HENRIQUE BARROS RIEGO

REDES SEM FIO NA INDÚSTRIA DE PROCESSOS:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2009

HENRIQUE BARROS RIEGO

REDES SEM FIO NA INDÚSTRIA DE PROCESSOS:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas

Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Garcia

São Paulo
2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 09 de novembro de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Riego, Henrique Barros

Redes sem fio na indústria de processos: oportunidades e desafios / H.B. Riego. --- ed.rev. -- São Paulo, 2009.

100 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1. Redes de comunicação de dados 2. Instrumentação de sistemas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que acreditaram que este sonho era possível.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Cláudio Garcia, agradeço por toda ajuda e compreensão durante toda esta fase.

A meu pai João pelo apoio incondicional em todos os momentos e a minha mãe Terezinha por toda a paciência e dedicação mesmo nos momentos mais difíceis desta minha caminhada.

Em especial a minha irmã Christina, por toda orientação e toda revisão efetuada.

A minha noiva Giseli, que abdicou de inúmeros compromissos para que sempre estivesse ao meu lado. Saiba que sem o seu apoio, este trabalho não seria possível.

Ao meu amigo Osvaldo, por toda ajuda e amizade desde o tempo da graduação.

E a todos os meus amigos da Promon, que sempre me incentivaram e engrandeceram este trabalho com comentários.

RESUMO

A transmissão de dados sem fio se faz presente no cotidiano de nossas vidas. Uma das tecnologias que mais se desenvolveu no início do século XXI é a rede sem fio e essa evolução levou a tecnologia a se difundir na indústria de processos. Em virtude disso, este trabalho tem como objetivo estudar a transmissão de sinais das redes de instrumentos sem fio na indústria de processos, suas topologias e suas características.

Para categorizar esta tecnologia no tempo, foi realizado um histórico das transmissões de sinais de campo, desde a transmissão pneumática até as atuais transmissões digitais fiadas. Também foi estudada a evolução dos sensores, que pode ser considerada um dos fatores que possibilitaram a transmissão sem fio.

Foi apresentado os conceitos da nova tecnologia como espalhamento espectral, antenas, arquiteturas da rede e as atuais tecnologias WirelessHART e ISA100.11a, para que fosse possível entender os requisitos necessários para o projeto de uma rede de instrumentos sem fio.

Baseadas no conceito ISO-OSI das redes convencionais, as redes de instrumentos sem fio possui cinco pilares (confiabilidade, tempo de latência, taxa de transferência, segurança e energia) que devem ser projetados em uma relação de compromisso, garantindo assim uma configuração de ótimo desempenho.

Por fim, foi exemplificada a utilização dessa tecnologia através de implantações em algumas unidades de uma usina sucroalcooeira.

Palavras-chave: Indústria de processos. Redes sem fio.

ABSTRACT

The wireless data transmissions are part of our daily lives. The wireless network is the technology that has been most developed in the beginning of the 21st century and this evolution allowed the industry to start considering the wireless technology as a viable option to its reality. Due to that, the aim of this paperwork is to study the wireless instrument network transmission in the process industries, its topologies and its characteristics.

In order to categorize this technology over time, a history of signal field transmission was made, since the pneumatic transmission to the digital wired transmission. The sensors evolution was also studied and this can be considered one of the wireless transmission main vectors.

It was introduced the concepts of this new technology as spread spectrum, antennas, network architectures and the WirelessHART and ISA100.11a technologies, as a preparation to understand the requirements for the design of a wireless instruments network.

Based on the regular network ISO-OSI structure, the wireless instrument network has five columns (trustability, latency time, throughput, security and energy) that have to be designed in a commitment relation, ensuring an optimal performance configuration.

In the end, it was exemplified the use of the technology through the implementation of some units in the sugarcane industry.

Keywords: Process industries. Wireless networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Malha de controle de processo e seus componentes.	16
Figura 1.2: Evolução das tecnologias Wi-Fi.	19
Figura 2.1: Quadro comparativo dos tipos de indústria.	24
Figura 2.2: Controle manual de uma planta de processo.	25
Figura 2.3: Maturidade das tecnologias de transmissão.	26
Figura 2.4: Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão pneumática.	27
Figura 2.5: Formas de interligação de instrumentos com transmissão eletrônica.	29
Figura 2.6: Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão eletrônica.	30
Figura 2.7: Base instalada de protocolos digitais de comunicação industrial com ênfase na indústria de processos.	32
Figura 2.8: Princípio da transmissão digital superimposta HART.	33
Figura 2.9: Topologia da rede <i>Foundation Fieldbus</i>	35
Figura 2.10: Modelo de comunicação <i>Foundation Fieldbus</i>	35
Figura 2.11: Redução dos custos de implantação de um projeto de rede.	37
Figura 2.12: Arquitetura da rede Profibus-PA com controlador exclusivo.	38
Figura 2.13: Arquitetura da rede sem fio para coleta de dados.	39
Figura 2.14: Arquitetura típica das primeiras redes sem fio industriais.	40
Figura 2.15: Tecnologia da rede sem fio atual.	41
Figura 2.16: Grandes grupos de sensores	43
Figura 2.17: Sistema integrado de sensoreamento.	44

