa brasileira Petrobrás <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/transparencia-publica/> em atendimento às exigências legais dos Decretos 5.481 e 5.482, de 30 de junho de 2005, da Presidência da República, Lei no 9755, de 16/12/1998, Instrução Normativa TCU no 28, de 05/05/1999, Ofício Circular no 04/99 - TCU/SEGECEX, de 14/06/1999.
- Lista de preços disponíveis em *sites* da Internet, tanto brasileiros quanto estrangeiros.

Estimativa dos preços:

- Após a obtenção do maior número possível de preços para um determinado item, foram adaptados os valores para o Brasil (inclusão de impostos) e conversão de moeda (taxa de dólar de R\$ 1 = US\$1,75), foi adotada a média destes preços para cada item.
- Todos os equipamentos são Ex-d.

Rede cabeada:

- Rede com topologia em estrela (ou em árvore, conforme mostrado na Figura 3.2-1.
- Distância média de cabeamento: variando de 5 a 100m.
- Foi considerada a instalação 100% em área classificada, sendo instalação com eletrodutos individuais para todos os instrumentos/sensores.

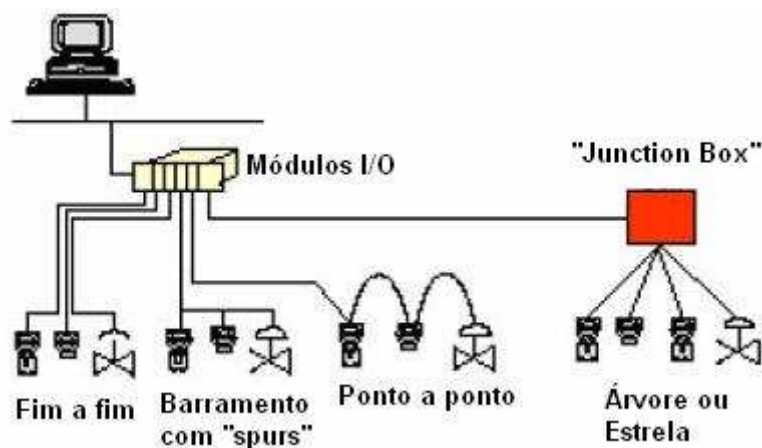


Figura 3.2-1 Topologias físicas *Fieldbus* para a rede cabeada (SILVA *et al.*, 2006, il).

- Quantidade de transmissores cabeados: variando de 5 até 100 (com passos de 5).
- Tipos de transmissores *wireless*: 50% transmissores de pressão + 50% transmissores de temperatura.
- Consulta dos preços nos contratos de materiais em *sites* da rede Internet, sendo considerado o valor dos equipamentos em dólar e taxas de impostos de 40% no caso de materiais importados.
- Protocolo padrão de redes de campo *Fieldbus* Foundation (FF). O *Fieldbus* baseia-se no modelo ISO, porém não contém todos os seus níveis. Ele é dividido em dois níveis principais: Físico (interligação entre os instrumentos e equipamentos) e *Software* (trata das formas de comunicação entre os equipamentos). O *Fieldbus* é um protocolo desenvolvido para automação de Sistemas de Fabricação, elaborado pela *Fieldbus* Foundation e normalizado pela ISA. O protocolo *Fieldbus* visa a interligação de instrumentos e equipamentos, possibilitando o controle e monitoração dos processos.
- Não foi considerado custo de *Software* Supervisório (SCADA, por exemplo) que gerencia e supervisiona a aquisição, visualização de dados e status de equipamentos da rede industrial. Assumiu-se que o empresa já o tem.
- Caixas a prova de explosão (Ex-d), prensa-cabos Ex-d e uso de selantes.
- Eletrodutos com 2 curvas.
- Serviços: projeto, instalação da infraestrutura, cabos e instrumentos.
- Custo de conexão de aterramento (condutor e conector) em 2 pontos para cada instalação, no local mais próximo da malha de aterramento da planta.

Rede *wireless*:

- Rede com topologia em estrela.
- Quantidade de transmissores *wireless*: variando de 5 até 100 (com passos de 5).
- Tipos de transmissores *wireless*: 50% transmissores de pressão + 50% transmissores de temperatura.
- Quantidade de *gateway*: 1
- Custo do *Software*: média de preços de *softwares* especializados e similares obtidos no *website* da Petrobras (com impostos).
- Bateria do sensor: foi considerado somente 1 bateria para cada equipamento (não foi estimado baterias reserva). O preço da bateria foi obtido no site da Petrobras (Bateria da Emerson).
- Não foi considerado custo de licença para rede *wireless* pois este é um custo de manutenção.
- Preço do *Gateway*: média dos preços de *gateway* da Emerson (obtido no site da Petrobras) e da National Instruments, em seu próprio site.
- Preço unitário do transmissor/sensor *wireless* de pressão: média dos preços de transmissores de temperatura da Emerson (obtido no site da Petrobras)
- Preço unitário do transmissor/sensor *wireless* de temperatura: média dos preços de transmissores de temperatura da Emerson (obtido no site da Petrobras) e da *National Instruments*, em seu próprio site.
- Serviços: projeto, *site survey*, instalação do *gateway* e dos sensores (não inclui preço dos equipamentos).

Os resultados obtidos para este item estão apresentados no item 4.2.

3.3 PROSPECÇÃO DA ACEITAÇÃO DA TECNOLOGIA IEEE 802.15.4 EM AUTOMAÇÃO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL DE PROCESSO DO BRASIL

A metodologia utilizada para obter um diagnóstico da possibilidade de uso de redes 802.15.4 no Brasil consistiu de entrevistas junto à força de trabalho num total de 28 profissionais, englobando operadores e técnicos em instrumentação de uma planta

industrial de processo de produtos combustíveis no Brasil. Esta prospecção baseou-se no questionário apresentado no APÊNDICE 1 composto de 13 perguntas, das quais 3 foram eliminadas ao longo das entrevistas, por mostrarem-se não conclusivas.

No questionário em questão, as duas primeiras questões mapeiam o grau de experiência do profissional na área de automação (de processo ou não) e o grau de conhecimento da tecnologia 802.15.4 na indústria de processo assim como seu grau de aceitação.

Categoria	Classe	Aplicação	Descrição
Segurança	0	Ação emergencial	Sempre crítico
Controle	1	Controle em malha fechada regulatório	Frequentemente crítico.
	2	Controle em malha fechada supervisório.	Usualmente não crítico
	3	Controle em malha aberta	Humano na malha. Operador toma ação e controle o atuador
Monitoramento	4	Alerta	Consequência operacional de curto prazo (manutenção baseada em evento)
	5	Logs de arquivos e “downloading/ uploading”	Consequência operacional não imediata (coleta de histórico, evento de sequência, manutenção preventiva)

Tabela 3.3-1 Classificação conforme comitê ISA-100.11a.

As questões de 3 a 8 versam sobre qual(is) aplicação(ões) o entrevistado aceitaria utilizar ou não instrumentação *wireless*. Estas basearam-se na classificação do comitê ISA-100.11a reproduzidas aqui na Tabela 3.3-1. Como esta tabela está disposta da aplicação “mais crítica para a menos crítica”, pode-se através dela obter o nível no qual a tecnologia 802.15.4 terá chance de ser aplicada em curto prazo (definido aqui como até 3 anos).

A pergunta 9 (sobre gases inflamáveis) foi escolhida por se apresentar de especial importância, pois diz respeito à prevenção de emergências através do uso de detectores de gás/vapor inflamáveis ou tóxico.

Durante a entrevista, a grande maioria dos entrevistados emitiu opiniões sobre a tecnologia em questão, e estas foram organizadas na questão 13 que trata da percepção do profissional. Cabe destacar que este questionário avalia a questão *wireless* em automação de processo de forma objetiva e subjetiva, não havendo

qualquer direcionamento para separar um do outro. Os resultados obtidos para este item estão apresentados no item 4.3.

Os conceitos de aplicação da Tabela 3.3-1 estão detalhados no APÊNDICE 2.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE BATERIAS DOS DISPOSITIVOS DE CAMPO

Por serem fontes limitadas e não recarregáveis e, portanto, uma abordagem sobre as baterias dos dispositivos de campo faz-se essencial. Os principais fatores que influenciam o consumo da bateria dos dispositivos de campo IEEE 802.15.4 são:

Quantidade de comunicações (*throughput dos dados*): quanto maior a quantidade de dispositivos com os quais um transceptor se comunica maior é o gasto de energia de sua bateria.

Quantidade de saltos (*hopping*) na rede *mesh*: a rede com topologia *mesh* tem maior disponibilidade, porém, ao realizar mais saltos entre nós, seus dispositivos consomem mais bateria [BABB, 2010]. Já nas redes estrela, como os sensores comunicam-se diretamente com o *gateway* (não precisam saltar de um nó para outro), o uso da bateria é menor. A rede estrela também é mais rápida (TANTUBAY & SHARMA, 2011).

Frequência da coleta de dados pelos sensores: se a variável a ser mensurada for de variação lenta, o período de coleta pode ser grande, o que significa maior tempo de repouso do dispositivo *wireless* e, conseqüentemente, menor consumo da bateria. Já uma variável de variação rápida, exige medições mais frequentes, o que consome rapidamente a carga da bateria.

Modo de Transmissão: no modo de transmissão, o dispositivo *wireless* consome mais potência do que no modo recepção. Controlar a potência de transmissão exigida pelos rádios é, portanto, uma forma de economizar energia na comunicação dos nós (TANTUBAY & SHARMA, 2011). No padrão IEEE 802.15.4, o LQI (*Link Quality Indicator*) caracteriza a qualidade (intensidade) de recepção de um pacote, cujo valor é calculado na camada física. A medida de LQI é desempenhada para cada pacote

recebido e o resultado é reportado para a subcamada MAC como um valor inteiro dentro da faixa de 0 a 255, sendo o valor mínimo 0 associado à mais baixa, e, o máximo 255, à mais alta qualidade de sinal detectado pelo receptor. O valor de LQI sempre varia entre estes dois limites.

Temperatura de operação ambiental: as baterias tem desempenhos diferentes de acordo com a temperatura nas quais elas irão operar. Elas operam com desempenho máximo na temperatura para a qual foram projetadas, em geral 20°C a 25°C. Acima e abaixo deste valor, o consumo da bateria é mais rápido.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 FABRICANTES DE SOLUÇÕES WIRELESS IEEE 802.15.4 E SUAS EXPECTATIVAS NO BRASIL

A partir de uma lista de fabricantes internacionais ligados a Automação Industrial, em (SIMON & KOO PAN, 2008), prospectou-se quais fornecem soluções *wireless* IEEE 802.15.4 em seus *websites*. Foram consultados também os principais fabricantes nacionais, também em (SIMON & KOO PAN, 2008), tais como Atos, BCM, Coester, Novus, Presys e Sense, porém nenhum deles possui solução *wireless* IEEE 802.15.4. Com a listagem dos fabricantes com soluções *wireless* para automação industrial, consultou-se no *website* da ANATEL (até metade ano 2011), no sistema interativo SGCH - Sistema de Gestão de Certificação e Homologação - os produtos classificados como “Transceptores de radiação Restrita” com a característica de interface IEEE 802.15.4 (DSSS, 2,4GHz e 250kbps).

O resultado está na Tabela 4.1-1 que identifica quais são os fabricantes e suas soluções *wireless* padrão IEEE 802.15.4, podendo ser WiHart (padrão criado pela Emerson/Rosemount), ISA100.11a – 2009 ou WIA-PA (padrão chinês). Não foi identificado fabricante com produto baseado em WIA-PA. Alguns fabricantes não mencionaram se seus produtos eram baseados no WiHart ou no ISA100.11a, embora apresentassem a característica de interface RF 802.15.4. Estes aparecem aqui como “não identificados” (não WiHart nem ISA100.11a). A última coluna desta Tabela mostra os fabricantes que já possuem suas soluções homologadas na ANATEL. O Gráfico 4.1-1 ilustra percentualmente a adoção das tecnologias IEEE 802.15.4 adotadas pelos fabricantes.