Figura 2.18: Dispositivo MEMS.	44
Figura 3.1: Técnica do espalhamento espectral.....	47
Figura 3.2: Método de espalhamento espectral: DSSS.....	48
Figura 3.3: Método de espalhamento espectral: FHSS.....	48
Figura 3.4: Diagrama de radiação de uma antena helicoidal.	49
Figura 3.5: Ilustração dos equipamentos de rede: <i>devices</i>	51
Figura 3.6: Configuração de uma rede típica.	52
Figura 3.7: Ilustração dos equipamentos da rede: pontos de acesso.	53
Figura 3.8: Topologia de rede: ponto a ponto.....	54
Figura 3.9: Topologia de rede: estrela.....	54
Figura 3.10: Topologia de rede: árvore.	56
Figura 3.11: Topologia de rede: <i>mesh</i>	57
Figura 3.12: Topologia de rede: híbridas.....	59
Figura 3.13: Estrutura de transmissão – modo síncrono.....	62
Figura 3.14: Topologia básica da norma IEEE 802.15.4.	63
Figura 3.15: Funções dos dispositivos da rede IEC/PAS 62591.	65
Figura 3.16: Funções dos dispositivos da rede ISA 100.11a.	68
Figura 4.1: Requisitos de uma rede sem fio.....	70
Figura 4.2: Definição do protocolo em uma aplicação.....	71
Figura 4.3: Tecnologia de camadas ISO-OSI e suas funções.....	72
Figura 4.4: Exemplo do caminho seguido em uma comunicação.	73
Figura 4.5: Tempo de acesso ao meio de transmissão.....	75
Figura 4.6: Exemplo de roteamento em uma rede <i>mesh</i>	76

Figura 4.7: Requisitos de segurança.....	77
Figura 4.8: Passo a passo para implementar uma rede sem fio	78
Figura 4.9: Painéis de células solares.....	79
Figura 4.10: Gerador de energia piezoelétrico.	80
Figura 4.11: Micro-turbina confeccionada pela tecnologia MEMS.....	81
Figura 5.1: Planta geral de uma indústria sucroalcooeira.	83
Figura 5.2: Modelo 3D de um tanque de armazenagem de álcool.	84
Figura 5.3: Distribuição de instrumentos sem fio: unidade de tancagem.	86
Figura 5.4: Modelo 3D da unidade de leite de cal/produtos químicos.....	87
Figura 5.5: Distribuição de instrumentos sem fio: unidade de leite de cal/produtos químicos.....	88
Figura 5.6: Modelo 3D da unidade de fermentação.	90
Figura 5.7: Vista de planta: alta densidade de estrutura metálica.....	90
Figura A.1: Pirâmide de automação	99
Figura A.2: Níveis das redes de comunicação	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Padrões utilizados nas indústrias de processo.....	27
Tabela 2.2: Principais características da transmissão pneumática	28
Tabela 2.3: Padrões utilizados nas indústrias de processo.....	28
Tabela 2.4: Principais características da transmissão analógica eletrônica.....	31
Tabela 2.5: Dados transmitidos por instrumentos HART.	32
Tabela 2.6: Principais características da transmissão digital com fio - HART	34
Tabela 2.7: Principais características da transmissão digital com fio - FF	36
Tabela 2.8: Principais características da transmissão digital com fio – Profibus-PA.	38
Tabela 2.9: Efeitos transdutores por grupo de sensores	43
Tabela 3.1: Sub-divisões do espectro de RF.....	45
Tabela 3.2: Propriedades da tecnologia IEEE 802.15.4.....	63
Tabela 3.3: Funções específicas de cada camada	63
Tabela 3.4: Propriedades da tecnologia IEC/PAS 62591.....	66
Tabela 3.5: Classes de operação definidas pela ISA 100.11a.	67
Tabela 3.6: Propriedades da tecnologia ISA 100.11a.	69
Tabela 5.1: Características da rede: unidade de tancagem	85
Tabela 5.2: Dimensões dos tanques e vasos: unid. de leite de cal/prod.químicos....	87
Tabela 5.3: Características da rede: unidade de leite de cal/produtos químicos.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	- Agência Nacional das Telecomunicações
CLP	- Controlador Lógico Programável
CSMA-CA-	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DSSS	- <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
FCC	- <i>Federal Communications Commission</i>
FHSS	- <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FSK	- <i>Frequency Shifting Keying</i>
GTS	- <i>Guaranteed Time Slot</i>
HART	- <i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ISA	- <i>International Society of Automation</i>
ISM	- <i>Instrument, Scientific and Medical</i>
ISO-OSI	- Padrão de redes de comunicação - <i>Open System Interconnection</i>
MEMS	- Sistemas Micro-eleto-mecânicos
PAN	- <i>Personal Area Network</i>
QoS	- <i>Quality of Signal</i>
RF	- Rádio Frequência
SDCD	- Sistema Digital de Controle Distribuído
SSC	- Sistema de Supervisão e Controle