Foram pesquisados 14 fabricantes, dos quais, 11 apresentavam solução IEEE 802.15.4. Os outros 3 fabricantes foram:

- *Banner*: sua solução *Surewireless network* D80 2,4GHz não menciona qual é o padrão;

- *Rockwell Automation*: em parceria com a Cisco fornece um solução IEEE 802.11n compatível com padrão IEEE 802.15.1/*Bluetooth* que não é LR-WPAN;
- *Schneider*: tem foco em automação residencial e predial apresentando soluções simples de telemetria local e *push button* sem fio.

Id.	Fabricante	Solução LR-WPAN	Características	ANATEL
1	ABB Group	<i>wirelessHART</i>	IEEE 802.15.4 WiHart	Não tem.
2	Emerson Rosemount	Smart <i>wireless wirelessHART</i>	IEEE 802.15.4 WiHart	8 Emerson, 4 Rosemount (sensor, adaptador, link campo e <i>gateway</i>)
3	Endress+Hauser	Endress+Hauser <i>wirelessHART</i>	IEEE 802.15.4 WiHart	Não tem.
4	Invensys Foxboro / Pepperl+Fuchs	<i>wirelessHART</i>	IEEE 802.15.4 WiHart	Não tem
5	Pepperl+Fuchs	<i>wirelessHART</i>	IEEE 802.15.4 WiHart	3 sensores, 1 adaptador e 1 <i>gateway</i> .
6	Siemens	<i>wirelessHART</i>	IEEE 802.15.4 WiHart	1 sensor, 1 <i>field link</i>
7	GE Electric Company	<i>Essential Insight.mesh wSIM / Bently Nevada</i>	IEEE 802.15.4 (for future support of ISA100.11a)	1 <i>gateway</i> e 1 repetidor
8	<i>National Instruments</i>	<i>NI wireless sensor network (WSN) platform</i>	IEEE 802.15.4 250 kbit/s 2.4 GHz DSSS O-QPSK (Não especifica que seja ISA100.11a)	Não tem
9	Gastronics	<i>True wireless® Hazardous ISA100.11a 2.4GHz MESH</i>	Sensor detector de gases, interoperável com rede IEEE 802.15.4 ISA100.11a	Não tem.
10	Honeywell	<i>Onewireless Network</i>	IEEE 802.15.4 ISA100.11a	Não tem.
11	Yokogawa	ISA100.11a	IEEE 802.15.4 ISA100.11a	2 sensores e 1 <i>gateway</i> .

Tabela 4.1-1 Solução *wireless* dos principais fabricantes baseadas no padrão 802.15.4-2006.

Embora o fabricante Gastronics não apresente uma solução *wireless* 802.15.4 completa, ele foi considerado devido à característica impar de seu produto - padrão 802.15.4 da ISA.11a – de efetuar medições de gases.

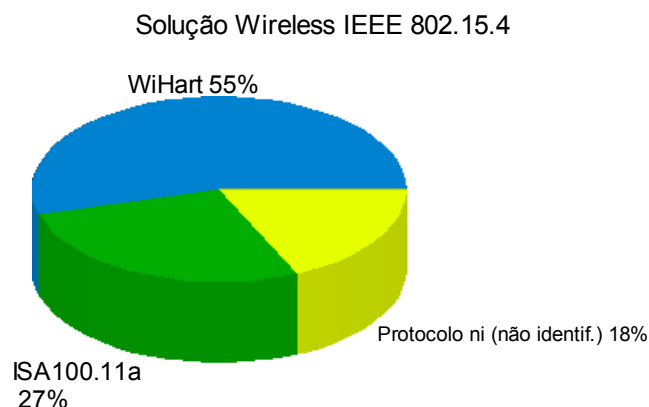


Gráfico 4.1-1 Soluções IEEE 802.15.4 e padrões de fabricantes.

A Tabela 4.1-2 assim como o Gráfico 4.1-2 mostra estatisticamente os fabricantes que já investiram em testes, certificação e homologação de seus equipamentos de radiação restrita junto à ANATEL. A título de informação, consultou-se várias OCD no Brasil (APÊNDICE 5) para estimar o desembolso com a certificação e a homologação de equipamentos de radiação restrita aqui estudados. O custo da Homologação ANATEL é R\$ 500,00 (Outubro 2011) enquanto que o desembolso para a Certificação de um equipamento de radiação restrita apresenta-se numa média de R\$ 5.602,78.

Padrão 802.15.4	Fabricantes com solução wireless IEEE 802.15.4			Fabricantes com equipamento homologado na ANATEL		
	Número	Fabricantes	[%]	Número	Fabricantes	[%]
WiHart	6	Emerson/Rosemount, Pepperl+Fuchs, Siemens, Invensys Foxboro, ABB e Endress+Hauser	54,55%	3	Emerson, Pepperl+Fuchs e Siemens.	27,27%
ISA100.11a	3	Yokogawa, Honeywell e Gastronics.	27,27%	1	Yokogawa.	9,09%
não identificado	2	GE/Bentley Nevada e National Instruments.	18,18%	1	GE/Bentley Nevada	9,09%
WIA-PA	0		0,00%	0		0,00%
Total =>	11		100,00%			45,45%

Tabela 4.1-2 Fabricantes com equipamentos homologados na ANATEL.

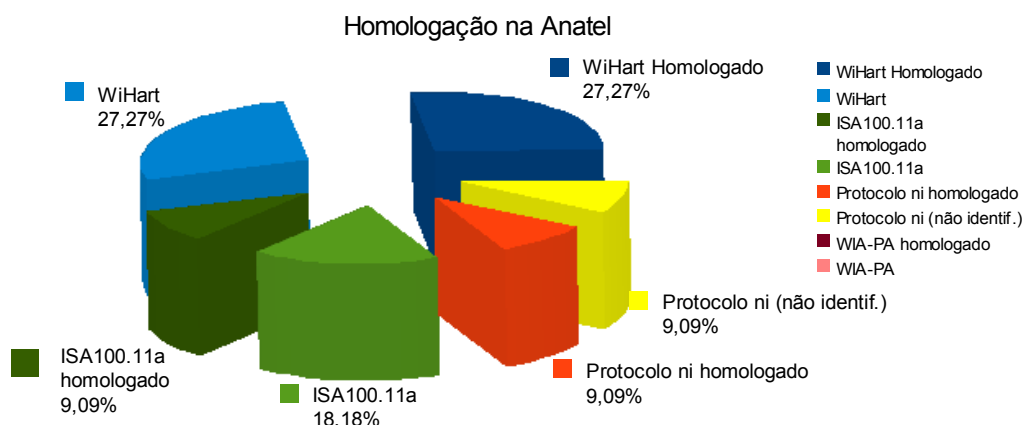


Gráfico 4.1-2 Soluções IEEE 802.15.4 de fabricantes com equipamentos homologados.

O protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) foi desenvolvido pela HART *Communication Foundation* (HCF), tendo sido o primeiro a permitir a configuração dos dispositivos industriais de campo "smart" 4-20 mA. Como a base legada de dispositivos de campo 4-20 mA era bastante grande (85%) (HART, 2011) na época, o HART ganhou um grande mercado nas rede *fieldbus*. Como o WiHart é uma derivação do HART, a maior parte dos fornecedores optou por incorporar este protocolo em suas soluções 802.15.4.

A inexpressividade do padrão chinês nesta pesquisa não significa que ele não tenha importância. Ele só não aparece, por ora, com vantagem competitiva. Cabe destacar aqui o comentário de um especialista, no artigo "Protocolos de comunicação" da Revista Controle & Instrumentação (PROTOCOLOS..., 2010):

"No caso do novo *wireless* chinês, seu peso é que os fornecedores terão que incluí-lo no portfólio para atender o mercado chinês – extrapolar isso ainda não. A China ainda não tem força como fornecedora, mas tem como compradora. O bom disso é que a *Hart Foundation* já está montando laboratório na China para trabalhar em conjunto com o instituto chinês responsável pela norma daquele país."

Em relação à pesquisa junto à ANATEL, pode-se perceber um mercado polarizado no qual aproximadamente metade está otimista (e já investiu em homologação) e metade está sendo prudente, preferindo esperar. Em termos de custo, na verdade, o desembolso com certificação e homologação não chega a pesar para estas empresas

de grande porte e abrangência global. Em média, o gasto das empresas que já homologaram seus equipamentos é de R\$ 6.102,78 (custo de certificação da OCD e taxa de homologação da ANATEL) para cada equipamento. Como os sistemas constituem-se basicamente de três tipos de dispositivos (sensor, *gateway* e adaptador), o total médio de desembolso de cada empresa é de R\$ 18.308,34 (3 x R\$ 6.102,78).

4.2 ESTIMATIVA DE CUSTOS DA REDE WIRELESS EM ÁREAS CLASSIFICADAS

Visando uma estimativa mais próxima do quanto pode ser a economia de custos da rede *wireless* 802.15.4 aplicada à indústria de processos brasileira, foi feita a suposição de uma rede específica assumindo-se as premissas listadas no item 3.2. Com base nestes dados e pesquisando-se preços de mercado para materiais e equipamentos foram obtidos os gráficos mostrados no item 4.2.

Para a rede cabeada foi escolhida a instalação de sistema por eletrodutos considerando-se uma rede 100% localizada em área classificada. Os serviços de instalação de infraestrutura significam somente os custos com materiais e serviços, o que inclui o serviço de instalação do dispositivo mas sem contabilizar o custo do dispositivo em si.

A Figura 4.2-1 e Figura 4.2-2 ilustram os materiais adotados para um ponto sensor na simulação para as duas situações, a cabeada e a *wireless*.

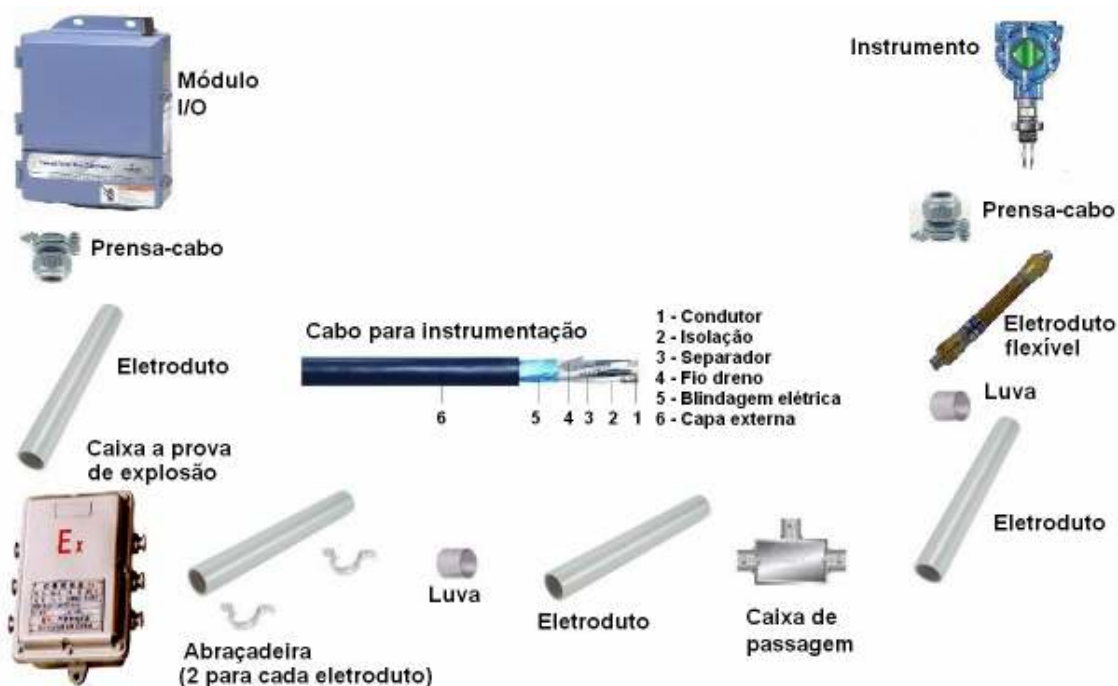


Figura 4.2-1 Materiais utilizados na configuração de um instrumento em rede cabeada.



Figura 4.2-2 Materiais utilizados na configuração de um instrumento em rede cabeada.

Para a rede cabeada foram considerados os preços listados na Tabela 4.2-1. Foi considerada uma rede cabeada com 100 nós sensores em campo, em protocolo *Fieldbus*, topologia física em estrela, composta de 50% transmissores de pressão TP e 50% de transmissores de temperatura TT. Foram obtidas várias linhas de gráfico, variando-se a distância média dos cabos (entre 5 e 55m) e o número de instrumentos na rede (de 5 a 100).

Rede Cabeada		
d [m]	varia de 5 a 100	Distância
Projeto	R\$ 38,17	Elaboração de projeto e documentação por nó
Infra + cabos	Função distância	Eletroduto Alumínio + acessórios + cabos por nó
TP	R\$ 2.209,09	Custo unitário do Instrumento de pressão
TT	R\$ 739,53	Custo unitário do Instrumento de Temperatura
N	varia de 1 a 100	Quantidade de instrumentos cabeados
Serviço instalação	R\$ 280,00	8 horas / 1 pessoa / 100 metros cabo / Instrumento
Custo total = [Projeto + Infra+cabos+TP+serviço] x N		

Tabela 4.2-1 Valores para cálculo da rede cabeada.

Para a rede *wireless* foram considerados os preços listados na Tabela 4.2-2. Foi considerada uma rede *wireless* com 100 nós sensores em campo (sem contar com o *gateway*), considerando-se três situações:

- 100% transmissores de temperatura (TWT);
- 50% transmissores de pressão (TWP) e 50% de transmissores de temperatura (TWT);
- 100% transmissores de pressão (TWP).

Foram obtidas três linhas de gráfico, variando-se o número total de nós sensores na rede (de 5 a 100).

Rede Wireless		
	máximo 100m	Espaçamento gateway e instrumento (alcance 802.15.4)
Projeto	R\$ 38,17	Elaboração de projeto e documentação
GW	R\$ 4.736,62	Custo de um Gateway
SW	R\$ 16.646,53	Custo do software da rede wireless
TWP	R\$ 4.962,20	Custo unitário do Instrumento wireless medidor de pressão
TWT	R\$ 2.261,56	Custo unitário do Instrumento wireless medidor de temperatura
B	R\$ 388,46	Custo unitário da bateria
N	varia 5 a 100	Quantidade de instrumentos wireless
Serviço instalação	R\$ 120,00	Medida de sinal RF (Site Survey) e instalação por ponto
Custo total =GW + SW + (Projeto + TWP + B + Serviço) x N		

Tabela 4.2-2 Valores para cálculo da rede *wireless* 802.15.4.

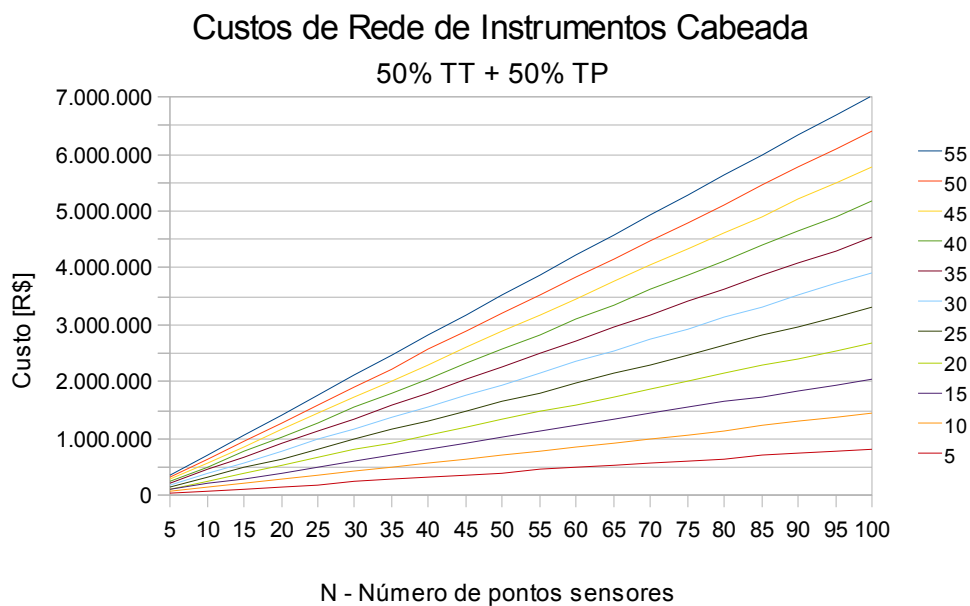


Gráfico 4.2-1 Custos da rede cabeada 50% TP e 50% TT.

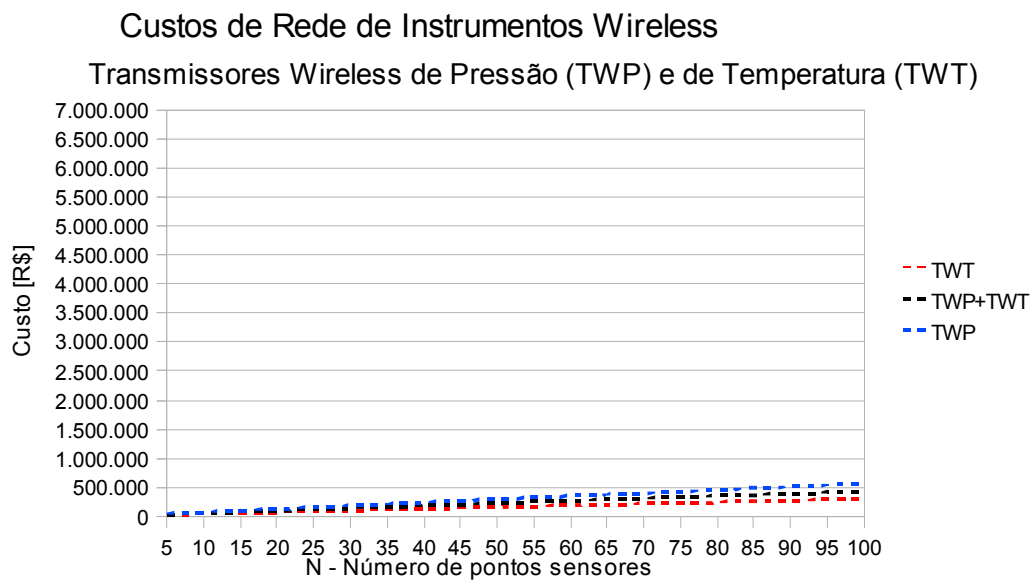


Gráfico 4.2-2 Custos de instalação de rede *wireless* com 100%TWP, 100%TWT e 50%TWP+50%TWT.

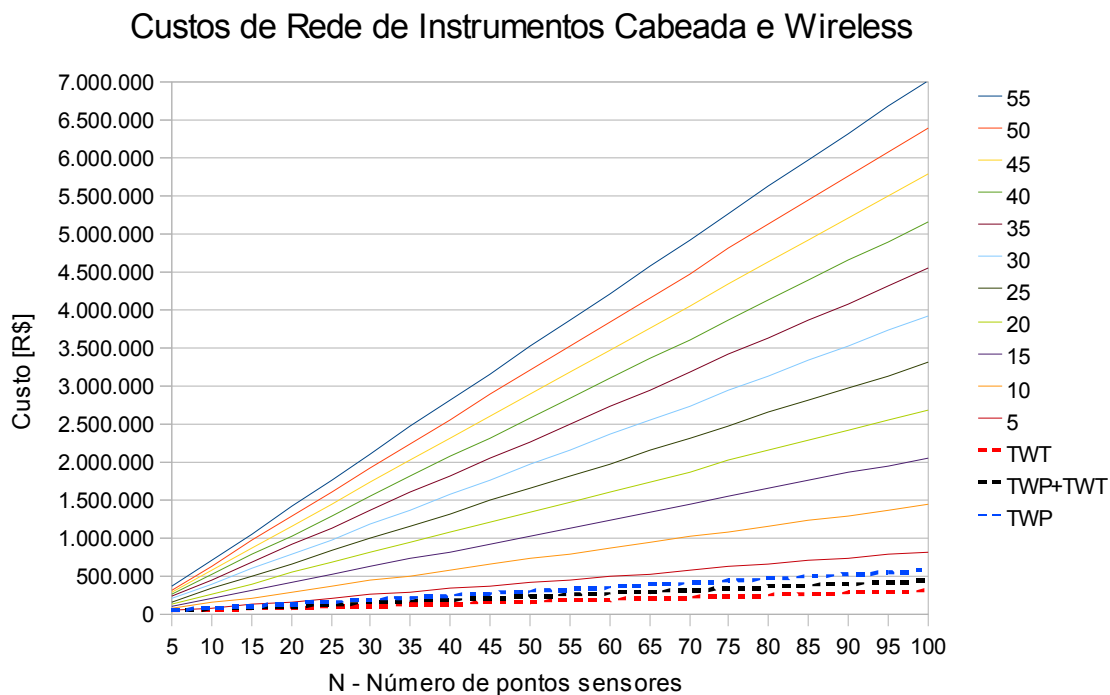


Gráfico 4.2-3 Comparação dos custos de instalação de rede *wireless* e rede cabeada.

Porém, dentro do quadro simulado e com as condições levantadas, temos a seguinte avaliação da porcentagem de economia com a implementação da rede *wireless* IEEE 802.15.4 versus a rede convencional cabeada. Dos dados do Gráfico 4.2-3, retiraram-se os seguintes pontos:

Quantidade de nós sensores	Rede cabeada		Rede Wireless	Relação C/W
	Distância média dos nós sensores	Custo C	Custo W	
5	5m	R\$ 40.998,25	R\$ 42.175,65	97,21%
100	55m	R\$ 7.021.716,61	R\$ 437.233,29	1605,94%
5	10m	R\$ 72.095,83	R\$ 42.175,65	170,94%
10	5m	R\$ 81.996,50	R\$ 62.968,16	130,22%

Tabela 4.2-3 Relação de custos das redes simuladas cabeada versus *wireless* IEEE 802.15.4.

Somente na condição com 5 sensores, com média de 5m de distância sensor-PLC não compensa substituir por rede *wireless* IEEE 802.15.4. Nesta condição a rede *wireless* custou aproximadamente 3% a mais do que a rede cabeada. Já nas condições acima

a rede *wireless* apresentou no mínimo uma vantagem de 30% de economia de custos. A partir daí a economia apresentou-se cada vez mais vantajosa.

Os valores obtidos não podem ser comparados na sua totalidade com o caso da Refinaria da América do Norte pois são exemplos diferentes. As informações não são suficientes para que fosse feita uma simulação de situação similar.

Os custos apresentados na Tabela 4.2-3 consideram todos os custos de implementação das redes (inclui custos de equipamentos e projeto), conforme apresentado nas premissas. Entretanto, separando-se somente os serviços e materiais para ambas as redes pode-se fazer uma comparação dos custos por metro (no caso da rede cabeada) ou por ponto sensor (rede *wireless*) em relação ao caso da Refinaria na América do Norte.

Condição	Preço	Brasil	EUA (média)
Somente serviços, inclusive projeto. Não considera preço do instrumento.	Por metro cabeado	R\$ 1.281,44	\$11.500,00
Projeto, site survey, instalação do gateway e dos sensores. Não considera preço do instrumento.	Por ponto wireless	R\$ 120,00	\$1.000,00
		9,36%	8,70%

Tabela 4.2-4 Relação de custos de serviços de rede cabeada e wireless conforme estudo apresentado em fonte 1 no APÊNDICE 4.

Pela Tabela 4.2-4 a relação de custo para o caso brasileiro corrobora a relação de custo do caso americano. Estima-se que o valor unitário por metro (rede cabeada) e por ponto sensor (rede *wireless*) muito maior seja consequência da mão de obra ser bem mais cara nos países norte-americanos do que no Brasil.

4.3 ACEITAÇÃO DA TECNOLOGIA IEEE 802.15.4 EM AUTOMAÇÃO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL DE PROCESSO NO BRASIL

Os resultados deste item estão apresentados na mesma ordem das perguntas do questionário.

Experiência prática em Automação (pergunta 1):

A média de tempo de atuação na área de aproximadamente 15 anos indicou um grupo cuja maioria apresenta experiência bastante significativa em Automação.

O Gráfico 4.3-1 evidencia a existência de duas gerações que aqui foram chamadas de “experientes” (64%) e “menos experientes” (36%) em razão de uma lacuna de representantes com tempo de experiência entre 10 e 16 anos. A média de tempo do grupo experiente apresentou-se excepcionalmente alta, aproximadamente 20 anos, enquanto que o tempo do grupo menos experiente ficou em torno de 6 anos.