- TDMA - *Time Division Multiple Access*
- UHF - *Ultra High Frequency*
- UTR - *Unidade Terminal Remota*
- Wi-Fi - *Wireless Fidelity*
- WPAN - *Wireless Personal Area Network*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. MOTIVAÇÃO	18
1.2. OBJETIVO	20
1.3. METODOLOGIA DE PESQUISA	21
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2. REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1. CONCEITUAÇÃO DE INDÚSTRIAS DE PROCESSO	23
2.2. HISTÓRICO DA TRANSMISSÃO DE SINAIS DE CAMPO	24
2.3. TRANSMISSÃO PNEUMÁTICA	26
2.4. TRANSMISSÃO ANALÓGICA ELETRÔNICA	28
2.5. TRANSMISSÃO DIGITAL COM FIO	31
2.5.1. HART	32
2.5.2. FOUNDATION FIELDBUS	34
2.5.3. PROFIBUS-PA	36
2.6. TRANSMISSÃO DIGITAL SEM FIO	39
2.7. EVOLUÇÃO DOS SENSORES	42
3. CONCEITOS DA TRANSMISSÃO DIGITAL SEM FIO	45
3.1. TRANSMISSÃO DOS SINAIS	46
3.1.1. ESPALHAMENTO ESPECTRAL	46
3.1.2. ANTENAS	48
3.2. ARQUITETURA DE REDES	50

3.2.1. EQUIPAMENTOS DA REDE	50
3.2.2. TOPOLOGIAS DAS REDES	53
3.3. TECNOLOGIAS ATUAIS.....	59
3.3.1. IEEE802.15.4	60
3.3.2. IEC/PAS-62591 (WIRELESSHART).....	64
3.3.3. ISA 100.11A	66
4. REQUISITOS DA TRANSMISSÃO DIGITAL SEM FIO.....	70
4.1. ANÁLISE DOS REQUISITOS.....	74
5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	82
5.1. UNIDADE DE TANCAGEM	84
5.2. UNIDADE DE PREPARO DE LEITE DE CAL/PRODUTOS QUÍMICOS	86
5.3. UNIDADE DE FERMENTAÇÃO (DORNAS).	89
6. CONCLUSÃO	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICE A – PIRÂMIDE DE AUTOMAÇÃO	98

1. INTRODUÇÃO

Desde a invenção do transistor em 1947 até agora, inúmeros foram os avanços da eletrônica. Com o desenvolvimento do microprocessador em 1971, esses avanços então passaram a ser dados aos saltos.

Os transistores podem ser considerados uma das maiores invenções no ramo da eletrônica, pois sua utilização em microprocessadores substituiu uma enormidade de aplicações que até então eram realizadas por sistemas complexos e de grande porte.

Tudo isso, aliado à facilidade de construção dos componentes eletrônicos, fez com que sua tecnologia se desenvolvesse e atingisse preços de *commodities*.

Em menos de 25 anos os computadores atingiram fabricação em escala mundial e se tornaram um item fundamental no cotidiano de nossas vidas. E esse desenvolvimento atingiu também as indústrias.

Em indústrias de processo, malhas de controle, que eram puramente pneumáticas, passaram a ser controladas por dispositivos micro processados. Os controladores pneumáticos utilizados na década de 50 foram gradativamente sendo substituídos por *single-loop* e *multi-loops*¹.

Com o passar do tempo e o desenvolvimento constante dessa tecnologia, os controles de processo de malha simples, que se encontravam distribuídos ao longo da unidade, foram substituídos por sistemas integrados de controle, os CLP's e SDCD's², que concentravam todos os controles de processo da planta em um único microprocessador.

Essa evolução permitiu que os sistemas de controle ficassem integrados em um único equipamento, o que facilitou a supervisão das variáveis de processo pelos operadores, que não precisavam se deslocar pela unidade de processo para este fim.

¹ *Single-loop* e *multi-loops* foram os primeiros dispositivos eletrônicos que controlavam, respectivamente, uma e múltiplas malhas de controle fechada.

² CLP's e SDCD's: Controlador Lógico Programável e Sistema Digital de Controle Distribuído

Para que esta implementação centralizada funcionasse a contento, além da evolução tecnológica dos controladores, todos os componentes de uma malha de controle também tiveram de ser desenvolvidos, conforme exemplificado na figura 1.1.

Figura 1.1: Malha de controle de processo e seus componentes.

Os instrumentos de medição das variáveis do processo, assim como os dispositivos de atuação no processo, passaram a ser basicamente eletrônicos. Isso, além de melhorar a qualidade da medição da variável e da precisão da atuação, melhorou a conversão do sinal medido para sinal digital, e conseqüentemente, melhorou a qualidade da transmissão do sinal obtido.

O sinal pneumático, até então levado por um *tubing*⁴ de aço inox ou vinil, fora substituído por um par de condutores de cobre para a transmissão do sinal elétrico, no qual predominou o padrão analógico de 4 a 20mA.

A confiabilidade e segurança que se obteve com a transmissão de sinais de campo em 4 a 20mA fizeram com que este se tornasse padrão para a transmissão de sinais.

Por muito tempo, o envio de apenas uma informação (a variável medida) por instrumento foi suficiente para as indústrias. Entretanto, quando no final da década

³ SSC: Sistema de Supervisão e Controle, contempla o CLP ou SDCD e os computadores de supervisão e operação.

⁴ *Tubing* é o nome dado para tubos de diâmetros usualmente entre 1/4" e 3/8" que tem a função de transportar ar para os instrumentos.

de 80, a *HART⁵ Foundation* desenvolveu um protocolo capaz de sobrepor um sinal digital sobre o analógico, o padrão de comunicação passou de puramente analógico para digital e, com isso, mais de uma informação poderia ser transmitida por instrumento.