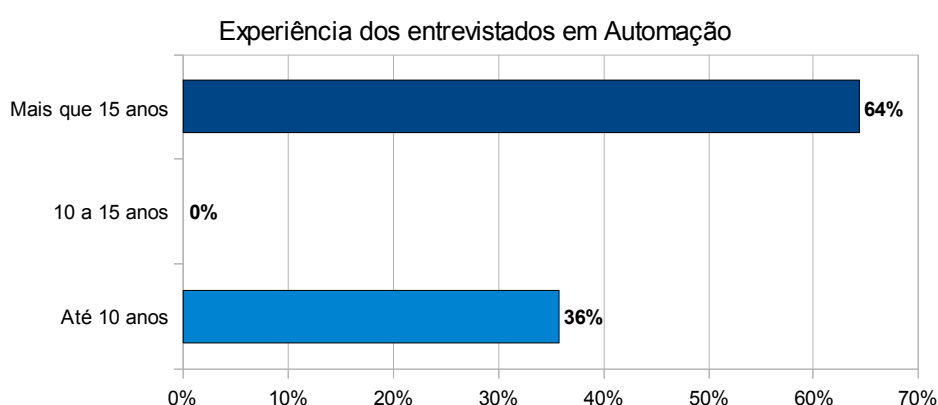


Gráfico 4.3-1 Experiência em automação dos entrevistados.

Aceitação da tecnologia IEEE 802.15.4 na planta Industrial (pergunta 2):

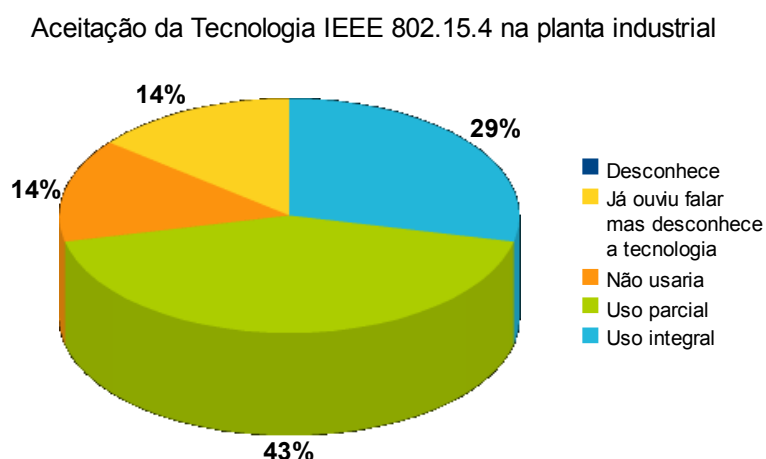


Gráfico 4.3-2 Aceitação do uso de redes IEEE 802.15.4 na industria de processos.

A perspectiva da tecnologia *wireless* para automação é boa, considerando-se que uma grande maioria do grupo entrevistado aceita integral (29%) ou parcialmente seu uso

(43%), conforme mostrado no Gráfico 4.3-2. A grande expressividade da aceitação parcial já era esperada, indicando prudência no uso deste tipo de rede.

Nível de aceitação da tecnologia IEEE 802.15.4 na planta Industrial (perguntas 3 a 8):

Neste tópico, percebe-se que para as aplicações de Controle (Segurança / ação emergencial) o grupo tende a não aceitar a tecnologia. Já para os níveis de Controle (Malha Fechada e Malha Aberta) as porcentagens ultrapassaram os 50%, enquanto que para os níveis de Monitoramento, a tecnologia tem aceitação quase que total. Considerando as duas primeiras colunas do Gráfico 4.3-3 (em porcentagens de “sim” e “não” simétricas) pode-se situar o grau de aceitação mais seguramente a partir de Controle de Malha Fechada Supervisório.

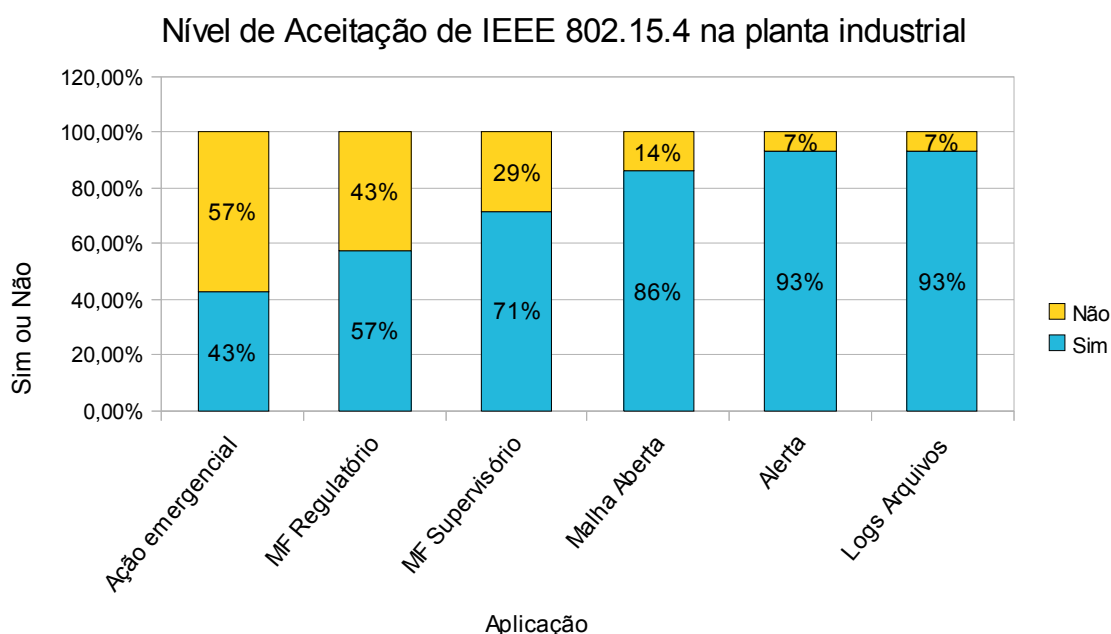


Gráfico 4.3-3 Nível de aceitação do uso de redes IEEE 802.15.4 na indústria de processos.

Uso da tecnologia IEEE 802.15.4 para detecção de Gases Tóxicos e Inflamáveis (pergunta 9):

As perguntas sobre detecção de gases tóxicos e de gases inflamáveis foram apresentadas separadamente. Porém, as porcentagens de aceitação (ou não) deram-se exatamente iguais, indicando que os entrevistados atribuem a mesma importância

para ambas. Se eles aceitam para um, aceitam também para o outro. Por esta razão, o Gráfico 4.3-4 representa o resultado de ambos os gases.

Nesta pergunta, a porcentagem de aceitação de mais de 50% para o uso de *wireless* padrão 802.15.4 ficou acima do esperado. Dois entrevistados destacaram em suas respostas que aceitavam a tecnologia desde que houvesse redundância do sistema. Deste fato, supõe-se que o alto grau de aceitação foi em virtude de um sub-entendimento do entrevistado de que o sistema terá sempre uma redundância.

Uso de Tecnologia IEEE 802.15.4 para detectar gases tóxicos e inflamáveis

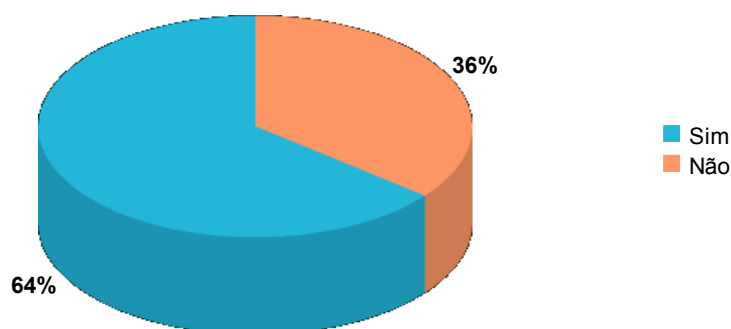


Gráfico 4.3-4 Uso de redes IEEE 802.15.4 para detecção de gases tóxicos e inflamáveis.

Percepção (Pergunta 13):

Este item era de livre expressão. Os entrevistados eram incentivados (não obrigatório) a expressar suas opiniões e preocupações sobre a tecnologia IEEE 802.15.4. Nem todos emitiram opinião mas as que foram emitidas agregaram grande valor a este trabalho. Elas estão listadas a seguir, tendo sido sublinhadas as palavras consideradas relevantes para mostrar os aspectos (positivos ou não) para a tecnologia de redes *wireless* 802.15.4:

“Tendo vivido a implementação das outras tecnologias ao longo dos anos e vendo que todas trouxeram ganhos (principalmente para a manutenção), creio que esta também representará um novo salto.”

“A tecnologia vem para nos servir. Deve ser feito o bom uso dela. Para implementações novas, deve ser feito estudo e avaliação das

vantagens/desvantagens do seu uso. Para o que já está implementado com cabos, não acho vantagem mudar. Confiabilidade é o que definirá o seu uso ou não.”

“Para a segurança deve-se usar sempre a rede cabeada. Devem haver projetos pilotos.”

“Garantindo 100% confiabilidade do link, concordo com o uso da tecnologia. A instalação será mais fácil.”

“A tecnologia tornará a planta mais dinâmica. A confiabilidade deve ser garantida. Para a indústria de processos levará uns 10 anos para implementar. Este tipo de indústria deve ser mesmo conservadora em razão dos altos riscos.”

“Depende do grau de confiabilidade. Será bom porque eliminará o problema estrutural dos cabos e facilitará a instalação. O uso desta tecnologia será inevitável no futuro.”

“Toda tecnologia nova gera desconforto mas desde que comprovada a sua eficácia, ela deve ser usada. Há outros mecanismos e ações que atuam junto com a tecnologia nova.”

“Confio na tecnologia mas tenho preocupação com ruído interferente de outros sinais RF”.

“Confiável. Acho importante para locais de difícil acesso.

“A tecnologia não tem retorno. Preocupo-me com a interferência de outras RF.”

“A preocupação principal é a interferência com outras RF. Se já há infraestrutura, porque trocar? Cabeado é mais confiável que sem fio.”

“A confiança está associada à redundância.”

“Aceito o uso desde que sejam oferecidas as condições técnicas para contornar todos os problemas que a tecnologia possa ter. Acho a tecnologia confiável mas desde que com redundância (2 canais wireless ou 2 fibras ópticas em anel).”

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE BATERIAS DOS DISPOSITIVOS DE CAMPO

A alimentação de energia dos equipamentos é uma importante consideração de projeto nas redes LR-WPAN. O fornecimento de energia elétrica para um dispositivo *wireless* industrial pode ser feito por alimentação elétrica externa (linha energizada) próxima ao dispositivo, por fonte alternativa de energia (energia solar, por exemplo, se houver condições de espaço e iluminação para tal) e por bateria, a qual deve ter volume compacto e condições de temperatura e capacidade inicial.

Por ser uma fonte de alimentação restrita, o projeto da rede WPAN-LR deve impor condições de forma a aproveitar de forma mais otimizada possível o uso da bateria. Para tal é importante conhecer os tipos de baterias disponíveis e os fatores que influenciam consumo.

4.4.1 Alimentação Elétrica dos Dispositivos IEEE 802.15.4

Do ponto de vista da alimentação de energia, os dispositivos de uma rede LR-WPAN são de três tipos, descritos a seguir, junto com o tipo de alimentação que recebe conforme os Sistemas LR-WPAN aqui estudados:

Gateway: em geral localiza-se em local com fornecimento de energia cabeado disponível (industrial DC ou convencional AC). Como ele tem o papel de sumidouro e comunica-se com vários dispositivos dispersos na rede, ele possui maior capacidade de processamento, memória e, portanto, seu consumo é bem maior. A fonte de alimentação do *gateway* pode ser 110/220 Vac ou fonte industrial na faixa de 20 - 30 Vdc (o usual é +24 Vdc) com consumo de corrente de cerca de 500mA e consumo de potência menor que 5W.

Adaptador: permite “adaptar” dispositivos cabeados para a tecnologia *wireless*. Por exemplo, um dispositivo cabeado padrão HART/4...20 mA pode ser conectado a uma rede WiHART através de um adaptador. A alimentação do adaptador pode ser fornecida pela própria corrente de *loop* 4-20mA do dispositivo cabeado ou pelo uso de

baterias de *Lithium-Thionyl Chloride* (5 - 7,2 Vdc tamanho “D” / Bateria W-BAT-B2-Li 7,2Vdc) se for um dispositivo de campo que não tenha alimentação convencional disponível próximo a ele.

Repetidor (ou *field link*): um repetidor é um nó agregado à rede LR-WPAN com função de estender a rede para locais cuja distância ultrapasse o alcance do nó sensor, visando garantir a comunicação no percurso. Repetidores também podem ser empregados para proporcionar caminhos redundantes, necessários em uma rede em malha para assegurar a confiabilidade da rede (funcionam como nós roteadores). Os repetidores utilizam as mesmas fontes de energia dos nós sensores, em geral, um módulo de bateria com células tamanho “C” de *Lithium-Thionyl Chloride*. Mas pode também ser alimentados por fonte industrial 10,5 – 30Vdc, caso do adaptador da *Rosemount*.

Transmissor: a maior parte é alimentado com bateria interna de *Lithium-Thionyl Chloride* 3,6Vdc mas há sensores que utilizam baterias alcalinas 3,6–7,5V AA como as da *National Instruments*. Alternativamente pode-se usar energia renovável como por exemplo a solar. O Sensor de gás da *Gastronics* permite mais possibilidades tais como alimentação externa de 9 a 30Vdc ou 115/220Vac ou 12 Vdc com energia solar.

O APÊNDICE 3 detalha as opções de alimentação das soluções *wireless* aqui estudadas.

4.4.2 Baterias dos Dispositivos de Campo IEEE 802.15.4

Não há uma padronização para as baterias dos dispositivos *wireless* para automação industrial. A maioria dos transmissores aqui estudados utilizam baterias¹¹ primárias (não recarregáveis) de cloreto de tionil-lítio porque estas suportam com facilidade altas demandas de corrente de curta duração, mantendo uma tensão constante por um período de tempo mais longo. Desta forma, garante-se uma maior durabilidade para a bateria, sendo por este motivo chamadas de baterias “longa-vida”. Pilhas alcalinas podem também ser aplicadas nos transmissores *wireless* LR-WPAN. Apesar destas

¹¹ Bateria é um conjunto de pilhas agrupadas em série ou paralelo, dependendo da exigência por maior potencial ou corrente. Pilha (ou célula) é um dispositivo constituído unicamente de dois eletrodos e um eletrólito, arrançados de maneira a produzir energia elétrica.

terem uma vida útil mais curta, elas são mais baratas que as de Lítio. A empresa *National Instruments* aplica pilhas alcalinas em seus equipamentos *wireless*. A Tabela 4.4.2-1 apresenta as características das pilhas alcalinas em comparação com as de lítio.

	Pilha de zinco/dióxido de manganês (alcalina)	Pilha de lítio/dióxido de manganês
Anodo/Catodo	MnO ₂ /Zn	Li-SOCl ₂ (Tionil cloride) ou Li-MnO ₂ Litium Manganês
Eletrólito	Solução pastosa de hidróxido de potássio concentrada (~30% em massa) com óxido de zinco (daí o nome alcalina).	Eletrólitos não aquosos (sal de lítio dissolvido em solventes não aquosos).
Tipo	Primária e Secundária (recarregável).	Primária (não recarregável)
Densidade de energia	80Wh/kg	Tionil cloride 290Wh/kg Litium MnO ₂ 280Wh/kg
Potencial de circuito aberto (tensão de uma célula)	1,50 V – 1,65V	Tionil cloride: 3,65V Litium MnO ₂ 3,3V
Impacto ambiental	Baixo impacto ambiental, pois não contém metais tóxicos, como mercúrio, chumbo e cádmio.	Riscos associados com o lítio metálico
Características operacionais e de desempenho e aplicações	Aplicações que requerem altas correntes elétricas, em regime de descarga contínua. Desempenho da pilha secundária é muito menos do que o das baterias secundárias tradicionais.	Excelente desempenho mesmo em aplicações que operam em temperaturas maiores que a ambiente.
Invólucro	Recipiente externo confeccionado em chapa de aço para garantir melhor vedação e prevenir, portanto, o risco de vazamento de eletrólito altamente cáustico.	Devido à alta reatividade do lítio metálico com água, estas pilhas devem ser hermeticamente seladas. A sua vedação inadequada pode expor o lítio à umidade do ar e provocar chamas no metal e no solvente não aquoso.

Tabela 4.4.2-1 Características das baterias utilizadas nos transmissores 802.15.4

As células de lítio das baterias dos dispositivos *wireless* são do tipo alta densidade de energia *lithium-thionyl chloride* (Li-SOCl₂), fornecendo tensão nominal de 3,5V e tensão de circuito aberto de 3,65V. São baterias que em geral não são vendidas para o consumidor comum, sendo encontradas mais em aplicações industriais ou são instaladas dentro de dispositivos nos quais sua reposição não é acessível ao consumidor. Nesta célula, uma mistura líquida de *thionyl chloride* (SOCl₂) e *lithium tetrachloroaluminate* (LiAlCl₄) agem como eletrólito e catodo respectivamente. Sendo projetadas para fornecer correntes altas e deste fato, elas exigem cuidados durante seu manuseio e transporte. Os contatos devem ser protegidos para evitar sua

descarga prematura (descarregam muito rapidamente se forem curto-circuitadas). Também, uma rápida descarga de uma bateria de lítio pode resultar em sobreaquecimento, ruptura e até explosão.

4.4.3 Vida Útil das Baterias vs. Temperatura vs. Intervalo de Coleta

A Figura 4.4.3-1 e a Figura 4.4.3-2 foram obtidas de um manual de um dispositivo de um dos fabricantes de solução *wireless* industrial (BENTLEY, 2009-2010, p. 14). Trata-se de um Módulo de Alimentação de Bateria Sem Fio, para uso em Zona 0 (P/N 185547-01), o qual consiste em Células C de Cloreto de Tionil de Lítio. Nelas vê-se claramente a diminuição da vida útil da bateria em temperaturas diferentes de 20°C para os quais foram projetadas e também o impacto de acordo com a diminuição dos intervalos de coleta de dados.

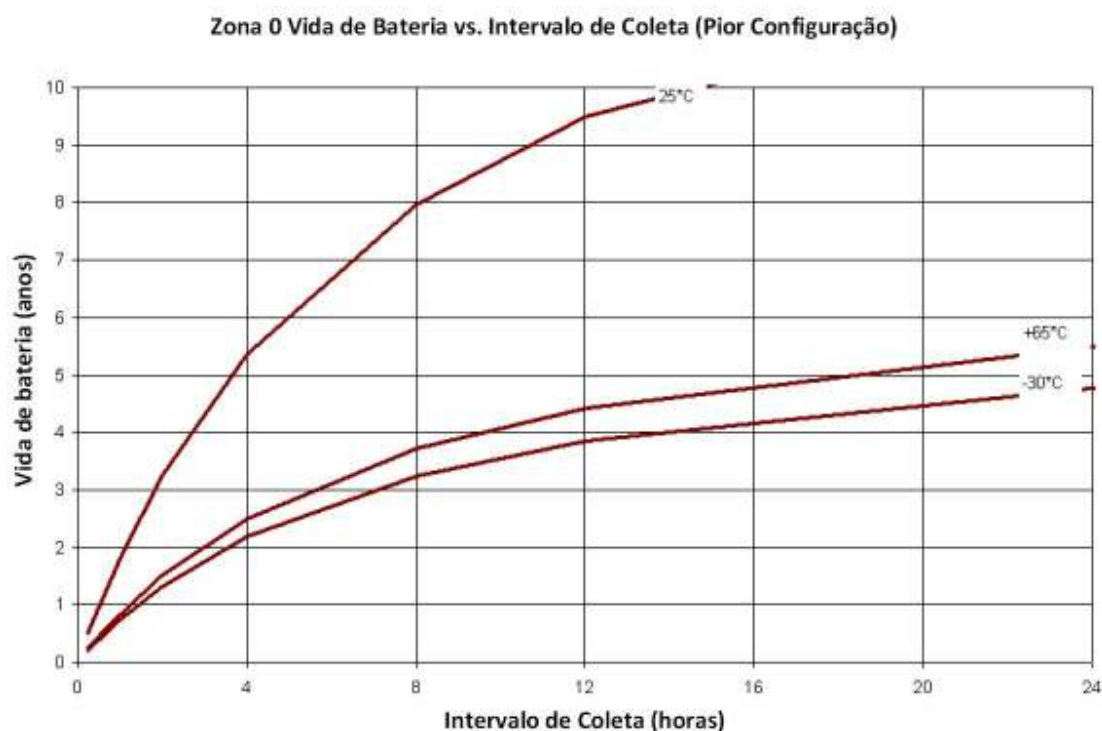


Figura 4.4.3-1 Vida útil da bateria de um módulo transmissor em função da intervalo de coleta de dados e 3 temperaturas ambientais de operação (BENTLEY, 2009-2010, p. 14, il).

Faz-se necessário avaliar em qual temperatura o *equipamento wireless* com bateria será exposto para operação. O material do produto da Rosemount/Emerson (EMERSON, 2009) menciona que “a contínua exposição a limites de temperatura

ambiental (-40°C ou 85°C) pode reduzir a vida útil da bateria em 20%”. A Bentley Nevada por sua vez afirma que a redução pode ser de até menos de 10%.

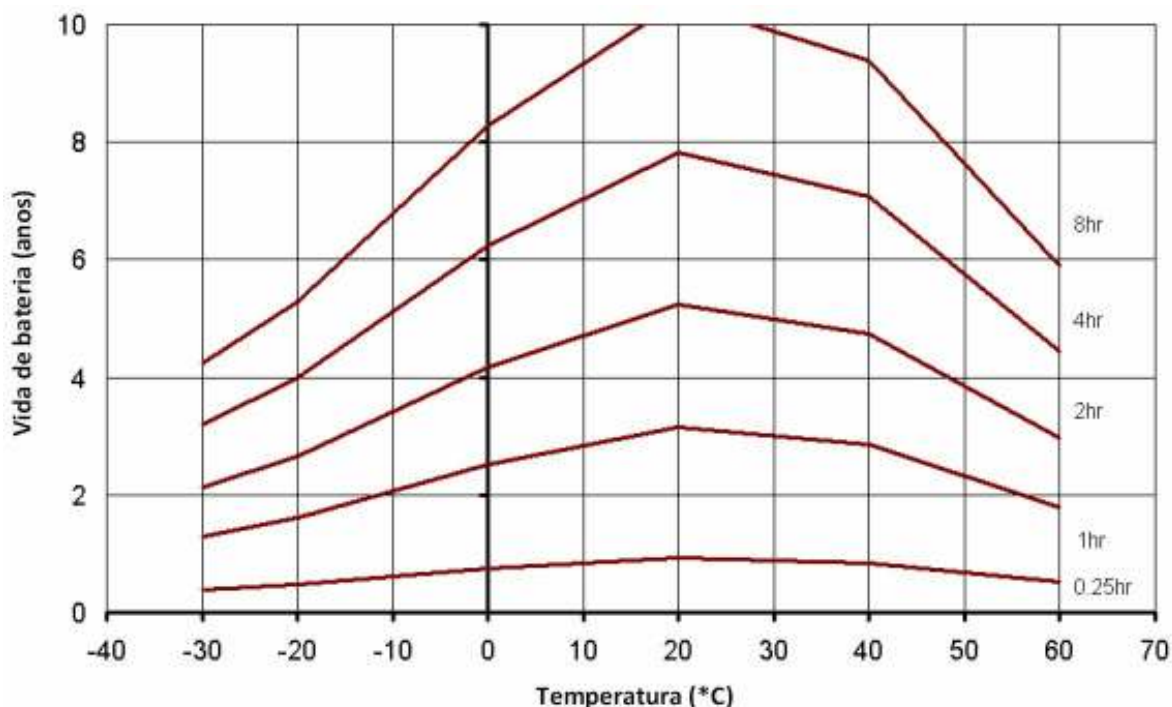


Figura 4.4.3-2 Vida útil da bateria de um módulo transmissor em função de 5 intervalos de coleta de dados e temperatura ambiental de operação (BENTLEY, 2009-2010, p. 14, il).