Esse protocolo revolucionou a indústria, pois fornecia informações das mais variadas sobre o instrumento (valores de calibração, data da última calibração, qualidade da medida e defeito no próprio instrumento, dentre outros) e não somente a variável medida. Com isso, a indústria não somente teria o controle da unidade, em termos de controle das malhas, mas passaria a controlar seus ativos, podendo prever manutenção e substituição de partes defeituosas antes delas virarem possíveis falhas.

Por muito tempo essa transmissão digital superimposta no sinal analógico reinou absoluta até meados de 1980 quando foi implementada a primeira rede puramente digital de instrumentos de campo. Essa evolução trouxe um ganho de economia nas instalações e na capacidade de ampliação do parque instalado nas indústrias de processo, assim como uma maior quantidade e qualidade de informações obtidas dos instrumentos. Atualmente, existem dezenas de protocolos digitais de comunicação de rede; entre eles possuem maior destaque: o *Modbus-RTU*, *Profibus DP* e *Fieldbus Foundation*⁶.

Nos dias do hoje, a tecnologia que está sendo amadurecida e muito provavelmente será difundida em aplicações nas indústrias de processo é o meio de transmissão sem fio. Apesar destas já existirem como meio de comunicação entre sistemas puramente de aquisição de dados (rádio-enlace e transmissões via satélite), a nova tecnologia digital de redes sem fio interligará instrumentos ao SSC, com a promessa de substituir as atuais tecnologias de transmissão de sinais de campo.

A tecnologia de transmissão industrial sem fio pode ser considerada um desdobramento dos atuais protocolos comerciais como o Wi-Fi⁷ e o Bluetooth⁸, já que possuem a mesma estrutura de transmissão baseada nas camadas ISO-OSI⁹,

⁵ HART: *Highway Addressable Remote Transducer*, marca registrada da *HART Communication Foundation*.

⁶ Modbus-RTU, Profibus DP e Fieldbus Foundation (FF) são protocolos digitais de comunicação de redes.

⁷ Wi-Fi: Nome comercial de redes sem fio desenvolvidas sob os protocolos IEEE 802.11a/b/g/n.

⁸ Bluetooth: Nome comercial de redes sem fio desenvolvidas sob o protocolo IEEE 802.15.1.

⁹ ISO-OSI: Estrutura de camadas na qual foi desenvolvida as redes fiada e sem fio.

as mesmas frequências de operação e as técnicas de espalhamento espectral¹⁰. Entretanto, essa tecnologia apresenta as vantagens de ser otimizada para a indústria, se preocupando com questões como segurança operacional, consumo de energia, custo e confiabilidade.

Neste trabalho se irá elucidar o conceito de redes sem fio entre os sensores e atuadores, figurada entre os níveis 0 e 1 da pirâmide de automação¹¹ e mostrar as oportunidades de ganho e os desafios a serem vencidos, a fim de se obter um correto uso dessa tecnologia. Entre os ganhos que podem ser obtidos, pode-se citar: a redução de custos de instalação, manutenção e gerenciamento da rede. Dentre os desafios a serem superados, cita-se: a insegurança dos usuários frente a essa nova tecnologia, conforme pode ser observado em Schweitzer (2008) “os usuários ainda estão confusos quanto às potencialidades e às ciladas que um mundo *wireless* pode oferecer”.

Por se tratar de tecnologia incipiente, as redes industriais ainda estão em fase de consolidação de normalização e aceitação no mercado. Na atualidade, despontam a norma ISA100.11a e a WirelessHART¹² como sendo as que possuem aceitação no mercado industrial e que tentam uma forma de coexistir, buscando para isso a interoperabilidade entre elas.

Vale ressaltar que todos os tipos de transmissão (exceto a pneumática) perduram até hoje instalados nas indústrias de processo ao redor do mundo e a transmissão sem fio, mesmo incipiente, já aparece instalada e funcionando em algumas aplicações esporádicas.

1.1. MOTIVAÇÃO

A transmissão de dados sem fio se faz presente hoje no cotidiano de nossas vidas. Segundo Rackley (2007), uma das tecnologias que mais se desenvolveu no início do século XXI é a rede sem fio. De fato, vive-se hoje em um mundo conectado

¹⁰ Uma explicação detalhada do funcionamento do espalhamento espectral pode ser obtida no Capítulo 3.

¹¹ Para mais detalhes sobre pirâmide de automação, vide Apêndice A.

¹² ISA100.11a e WirelessHART são protocolos de comunicação de redes sem fio.

por dispositivos sem fio, celulares, *palmtops*, *laptops*, *gateways*¹³ etc, todos conectados de alguma forma (por alguma tecnologia) entre si.

Essa nova tecnologia ainda está em fase de amadurecimento e, por isso, constantes mudanças ainda são realizadas para se atingir índices de desempenho cada vez mais elevados. Entretanto, esses avanços tecnológicos estão acontecendo cada vez em menos tempo, como pode ser evidenciado na figura 1.2.

Figura 1.2: Evolução das tecnologias Wi-Fi.

A evolução mostrada na figura 1.2 pode ser facilmente constatada quando comparada ao início das comunicações entre computadores, a Internet, datada do início da década de 80.

As indústrias de processo, motivadas pela necessidade global de operar em níveis cada vez mais competitivos, direcionam seus esforços para atingir níveis de excelência nos quesitos de qualidade de seus produtos e produtividade de suas unidades de processo. Nesse cenário, as indústrias devem encontrar novas formas de otimizar a capacidade de produção e segurança, enquanto minimiza custos e aumenta a vida operacional dos equipamentos novos e existentes (MANGES; ALLGOOD, 1999).

¹³ Gateway: dispositivo responsável por conectar dispositivos de protocolos diferentes.

Com esse foco, sistemas de instrumentação sem fio podem ajudar as indústrias de processo a alcançarem suas metas de competitividade. Para ratificar essas considerações, segundo o Comitê de Conselheiros em Ciência e Tecnologia do Governo dos Estados Unidos (apud Industrial Wireless Technology for the 21st Century, 2002, p.1) “o desenvolvimento de sensores sem fio aumentariam a eficiência da produção em torno de 10% e reduziriam as emissões (*de gases provenientes das indústrias*)¹⁴ em níveis maiores de 25%”.

A competitividade que os instrumentos sem fio trazem para a indústria consiste no fato da substituição da tecnologia atual fiada. Sistemas de instrumentação com fios possuem altos custos de instalação, comissionamento e partida, altos custos de manutenção e expansão e uma alta taxa de falha em conectorização mal feita nos pontos de conexão em painéis.

1.2. OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é estudar a transmissão de sinais das redes de instrumentos sem fio, suas topologias, seus protocolos, suas vantagens e desvantagens, com o intuito de avaliar sua possível utilização nas indústrias de processo, tanto para supervisão como para controle de suas variáveis. Primeiramente, será localizada historicamente essa nova tecnologia, realizando um estudo da evolução dos sinais de transmissão industrial e, posteriormente, serão abordadas as redes sem fio existentes no mercado, focando o estudo nas aptas para a indústria de processo, como o WirelessHART e a nova ISA 100.11a, que pretende se consolidar como a norma de referência em redes sem fio industriais.

Faz-se necessário ressaltar que este trabalho se concentrará apenas nas necessidades das indústrias de processo como segurança, confiabilidade, desempenho e baixo consumo de energia, que possuem requisitos diferentes das indústrias de manufatura, que possuem um tempo bem menor de resposta dos instrumentos.

¹⁴ Grifo nosso

1.3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Esta dissertação está sendo elaborada com base em livros e artigos técnicos obtidos nas fontes de pesquisa usualmente conhecidas como “Web of Science”, Compendex e Portal Capes de Periódicos, além da biblioteca da Poli-USP. Nessas buscas, artigos publicados por entidades como IEEE e ISA e em revistas como *Process Automation* e *Control Engineering* foram utilizados.

Além das pesquisas bibliográficas, a avaliação técnica das redes sem fio se baseará nos estudos das normas de transmissão WirelessHART e ISA100.11a, além de analisar casos práticos de instalações pilotos e alguns pareceres de usuários do mercado.

As normas técnicas serão estudadas e confrontadas entre si, sendo realizada uma breve comparação entre as mesmas, destacando-se suas características.

Exemplos de aplicação de um sistema sem fio em uma área da indústria será realizado, com base na documentação de projeto desta unidade.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2, descreve-se a história das transmissões de sinal usualmente utilizadas nas indústrias de processo, mostrando sua evolução ao longo dos anos, iniciando pela transmissão pneumática de 3 a 15 psi, passando pela transmissão analógica de 4 a 20mA, pela transmissão digital *fieldbus* até culminar na atual transmissão digital sem fio.

No capítulo 3, se discorrerá sobre o estado da arte das transmissões sem fio, descrevendo suas tecnologias, suas arquiteturas possíveis, seus componentes de rede e seus requisitos fundamentais de funcionamento. Também neste capítulo se realizará um estudo comparativo das tecnologias de transmissão sem fio mais aptas a indústrias de processos.

No capítulo 4, se discorrerá com relação aos requisitos, vantagens e desvantagens, oportunidades de utilização e os cuidados que devem ser levados em consideração na implementação de redes dessa natureza. É neste capítulo que se

avaliará os novos desenvolvimentos dessa tecnologia com relação ao consumo de energia.

No capítulo 5, será mostrado uma implementação dos instrumentos sem fio em uma unidade industrial, ilustrando de que forma podemos obter uma instalação adequada desses instrumentos.

E por fim, no capítulo 6, se apresentarão as conclusões, as contribuições deste trabalho e a possibilidade de desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. CONCEITUAÇÃO DE INDÚSTRIAS DE PROCESSO

As indústrias, de um modo geral, podem ter seus processos de fabricação divididos em dois sub-grupos: automação de fábrica e automação de processo.

A automação de fábrica, também denominada de manufatura, usualmente corresponde a galpões fechados, com um parque de máquinas e equipamentos que possuem a finalidade de construir produtos acabados. Neste tipo de indústria, a movimentação de máquinas, matérias-primas e produtos é constante e muitas vezes necessária para que o processo de produção seja realizado.