A título de curiosidade e de que o usuário deve estar muito atento às informações veiculadas, um dos artigos (WIRELESS..., 2010) cita que o uso de instrumentos *wireless* pode ser aplicado em altas temperaturas, exemplificando o valor de 3.000°F . A temperatura de 3.000°F corresponde a $1.648,89^{\circ}\text{C}$ e, nesta temperatura, o próprio instrumento de medição sofreria danos.

“Replaced traditional wired instruments with Emerson’s Smart wireless technology to improve furnace control at its mini-mill in Delta, OH. The mill’s old, hard-wired network had hundreds of wiring junctions and suffered frequent measurement failures in the harsh environment, with its high electromagnetic fields, flying slag, vibration, moisture, and temperatures as high as $3,000^{\circ}\text{F}$. ”

Sobre o tempo de coleta, o artigo (WIRELESS..., 2011) anuncia que “dados de fluxo são transmitidos a cada 30 segundos e dados de pressão e nível a cada 300 segundos para o *Gateway*”. Aplicando-se estes valores na temperatura de 20°C , com um intervalo de coleta de 0,25hora (15 min), a curva da Figura 4.4.3-2 indica uma vida útil de aproximadamente 1 ano. O envio de dados em 30 segundos consumirá muita bateria, indicando que a troca de bateria será muito frequente. Nesta taxa de coleta, a

economia de cabos deve ocorrer somente para os dados lógicos, sendo obrigatória a presença de alimentação elétrica no local. Já o tempo de coleta de 300 seg (5 minutos) consumirá 3 vezes mais bateria, e neste caso a troca de bateria seria da ordem de meses.

Considerando a análise acima, o uso de dispositivos *wireless* industriais não oferece muita vantagem ao ser aplicado a variáveis de variação rápida, mesmo que não sejam críticas, somente pelo fato de o consumo de bateria resultar muito alto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo mostra que quase metade dos fabricantes de soluções *wireless* baseadas em IEEE 802.15.4 estão sendo mais prudentes, preferindo aguardar a consolidação da tecnologia antes de investirem na homologação de seus equipamentos. No entanto, o fato de ter a homologação dos equipamentos significa poder participar de implementações-piloto junto aos clientes, resultando em vantagem competitiva em relação aos demais se comprovada a confiabilidade da tecnologia nestes testes. Notadamente a Yokogawa e Emerson, tem sido frequentemente citadas nos artigos relacionados a Automação & Controle em implementações-piloto tanto no Brasil quanto em nível mundial.

O intuito da estimativa de custos foi apenas qualitativo. A grande dificuldade de se obter preços reais levam à necessidade de se fazer associações, assimilações e aproximações que podem ter resultado em alguma imprecisão nos valores adotados. As variáveis são muitas: topologia de redes, distribuição dos equipamentos, o quanto dos trechos é considerado como área classificada, a possibilidade de compartilhamento de eletrodutos, tipo de barramento e protocolos, etc. A suposição de situação extrema (rede situada 100% em área classificada e instalação de cabos em eletrodutos, sendo um para cada instrumento da planta) trouxe uma margem de vantagem de custo extremamente alta do *wireless* 802.15.4 sobre a rede cabeada. Esta margem diminuirá em outros contextos de rede cujas áreas classificadas sejam menores e os instrumentos estejam mais concentrados. Neste caso as instalações poderão ser sistemas por cabos com conexão indireta em compartimento Ex-d ou sistema de conexão direta a compartimento Ex-a.

As baterias mostraram-se ao longo do estudo um aspecto importante a ser abordado. O desempenho destas farão grande diferença na adoção da tecnologia e o entendimento de seu consumo por parte do cliente (principalmente no que se refere à taxa de coleta de dados de medição) conduzirão as linhas de aplicação. É recomendável que nos documentos comerciais dos fabricantes, as baterias devam vir com sua vida útil estimada acompanhada das condições de referência tais como intervalo de coleta (ou frequência da coleta); temperatura ambiental, quantidade de dispositivos com o qual se comunica (dados de encaminhamento para três dispositivos de rede adicionais), etc.

Alguns fabricantes deixam bastante claro a questão de alto consumo das baterias em seu material de propaganda e manuais de dispositivos. Outros já não são tão claros e o consumidor mais desavisado pode ser pego de surpresa com um alto consumo de bateria que pode até inviabilizar o uso de equipamento *wireless*, dependendo da aplicação. Neste quesito, as empresas que melhor apresentaram informações para o usuário foram a Bentley Nevada e a *National Instruments*.

É interessante citar aqui a possibilidade futura de uso de obtenção de energia através da vibração, da acústica ou mesmo do calor, elementos existentes em abundância em uma planta de processo. O site Inovação Tecnológica menciona estudos de obtenção de energia do calor (GERADOR..., 2011) ou da vibração (CHIP-GERADOR..., 2011). No primeiro artigo, pesquisadores de Cingapura usaram o calor dissipado por um processador para gerar eletricidade (utilizando "metal líquido") que pode ser usada para alimentar o próprio circuito ("auto-alimentação"). Já a extração de energia da vibração pode ser obtida através de uma espécie de ponte arqueada recoberta com o material piezoelétrico (PZT) que responde significativamente bem para a captura de frequências baixas, que são as mais comumente encontradas nos ambientes. Apenas uma ponte de PZT, produz 45 microwatts de energia.

Na análise das entrevistas sobre as perspectivas de uso da tecnologia sem fio baseada no padrão IEEE 802.15.4 o estudo indicou boas possibilidades, com uma força de trabalho em geral receptiva. Como a planta de processo industrial é sempre uma situação de risco, todos os entrevistados demonstraram receio quanto a tecnologia, porém a maioria mostra-se positiva quanto à adoção futura, com base na experiência com outras tecnologias vivenciadas por eles. A adoção de redundância é um dos pontos-chaves para a confiabilidade do uso da tecnologia *wireless* em automação e controle. Cabe ressaltar também a preocupação com a interferência eletromagnética com outros sinais, o que foi mencionado por três vezes. O nível de aceitação situou-se nas aplicações de risco não crítico, isto é, da classe 2 até a 5. Para as classes 0 e 1 a força de trabalho mostrou-se mais polarizada, mostrando certa prudência em razão dos altos riscos. Este resultado corroborou a RFC-5673 que menciona que "os usuários industriais estão interessados no emprego de redes *wireless* para classes de monitoramento 4 e 5 e em áreas não-críticas das classes 2 e 3".

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB TECH SOLUTION. **HART**. USA, MA, Westford, 2011. Disponível em <http://ab-tech-solution.com/fieldbus_HART.html>. Acesso em 28 Nov 2011

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil) - ANATEL. **Método de Designação das Emissões Radioelétricas**: (PUB TEC 25 – DENTEL). Superintendência de Serviços Privados – SPV. Gerência Geral de Serviços Privados – PVST. Gerência de Autorização – PVSTA. Brasília, DF, set. 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil) - ANATEL. **Resolução nº 442, de 21 de julho de 2006**. Aprova Regulamento para Certificação de Equipamentos de Telecomunicações quanto aos aspectos de Compatibilidade Eletromagnética. Brasília, DF, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil) - ANATEL. **Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008**. Republica o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita. Brasília, DF, 2008.

ÁREAS Classificadas por Gases, Vapores, Poeiras e Fibras. **MAEX Engenharia**, [S.I.], Sept. 23, 2011. Disponível em: <<http://www.maex.com.br/?p=1287>>. Acesso em: 15 nov. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-0:2008**: atmosferas explosivas: Parte 0: equipamentos: requisitos gerais. 2. ed. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-14:2009**: atmosferas explosivas: Parte 14: projeto, seleção e montagem de instalações elétricas. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009.

BABB, Michael. Honeywell, Yokogawa Release Wireless Products Based on the ISA100 Standard. **Revista Control Engineering Europe**, [S.I.], June 27, 2010. Disponível em: <<http://www.controlengurope.com/article/34720/Honeywell—Yokogawa-Release-Wireless-Products-Based-on-the-ISA100-Standard.aspx>>. Acesso em: 16 set. 2011.

BENTLEY NEVADA. **Specifications and Ordering Information**: Rev. B (10/10): Part Number 185301-01: Essential Insight.mesh™. Bently Nevada Asset Condition Monitoring (equipamento). USA, Nevada, 2009–2010.

BERTOCCO *et al.*, M. **Is CSMA/CA really efficient against interference in a wireless Control System? An experimental answer**. University of Padova. Padova, Italy. 2008 IEEE.

BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental. **Química Nova na Escola**, [S.l.], n. 11, p. 3-9, maio 2000.

BULGARELLI, Roberval. “Novos” requisitos de EPL para seleção e marcação de equipamentos elétricos e de instrumentação para instalação em atmosferas explosivas. **MAEX Engenharia**, [S.l.], 6 jun. 2011. Disponível em: <<http://www.maex.com.br/?p=795>>. Acesso em: 27 nov. 2011.

CAMPOS, C. F. P. S. **Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio**. Monografia (Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

CHIP-GERADOR vai gerar energia dentro do próprio aparelho. **Inovação Tecnológica**, Redação, seção Energia, 20 out. 2011. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=chip-gerador-gera-energia-dentro-aparelho&id=010115111020>>. Acesso em 03 dez 2011.

COLLOTTA, Mario; LO BELLO, Lucia; TOSCANO, Emanuele. Uma arquitetura flexível para redes sem fio IEEE 802.15.4. **Revista Redes, Telecom e Instalações**, São Paulo, ano 11, n. 129, fev. 2011.

COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE, ELETRÔNICA, TELECOMUNICAÇÕES E ILUMINAÇÃO - COBEI –Subcomitê SC-31 - Atmosferas Explosivas. [S.l.], [200-?], blogspot il. Disponível em: <<http://cobei-sc-31-atmosferas-explosivas.blogspot.com>>. Acesso em 25 Nov 11.

CURSO básico de Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade: Apostila de Riscos Elétricos. 3. ed. Brasília, DF: CNI; SENAI, 2011.

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. **Reference Manual 00809-0100-4160**: Rev. AA: Rosemount 2160 WirelessHART™: Vibrating Fork Liquid Level Switch (equipamento). [S.l.], Apr. 2009.

FUHR *et al*, P. L. **wireless Technology Review: Radios, Frequencies, and Implications for Industry**. [S.l.: s.n.], 2010.

GARG, Vijay Kumar. Wireless communications and networking. In: WLAN: Low Rate and High Rate. [S.l.: s.n.], 2007. cap. 20, p. 675, il. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books>>. Acesso em: 13 set. 2011.

GERADOR de silício transforma calor de processadores em eletricidade Efeito termoelétrico com silício. Inovação Tecnológica, Redação, Seção Energia, 01 dez. 2011. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=gerador-silicio-calor-processadores-eletricidade&id=010115111201>>. Acesso em 03 dez 2011.

GIORGENON, Tatiana; PANTONI, Rodrigo Palucci; BRANDÃO, Dennis. **Análise Tecnológica de Redes Industriais Wireless**. São Paulo: USP, [200-?].

GUTIERREZ, José A. **IEEE Std. 802.15.4**: Enabling Pervasive Wireless Sensor Networks. [S.l.]: EATON, 2005. 79 slides.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **Wireless HART**: How it works. [S.l.], 2011. Disponível em: <http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_how_it_works.html>. Acesso em: 23 nov. 2011.

HAYASHI, Hisanori. Industrial Wireless Communication Technologies and Standards. In: SICE, 2010, Taipei. **Proceedings...** Taipei: JEMIMA Industrial Wireless Working Group, 2010. 50 slides.

HENNING, Carlos Henrique. **Desafios no Desenvolvimento de uma Rede Wireless para um Sistema de Controle de Válvulas em uma Refinaria**: apresentação em slides. São Paulo, 29 abr. 2009.

IVERSEN, Wes. Wireless Control in the Process Industries: Blasphemy or Common Sense? **Automation World**, [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://www.optimizedautomation.com/news/wireless-control-process-industries-blasphemy-or-common-sense-0>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

LOULA, Alexsander; CESAR, Bruno. Escolhendo a melhor tecnologia para aplicações wireless. In: NIDAYS. **National Instruments**. [S.l.: s.n.], 2011. 44 slides. Disponível em: <<http://brasil.ni.com/nidays/apresentacoes>>. Acesso em: 1 jun. 2011.