Por outro lado, a automação de processo, denominada simplesmente de indústria de processo, geralmente possui seu parque instalado em áreas externas devido ao tamanho de seus equipamentos. Sua produção é baseada principalmente na alteração da composição química de suas matérias-primas, geralmente em estado fluidizado (gás ou líquido), obtendo um novo produto. Como o estado de trabalho do seu produto se encontra fluidizado, ao contrário da indústria de manufatura cujo transporte de materiais ocorrem na maior parte do tempo por esteiras, nesse tipo de indústria o transporte é realizado por tubos e armazenados e processados em vasos de pressão, torres de separação, reatores etc.

Por se tratar de indústrias com características diferentes, o processo de cada uma necessita de requisitos específicos com relação aos instrumentos utilizados na medição da produção e no sistema de controle do processo produtivo.

Na indústria da manufatura predominam os sensores dos mais variados tipos e tamanhos, utilizados para: contar peças, verificar alinhamentos de esteiras e produtos, definir limites de posição, medir o tamanho de uma peça etc; tendo como requisito principal seu baixo tempo de resposta.

Por outro lado, a indústria de processos não possui uma grande variedade de variáveis a serem monitoradas. A grande maioria dos sensores de medição devem ser capaz de medir as quatro grandes variáveis desse tipo de indústria: temperatura,

pressão, vazão e nível. Sabe-se que as variáveis em uma indústria de processos não se limitam a apenas essas quatro, e que medições utilizadas para obter parâmetros de qualidade do produto, classificadas como variáveis analíticas, também são realizadas. Nesse tipo de medição estão incluídos os medidores de pH, condutividade, densidade, análise da composição e/ou concentração de produtos etc; entretanto, estas medições compõem a menor parcela de instrumentos de uma unidade de processo, enquanto que os quatro grandes grupos de variáveis correspondem à esmagadora totalidade de instrumentos instalados.

Apesar dos conceitos que abrangem este trabalho serem aplicados em quaisquer das indústrias descritas, seu estudo, sua análise e sua exemplificação se fundamentarão na indústria de processos.

A figura 2.1 mostra um quadro comparativo desses dois tipos de indústria.

Tipo de Indústria:	
<u>automação de fábrica</u>	<u>automação de processo</u>
- manufatura	- processo contínuo
- galpões fechados	- áreas externas
- produtos acabados (peças)	- produtos fluidizados (líquido/gás)
- transporte por esteiras	- transporte por tubos
- movimentação máquinas	- armazenagem em vasos/torres
- movimentação produtos	
Principais variáveis:	
<u>automação de fábrica</u>	<u>automação de processo</u>
- sensores dos mais variados	- 4 grandes variáveis
- contar peças	- temperatura
- verificar alinhamentos	- pressão
- definir posições de peças	- vazão
	- nível

Fonte: Riego, 2009

Figura 2.1: Quadro comparativo dos tipos de indústria.

2.2. HISTÓRICO DA TRANSMISSÃO DE SINAIS DE CAMPO

As indústrias de processos, antes de 1940, eram operadas manualmente por operadores locais que trabalhavam de forma descentralizada ao longo da unidade. Dessa forma, além de uma quantidade enorme de profissionais necessários para operar uma fábrica, o controle das malhas era uma tarefa nada padronizada, como

pode ser observado na figura 2.2 e exigia um enorme esforço por parte dos operadores de área.

A introdução da teoria de transmissão de sinais, a telemetria, que consiste na transmissão padronizada de informações baseada no conceito de um transmissor e um receptor de sinais (CONSIDINE, 1985, p.16.27), gerou algumas vantagens para a indústria de processo. Dentre estas, pode-se citar as transmissões remota e padronizada e as operações de controle das malhas consolidadas em um único local, garantindo assim que os sinais medidos fossem transmitidos a uma sala de controle central. Além do disposto acima, tanto os transmissores quanto os receptores de sinais (indicadores, controladores e registradores) puderam ser padronizados, permitindo uma flexibilidade de utilização.

Figura 2.2: Controle manual de uma planta de processo.

Conforme ilustrado na figura 2.3, as transmissões de sinais foram evoluindo ao longo do tempo, conforme é mostrado ao longo deste capítulo, tendo atingido a maturidade da tecnologia de transmissão de dados digitais e surgindo ainda incipiente a tecnologia de transmissão de dados sem fio.

Figura 2.3: Maturidade das tecnologias de transmissão.

2.3. TRANSMISSÃO PNEUMÁTICA

O primeiro método de transmissão de sinal utilizado nas indústrias de processo foi a transmissão pneumática, por volta de 1940. Esse tipo de transmissão, como o próprio nome diz, consiste em enviar informações analógicas através da pressão do ar.

Em um sistema pneumático de transmissão, o transmissor, localizado no campo, converte uma grandeza física do processo, como pressão ou temperatura, em uma pressão pneumática proporcional. No caso de uma malha pneumática de controle fechada, o controlador, respondendo ao sinal medido transmitido, envia o sinal de retorno ao campo para atuar sobre um elemento final de controle, como uma válvula de controle operada pneumaticamente. (CONSIDINE, 1985, p.16.27)

Além da centralização do controle, a transmissão pneumática possui algumas vantagens se comparada com a transmissão eletrônica, conforme descrito abaixo e ilustrado na figura 2.4:

- Instrumentos pneumáticos são inerentemente à prova de explosão, enquanto que instrumentos eletrônicos devem atender a restritivas especificações de segurança para uso em áreas eletricamente classificadas.
- Sistemas pneumáticos oferecem proteção contra falha de energia, uma vez que, com a instalação de reservatórios de ar comprimido, garantem o funcionamento das malhas em uma eventual queda de energia.

- Sistemas pneumáticos são atuados diretamente com válvulas operadas a ar, que são os elementos finais de controle mais utilizados nas indústrias de processo.

Figura 2.4: Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão pneumática.

Como toda nova tecnologia, inúmeros padrões de sinais foram desenvolvidos, como pode ser observado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Padrões utilizados nas indústrias de processo

Faixas de operação de sinais pneumáticos			
3	a	15 psig	20,68 a 103,42 N/m ²
3	a	27 psig	20,68 a 186,16 N/m ²
6	a	30 psig	41,36 a 206,84 N/m ²
0,2	a	1,0 kgf/cm ²	19,61 a 98,04 N/m ²
0,2	a	1,0 bar	19,99 a 99,97 N/m ²
0,2	a	100 kPa	19,99 a 99,97 N/m ²

Fonte: Considine, 1985.

Por necessidade de uma maior padronização com relação à faixa de operação dos sinais a serem utilizados, a ISA, por meio da publicação da norma S7.4 de 1981, padronizou os sinais de 3 a 15 psig e 3 a 27 psig, tendo o primeiro alcançado a preferência de utilização entre os usuários.

A tabela 2.2 ilustra as principais características deste tipo de transmissão.

Tabela 2.2: Principais características da transmissão pneumática

Características da tecnologia	
Topologia	Ponto a ponto
Meio Físico	Tubing
Energia para funcionamento	Ar de instrumento
Tipo de Controle	Local
Tipo de Manutenção Permitida	Corretiva; Preventiva
Padrões	ISA S7.4
Observação	Não disponível atualmente

Fonte: Riego, 2009.

2.4. TRANSMISSÃO ANALÓGICA ELETRÔNICA

Conforme citado no capítulo 1, com a evolução no campo da eletrônica na década de 70, consolidava-se a transmissão analógica eletrônica do sinal medido, baseada na mesma teoria de telemetria, mas agora não mais transmitido por sinais de ar através de *tubings*, mas por sinais de corrente ou tensão através de cabos de cobre.

Como no sistema de transmissão pneumática, era essencial uma faixa padronizada de valores que permitisse a padronização dos dispositivos de transmissão e recepção. Inúmeros foram os padrões dos sinais, como pode ser observado na tabela 2.3, e da mesma forma que o 3 a 15 psig foi adotado como padrão na transmissão pneumática, na transmissão eletrônica reinou absoluto o padrão 4 a 20mA, sendo padronizado pela ISA SP-50 em 1975.

Tabela 2.3: Padrões utilizados nas indústrias de processo.

Faixas de operação de sinais eletrônicos			
0	a	5 Vdc	0 a 25 mA
1	a	5 Vdc	1 a 5 mA
0	a	10 Vdc	10 a 50 mA
0	a	20 mA	4 a 20 mA

Fonte: Considine, 1985.

Com a transmissão eletrônica, os instrumentos passaram a ser interligados conforme indicado a seguir e ilustrado na figura 2.5:

- Instrumentos a 2 fios: os transmissores são alimentados e transmitem o sinal medido pelo mesmo par de condutores;
- Instrumentos a 3 fios¹⁵: os transmissores são alimentados por um condutor e transmitem o sinal medido por outro condutor, mantendo um retorno comum entre ambos;
- Instrumentos a 4 fios: os transmissores são alimentados por um par de condutores e transmitem o sinal medido por outro par de condutores, separadamente.

Figura 2.5: Formas de interligação de instrumentos com transmissão eletrônica.
a) 2 fios; b) 3 fios; c) 4fios.

¹⁵ Não está sendo considerado sensores nesta caracterização, apenas a alimentação dos transmissores.

Com ganhos de velocidade de resposta, robustez na transmissão do sinal, facilidade e diminuição do custo das instalações, a transmissão eletrônica gradativamente substituiu a transmissão pneumática. Novos controladores de malhas de processo foram surgindo, o controle passou a ser centralizado nas unidades e a ser puramente eletrônico, conforme pode ser observado na figura 2.6.

Figura 2.6: Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão eletrônica.

O aumento da qualidade dos sensores trouxe confiabilidade na medição e aliado à robustez da transmissão analógica eletrônica, fez com que este tipo de transmissão perdurasse até os dias de hoje, sobrevivendo à entrada das novas tecnologias de transmissões digitais. Isto, em parte, se deve ao surgimento da tecnologia de transmissão digital denominada HART, um protocolo de transmissão digital superimposto na transmissão analógica 4 a 20mA.

A tabela 2.4 ilustra as principais características deste tipo de transmissão.

Tabela 2.4: Principais características da transmissão analógica eletrônica

Características da tecnologia	
Topologia	Ponto a ponto
Meio Físico	Cabo de cobre (par trançado)
Energia para funcionamento	Energia elétrica + ar de instrumento
Tipo de Controle	Local ou Remoto
Tipo de Manutenção Permitida	Corretiva; Preventiva
Padrões	ISA SP-50
Observação	Disponibilidade de produtos reduzida

Fonte: Riego, 2009.