NOVOS requisitos de EPL para seleção e marcação de equipamentos elétricos e de instrumentação para instalação em atmosferas explosivas: parte II. **MAEX Engenharia**, [S.l.], 8 jun. 2011. Disponível em: <<http://www.maex.com.br/?p=816>>. Acesso em: 27 nov. 2011.

PISTER, K. et al. **Industrial Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks**: Request for Comments: RFC 5673. [S.l.], Oct. 2009.

PROTOCOLOS de comunicação. **Revista Controle & Instrumentação**, São Paulo, n. 160, 2010. Disponível em: <http://controleinstrumentacao.com.br/arquivo/ed_160/cv1.html>. Acesso em: 03 dez. 2011.

REQUISITOS para as atividades de inspeção e manutenção de instalações elétricas e de instrumentação em atmosferas explosivas: exemplos, recomendações e conclusões: capítulo 4. **MAEX Engenharia**, [S.l.], 13 jul. 2011.

SEIDER, Warren D.; SEADER, J. D.; LEWIN, Daniel R. **Products & Process Design Principles**: Synthesis, Analysis, and Evaluation. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. cap 1, p. 3-31.

SHARP, Ira. HOW to choose wireless technology for industrial applications. [S.l.], 2010. Disponível em: <[http://m.plantengineering.com/index.php?id=2831&tx_ttnews\[tt_news\]=39357&cHash=d42d5ba444](http://m.plantengineering.com/index.php?id=2831&tx_ttnews[tt_news]=39357&cHash=d42d5ba444)>. Acesso em: 1 set. 2011.

SILVA, Ivanovitch Medeiros Dantas da. **Redes de Sensores sem Fio aplicadas em Ambientes Industriais de Petróleo e Gás**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenheiro de Computação) - Centro de Tecnologia, Engenharia de Computação e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA, Jones Yudi Mori Alves da; CRUZ, Marcelo Messias F.; ROSADO, Rodrigo de Menezes. **Transmissão de Dados Redes Industriais**. Brasília, DF: Universidade de Brasília – UNB, 2006.

SIMON, Regina Maria Vinhais Gutierrez; KOO PAN, Shi. Complexo eletrônico: automação do controle industrial. **Automação Industrial**, Rio de Janeiro, n. 28, p. 189-232, set. 2008.

SPANDRI, Renato. Sintonia de controladores regulatórios - PID Controller Tuning: sintonia de controladores PID. **Boletim Técnico Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 46, n. 3-4, p. 383-410, jul./dez. 2003.

SPARK INSTITUTE. **Understanding IEC 60079**. [S.l., 200-?]. Disponível em: <http://www.sparkinstitute.ca/lib_IEC_60079.htm>. Acesso em: 11 nov. 2011.

TANTUBAY, N.; SHARMA, S. **Transmission Power Control Management for Radio PHY802.15.4 based on LQI for wireless Sensor Network**. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 25– No.7, July 2011. School of Information Technology. Rajiv Gandhi Technical University. Bhopal, India.

WEI *et al*, M. **Research and Implementation on the Security Scheme of Industrial wireless Network**. IEEE ICOIN 2011, p. 37-42.

WEIDEMANN, Robb; FERREIRA, Ariel. **Alto custo benefício em soluções wireless**. [S.l.: s.n., 200-?]. Disponível em: <http://labsoft.com.br/arquivos/artigos/CT-021_09.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2011.

WERB, J. The Technology Behind ISA100.11.a. User Driven Design. ISA100 wireless Compliance Institute. Yokohama, 26 Aug 2010. Apresentação em Slides.

WIRELESS instrumentation monitors water usage at pharmaceutical plant. [S.l.], Apr. 20, 2011. Disponível em: <<http://www.controleng.com/new-products/industrial-networks/single-article/wireless-instrumentation-monitors-water-usage-at-pharmaceutical-plant/eb7f526367.html>>. Acesso em: 6 set 2011.

WIRELESS technology moves into broader process control applications. [S.l.], Sept. 29, 2010. Disponível em: <[http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews\[tt_news\]=38495](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=38495)>. Acesso em: 6 set. 2011.

ZARADER, Cyril. Product Marketin. Partie 2: Les mécanismes du protocole ZigBee. In: CONFÉRENCE ZIGBEE, 2006, Montpellier. Actes... [S.l.]: Freesclae semiconductor, 2006. 38 slides.

APÊNDICE 1 Questionário de prospecção do nível de aceitação das tecnologias *wireless* na planta industrial de processos

1) Há quanto tempo você trabalha com automação?

Tempo [Anos]	Até 1	1 a 3	3 a 5	5 a 8	8 a 10	10 a 15	≥15
--------------	-------	-------	-------	-------	--------	---------	-----

2) Sobre o uso de tecnologias *wireless* para operar a planta industrial você:

- () nunca ouviu falar;
- () já ouviu falar mas não sabe do que se trata;
- () não concorda com o uso
- () concorda parcialmente com o uso
- () concorda integralmente com o uso.

Em caso de uso parcial qual seria o nível, considerando a classificação ISA na tabela abaixo:

	Categoria	Classe	Aplicação	Descrição
3)	Segurança	0	Ação emergencial	Sempre crítico
4)	Controle	1	Controle em malha fechada regulatório	Frequentemente crítico. Pode ser em área crítica e em área não crítica.
5)		2	Controle em malha fechada supervisão	Usualmente não crítico. Pode ser em área crítica e em área não crítica.
6)		3	Controle em malha aberta	Humano na malha. Operador toma ação e controle o atuador
7)	Monitoramento	4	Alerta	Consequência operacional de curto prazo (manutenção baseada em evento)
8)		5	Logs de arquivos e "downloading/uploading"	Consequência operacional não imediata (coleta de histórico, evento de sequência, manutenção preventiva)

- 9) () para detecção de gases tóxicos () gases inflamáveis
- 10) eliminada (sobre variáveis de variação lenta ou rápida)
- 11) eliminada (sobre área classificada)
- 12) eliminada (sobre corrente principal do processo)
- 13) Percepção da tecnologia (livre expressão).

APÊNDICE 2 Conceitos das aplicações na planta industrial de processos.

(ver Tabela 3.3-1 Classificação conforme comitê ISA-100.11a.)

Cat. Segurança - Classe 0 - Ação Emergencial (sempre crítico):

São aplicações de segurança que indicam uma situação de risco e afetam a integridade básica de segurança da planta. Estas funções acionam apenas quando o sistema de controle de processo, ou seus operadores, falham. São dados eventuais que exigem uma prioridade de serviço na rede. Para obter um alto nível de segurança, são utilizados Sistemas de Missão Crítica. Um Sistema de Missão Crítica é um ambiente tecnológico construído para evitar a paralisação de serviços e a perda de dados importantes a um negócio. Para isso, uma série de equipamentos e tecnologias são aplicadas ao ambiente. O que determina que tipo de equipamento e que tipo de tecnologia serão usados em uma ambiente de missão crítica é o nível de importância do negócio e da operação. Exemplos de aplicação emergencial são o intertravamento seguro (*safety Interlock*), o desligamento/bloqueio emergencial (*emergency shutdown*) e o controle automático de fogo.

Cat. Controle - Classe 1 - Controle em malha fechada Regulatório (frequentemente crítico): é a otimização do processo através da regulação dos valores de *set points* dos controles de malha fechada. A configuração é a um esquema hierarquizado de controladores, com o controle avançado otimizando o processo através de atuação sobre uma série de controladores regulatórios do tipo PID. O controle avançado é o mestre de diversos controladores PID, que dele recebem periodicamente novos *set points* (valores desejados).

São aplicações de controle rápido nas quais a latência do sinal deve ser a menor possível. Em muitos destes sistemas, se um pacote não chegar dentro do intervalo especificado, o sistema pode entrar em um estado de *emergency shutdown* (função de bloqueio ou desligamento seguro), frequentemente com substancial repercussão financeiras. O Controle de atuadores primários é um exemplo deste tipo de aplicação.

Cat. Controle - Classe 2 - Controle em malha fechada supervisório (em geral não crítico): refere-se ao sistema de *hardware* e *software* que permite ao operador ter informações (estado operacional de um equipamento, valores de variáveis de um processo, alarmes, relatórios e gráficos de tendência) em tempo real (*online*) de um processo. O *software* de Sistema Supervisórios mais conhecido na indústria de processos é o SCADA - *Supervisory Control and Data Aquisition*. Estes sistemas

podem assumir topologia monoposto, cliente-servidor ou múltiplos servidores-clientes. Exemplos desta aplicação são Controles multivariáveis e Otimizadores.

Cat. Controle - Classe 3 - Controle de malha aberta (*human in the loop*): é implementado via comunicação para uma sala de controle, porque é onde o operador está na malha (*human in the loop*). Os dados do sensor trafega são transmitidos para o controlador centralizado onde são processados, o operador analisa-os e toma uma ação enviando a informação de controle para o atuador na rede. Exemplos são o *Flare* manual e o ajuste manual de válvulas/bombas.

Cat. Monitoramento - Classe 4 - Alerta (consequências de curto prazo): trata-se de aplicações que emitem prognóstico de “alerta” quando uma variável monitorada atinge valores que indicam um defeito incipiente no equipamento. Exemplos de aplicação de alerta podem ser a manutenção baseada em eventos, indicador de baixa carga de bateria e rastreamento de ativos que monitora equipamentos essencialmente separados do monitoramento de processos. Um exemplo de equipamento de monitoração é o registro da vibração dos motores para detectar o desgaste dos rolamentos.

Cat. Monitoramento - Classe 5 - Logs de arquivos e *downloading/ uploading* (consequencias não imediatas): trata-se de uma transferência de dados em massa (*bulk transfer*) transmitidos em múltiplos pacotes onde recursos temporários são reservados para o atendimento à restrição de tempo. Recursos transitórios são reservados pela rede para um tempo limitado (relativo ao tamanho do arquivo e taxa de dados) para atender às exigências da transferência em massa. Exemplos de *loggings* são armazenamentos de históricos, rondas de manutenção preventiva e relatórios de sequencia de eventos (SOE – *Sequence Of Events*).

APÊNDICE 3 Opções de alimentação dos dispositivos *wireless* LR-WPAN pesquisados.

Fabricante	Gateway	Adaptador	Repetidor (field link)	Sensor
GE/Bentley Nevada	Fonte 110/220 Vca ou fonte industrial +24 Vdc.	Não tem este produto.	Bateria de Lithium-Thionyl Chloride com células "C".	Bateria de Lithium-Thionyl Chloride com células "C".
Emerson Rosemount	Fonte industrial +24 Vdc / 500mA.	Alimentação por corrente de <i>loop</i> 4-20mA (variável ou fixa).	Fonte 10,5–30 Vdc.	Bateria de Lithium-Thionyl Chloride com 2 células "C", invólucro PBT e IS.
Honeywell	Gateway família 6000 Não foi localizado manual.	Alimentação de <i>loop</i> 4-20mA ou bateria de Lítio "D".	Não tem este produto.	3,6 V lithium thionyl chloride (Li-SOCl ₂) "D".
Gastronics	Não tem este produto.	Não tem este produto.	Não tem este produto.	Bateria de Lithium ou 12Vdc / 5 A ou 115/220Vac ou 12 Vdc energia solar. Consumo 40 mA nom., 1000 mA durante a transmissão.
National Instruments	NI WSN 9791 Network Ethernet Gateway: fonte industrial +9-30 Vdc	Não tem este produto.	Não tem este produto.	NI WSN-32xx (nó) fonte industrial 9–30 V ou 4 pilhas 1,5V AA alcalinas. Baterias 3,6–7,5V Energizer EN 91 AA alcalina (-18°C to 55°C) e Duracell MN1500 AA alcalina (-20°C to 54°C).
Invensys Foxboro/ Pepperl+Fuchs	Fonte industrial+ 24 Vdc Consumo potência < 5W	Bateria W-BAT-B2-Li 7,2 Vdc ou alimentação de <i>loop</i> 8-23 Vdc ajustável em passos de 0,1V.	Não tem este produto.	Bateria W-BAT-B1-Li tensão nom. 3,6 Vdc, Consumo de potência < 0,09 W.
Siemens	IE/WSN-PA LINK - WiHART gateway: fonte industrial +24 Vdc 500 mA.	Lithium thionyl chloride battery pack 5 Vdc - 7,2 Vdc.	Não tem este produto.	Bateria Lithium thionyl "D" 3,6 Vdc; I _{max} 100 mA
Yokogawa	YFGW710 Gateway: +24 Vdc (10,0-26,4 Vcc); consumo máx. 10 W; corrente saída ≥ 1,5 Adc; corrente pico 30A 2 ms em 24 Vdc.	Não tem este produto.	Não tem este produto.	Módulo 2 baterias de lítio/cloreto de tionila "D". F9915MA Yokogawa ou bateria Tadiran TL-5930/S.
Endress+Hauser	Fieldgate WiHART SWG70: 20-30 Vdc, consumo de potência < 5 W.	Bateria de lithium-chlorure de thionyle, 5 - 7,2 Vdc, capacidade nominal 19 Ah @ 20°C.	O adaptador é o sistema transmissor que é anexado ao dispositivo de campo.	Bateria de Lítium-chlorure de thionyle 5-7,2 Vdc, Corrente nom. 19A @ 20 °C.

APÊNDICE 4 Custos de implementação de tecnologia *wireless* IEEE 802.15.4 em determinadas indústrias de processo.

Indústria de processo/Local	Aplicação	Solução <i>wireless</i> 802.15.4	Custo manutenção	Custo instalação	Fonte
Refinaria na America do Norte.	Operação de calcinação para coque.	Smart <i>wireless</i> da Emerson. Total de 14 transmissores de temperatura <i>wireless</i> e transmissores de pressão <i>wireless</i> com 1 <i>wireless Gateway</i> .		U\$8,000 a U\$15,000 por ponto cabeado, incluindo engenharia e projeto elétrico e de comunicação, instalação e materiais (excluindo o custo dos instrumentos). Média U\$1,000 por ponto sem fio na rede auto-organizável, representando 90% de redução.	1
Campo Duran e Campo Aguarague da Tecpetrol (Argentina).	Manutenção e operações de compressão de gás natural.	Smart <i>wireless</i> da Emerson. Transmissores <i>wireless</i> de pressão, de diferencial de pressão e de temperatura e <i>wireless Gateways</i> .	Economia nos custos de manutenção de 62%, redução de custos do controle supervisorio de 35%, corte de incursões a campo de 15% e redução do erro humano.	Os custos de instalação dos dispositivos Smart <i>wireless</i> foram U\$120,000 menos que da solução cabeada.	3
Refinaria Gallup em El Paso, NM – New Mexico, da Western Refining (WNR).	Unidade de processo e operações de tancagem.	Rede <i>wireless mesh</i> ISA100 da Honeywell. 1 <i>gateway wireless</i> e 4 multinós redundantes conectando 38 instrumentos <i>wireless</i> ISA100.		U\$15,000 a U\$22,000 por tanque de custo estimado de cabeamento tradicional e eletrodutos para o monitoramento da unidades de armazenamento afastadas. Até 90% do custo de tecnologia de medição convencional instalada pode ser relativa aos eletrodutos de cabos e sua construção.	4
Atlas Pipeline – Westex, próximo a Midkiff, Texas TX.	Coleta de dados do processamento de gás natural e armazenamento nos tanques, torres de resfriamento e compressores.	Smart <i>wireless</i> da Emerson. 99 transmissores <i>wireless</i> de temperatura, de pressão, de nível e transmissores de entrada discreta que comunicam-se com 3 <i>wireless Gateways</i> .		Economia estimada de custos de instalação de U\$725,000.	5
Northstar Bluescope Steel, Australia.	Controle do forno. Substituição de instrumentos cabeados por tecnologia <i>wireless</i> .	Smart <i>wireless</i> da Emerson.	Economia de custos de manutenção annual de U\$200,000.		9

Fontes dos artigos:

Fonte 1: ROSEMOUNT Inc. Rosemount Wireless Instrumentation. **REFINERY Improves Availability of Coking Unit with wireless Monitoring**: Rev AA: 00830-0200-4420, [S.I.], 2007. Disponível em: <<http://www.emersonprocess.com/rosemount/document/notes/00830-0200-4420.pdf>>. Acesso em: 17 jul 11.

Fonte 2: BOQI, Hu. **Application of Industrial wireless Technology in Zhenhai Refinery Ethylene Pipeline Project**: Honeywell Process Solutions: WP-10-16-ENG Whitepaper: [S.I.], dec 2010. Disponível em: <<http://www.thewirelessplant.com/assets/whitepapers/WP-Zhenhai.pdf>>. Acesso em: 17 jul 11.

Fonte 3: WIRELESS instrumentation helps boost production, cut costs at Argentine natural gas producer. **Revista Control Engineering**, 12 jan 2010. Disponível em: <<http://www.controleng.com/media-library/case-studies/single-article/wireless-instrumentation-helps-boost-production-cut-costs-at-argentine-natural-gas-producer/52acf0350d.html>>. Acesso em: 17 jul 11

Fonte 4: JOSEPH, Reginald. **Wireless Application: Western refining cuts wiring costs, improves performance**. Revista Control Engineering, 23 may 2011. Disponível em: <<http://www.controleng.com/new-products/industrial-networks/single-article/wireless-application-western-refining-cuts-wiring-costs-improves-performance/9cfaa2e24b.html>>. Acesso em: 06 set 11.

Fonte 5: WELANDER, Peter. **Wireless instrumentation helps pipeline operator with diagnostics**. Revista Control Engineering, 20 dec 2010 Disponível em: <[http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews\[tt_news\]=39187](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=39187)>. Acesso em: 06 set 11.

Fonte 6: WIRELESS instrumentation monitors water usage at pharmaceutical plant. **Revista Control Engineering**, 20 apr 2011. Disponível em: <<http://www.controleng.com/new-products/industrial-networks/single-article/wireless-instrumentation-monitors-water-usage-at-pharmaceutical-plant/eb7f526367.html>>. Acesso em: 06 set 11.

Fonte 7: PROSOFT Technology. **Wireless helps plains exploration and production, 2 month ROI**. Revista Control Engineering, 08 nov 2011. Disponível em: <[http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews\[tt_news\]=39531](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=39531)>. Acesso em: 06 set 11.

Fonte 8: WELANDER, Peter. **ISA 100.11a wireless demonstration project in operation**. Revista Control Engineering, 07 oct 2009. Disponível em: <[http://www.controleng.com/index.php?id=2735&tx_ttnews\[tt_news\]=14145&cHash=357161](http://www.controleng.com/index.php?id=2735&tx_ttnews[tt_news]=14145&cHash=357161)>. Acesso em: 06 set 11.

Fonte 9: WIRELESS technology moves into broader process control applications. **Revista Control Engineering**, 29 sep 2010. Disponível em: <[http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews\[tt_news\]=38495](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=38495)>. Acesso em: 06 set 11.

Fonte 10: GENERAL ELECTRIC COMPANY. **GE Energy Announces the Adoption of its Wireless Condition Monitoring Technology at Gas Field in Norway**: Press Release: ISA Expo Booth #2042, 14 Oct 2008. Disponível em: <<http://www.genewscenter.com/Press-Releases/GE-Energy-Announces-the-Adoption-of-its-wireless-Condition-Monitoring-Technology-at-Gas-Field-in-Norway-10a1.aspx>>. Acesso em: 13 set 11.

APÊNDICE 5 Lista de OCD consultadas.

ACTA - SUPERVISÃO TÉCNICA INDEPENDENTE

<http://www.acta.org.br/>

Endereço: Av. Franklin Roosevelt, 194-Gr:405, Castelo - Rio de Janeiro/RJ - 20021-120

Telefone: (21) 2524-2574/3000

Contato: Jaime Henrique Reich

e-mail: diretoria@acta.org.br

ASSOCIAÇÃO NCC CERTIFICAÇÕES DO BRASIL

<http://www.ncc.org.br>

Endereço: R. Conceição, 233 SALA 2510, Campinas/SP - 13010-050

Telefone: (19) 3731-6990

Contato: Sérgio Toshio Yochiy

e-mail: ncc@ncc.org.br

CTCP - CENTRO TECNOLÓGICO DE CERTIFICAÇÃO E PESQUISA

<http://ctcp.org.br/>

Endereço: R Carlos Machado, 215 - Pólo Rio Cine Vídeo - Barra da Tijuca, Rio de Janeiro/RJ - 22.775-042

Telefone: (21) 3184-2364

ID Nextel: ID 106*15644

Contato: Cláudia da Conceição Ferreira da Costa

e-mail: ctcp@ctcp.org.br

FUNDAÇÃO CPqD

<http://www.cpqd.com.br/>

Endereço: Rod. Campinas - Mogi-Mirim km 118,5, Campinas/SP – 13088-902

Telefone: (19) 3705-6387

Contato: Ricardo Alberto Guerra de Andrade

e-mail: ocd_cpqd@cpqd.com.br

FUNDAÇÃO VANZOLINI

<http://www.vanzolinicert.org.br/>

Endereço: R. Camburiú, 255 - Alto da Lapa, São Paulo/SP – 05058-020

Telefone: (0xx11) 3836-6566 ramal 147

Contato: Agostinho Tomaselli Neto

e-mail: telecom@vanzolinicert.org.br

IBRACE - INSTITUTO BRASILEIRO DE CERTIFICAÇÃO

<http://www.ibrace.org.br/>

Endereço: R. Maestro Francisco Manoel da Silva, 85 - Jd. Santa Genebra – Campinas/SP - 13080-190

Telefone: 19 3578-0100

Contato : Cesar Crisanti Filho

e-mail: ibrace.cps@ibrace.org.br

Endereço Filial: SRTVS-701 - Ed. Centro Empresarial Brasília - Bl. A, Sala 701, Brasília/DF - 70340-907

Telefone: (61) 3226-8220

Contato: Lúcio Mendes Frota

e-mail: ibrace@ibrace.org.br

IPDE - INSTITUTO DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E EDUCAÇÃO

<http://www.ipde.org.br/>

Endereço: SHCN-309 Bl. B - Salas 104, 106 e 108, Brasília/DF – 70755-520

Telefone: (61) 3202-6574

Contato: Ronaldo Arruda

e-mail: ipdeocd@ipde.org.br

MASTER Associação de Avaliação de Conformidade Telecom

<http://www.master.org.br/>

Endereço : Av. Padre Almeida Garret Nº 402, Pq. Taquaral, Campinas/SP - 13087-290

Telefone: (19) 3295-4646 / 2121-9946 / 3241-7580

Contato: Péricles Nepomuceno

e-mail: master@master.org.br

OCP-TELI - ORGANIZAÇÃO CERTIFICADORA

<http://www.ocp-teli.org.br/>

Endereço: Av. Afonso Pena, 3924, sala 608 - Bairro Cruzeiro, Belo Horizonte/MG – 30130-009

Telefone: (31) 3281-7470 e (31) 3324-8623

Contato: José Norberto Dias Athayde

e-mail: ocp-teli@ocp-teli.org.br

TECPAR - INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ

<http://www.tecpar.br/>

Endereço: Rua Professor Algacyr Munhoz Mader, 3775, Curitiba/PR - 81350-010

Telefone: (41) 3316-3071

Contato: Fernando Felice

e-mail: ffelice@tecpar.br

TÜV RHEINLAND BRASIL

<http://www.tuvbrasil.com.br/>

Endereço: SHIS QI-13 CL Bl.A Sala 22, Brasília/DF - 71635-013

Telefone: (61) 3364-5484

Contato: Antônio Carlos da Silva

e-mail: tuvbrasil@tuvbrasil.com.br

UCIEE - UNIÃO CERTIFICADORA

<http://www.uciee.org/>

Endereço: R. dos Comerciairos, 220, Bairro Jabaquara, São Paulo/SP – 04320-030

Telefone: (11) 5588-6120

Contato: Cláudio Francisco

e-mail: uciee@uciee.org

UL DO BRASIL CERTIFICAÇÕES

<http://www.ul.com/brazil/por/pages/>

Endereço: Rua Fidêncio Ramos, 195, 5º Andar, Vila Olímpia, São Paulo/SP - 04551-010

Telefone: (11) 3049-8794

Contato: José Carlos Martins

e-mail: jose.Martins@br.ul.com