2.5. TRANSMISSÃO DIGITAL COM FIO

Devido aos avanços da eletrônica, como mencionado no capítulo anterior, os sensores começariam a desempenhar um papel de fundamental importância, evoluindo de simples células de conversão de grandezas para sistemas integrados de medição, processamento e transmissão de sinais. A partir de então, a evolução das tecnologias de transmissão dos sinais fica intrinsecamente associada à evolução dos sensores, conforme elucidado na seção 2.7.

A evolução da eletrônica dos sensores, fazendo com que atingissem a categoria de sensores micro processados inteligentes, contribuiu para a inserção do primeiro sinal digital nos instrumentos de campo, o HART. Este protocolo, desenvolvido na década de 80, foi seguido bem mais tarde por inúmeros outros protocolos, puramente digitais (que não utilizavam o sinal 4 a 20mA como portadora).

A figura 2.7 mostra a base instalada dos protocolos digitais de comunicação na indústria de processos.

Figura 2.7: Base instalada de protocolos digitais de comunicação industrial com ênfase na indústria de processos.

2.5.1. HART

Este novo protocolo representou um enorme avanço na indústria, pois possibilitou obter uma série de informações dos instrumentos e não apenas a variável medida do processo. Essas informações, como algumas listadas na tabela 2.5, passaram a ser utilizadas não somente pelos operadores da unidade, mas também pelas áreas de manutenção e automação.

Tabela 2.5: Dados transmitidos por instrumentos HART.

Dados Digitais	35 a 40 itens de dados padronizados em cada dispositivo HART.
Identificação do dispositivo	Tag do instrumento, fornecedor, tipo, revisão e número serial.
Dados de calibração	Valores de calibração, limites superiores e inferiores do sensor e data da calibração.
Variável do processo	Variável principal e medições secundárias.
Status/diagnósticos/alertas	Mau funcionamento, alteração de configuração, reinício automático por perda de energia, alarmes de variável fora de limites, erro de comunicação.

Fonte: Hart Comm, 2008.

O princípio de funcionamento desse protocolo está representado na figura 2.8 e possui as seguintes características:

- Mestre / escravo¹⁶ bidirecional;
- Modo de transmissão baseada na tecnologia FSK¹⁷;
- Velocidade de transmissão de 1200bps¹⁸.

Figura 2.8: Princípio da transmissão digital superimposta HART.

Apesar da vantagem do HART em levar informações não somente da variável medida, mas de diagnósticos para a sala de controle, sua forma de instalação não evoluíra em nada com relação às transmissões analógicas de 4 a 20mA. Pelo contrário, para poder ler o sinal digital contido no analógico, era necessário um dispositivo adicional ao sistema já existente, que permitisse a filtragem do sinal digital.

Essa lacuna de desenvolvimento aberta pelo protocolo HART e a consolidação das tecnologias de redes comerciais (Internet), fomentaram o desenvolvimento dos primeiros e exclusivos protocolos digitais de campo, os chamados *Field buses*. Com a intenção de situar este trabalho no tempo, apenas os

¹⁶ Tipo de comunicação entre o transmissor e o controlador.

¹⁷ FSK: *frequency shift keying*.

¹⁸ bps: bits por segundo, uma medida de velocidade da transmissão de dados.

dois mais importantes protocolos de campo utilizados nas indústrias de processo são ilustrados: o Foundation Fieldbus e o Profibus-PA¹⁹.

A tabela 2.6 ilustra as principais características desse tipo de transmissão.

Tabela 2.6: Principais características da transmissão digital com fio - HART

Características da tecnologia	
Topologia	Ponto a ponto
Taxa de Transferência	1,2kbps
Modo de transmissão	FSK
Controle de tráfego	Mestre-escravo
Complexidade de implementação	Baixa
Meio Físico	Cabo de cobre (par trançado)
Energia para funcionamento	Energia elétrica + ar de instrumento
Tipo de Controle	Local ou Remoto
Tipo de Manutenção Permitida	Corretiva; Preventiva; Preditiva
Padrões	HART Foundation
Observação	Possibilita o Gerenciamento de Ativos

Fonte: Riego, 2009.

2.5.2. FOUNDATION FIELDBUS

O protocolo de comunicação *Foundation Fieldbus* – trouxe o conceito de implementar o controle das malhas de processo diretamente nos instrumentos de campo, diminuindo assim o tempo de resposta da malha e possibilitando uma redução dos custos de implantação de hardware, uma vez que não se fazia mais necessário os CLP's ou SDCD's²⁰ para controlá-las.

O conceito de redes digitais de campo trouxe um avanço com relação à forma com que os instrumentos eram interligados. Como pode ser observado no desenho das topologias possíveis de configuração da rede, figura 2.9, as ligações dos instrumentos deixaram de ser realizadas somente ponto a ponto, representando uma inovação na forma com que os instrumentos eram interligados e utilizados.

¹⁹ Foundation Fieldbus e Profibus-PA são protocolos de comunicação de redes digitais com fio.

²⁰ Apesar de viável, a alternativa de não possuir um controlador central para controle das malhas ainda é pouco utilizada pelas indústrias de processo.

Figura 2.9: Topologia da rede *Foundation Fieldbus*.

O princípio de funcionamento desse protocolo está representado na figura 2.10 e possui as seguintes características:

- *Token - pass*²¹ bidirecional;
- Modo de transmissão adaptada da tecnologia ISO-OSI²²;
- Velocidade de transmissão de 31,25kbps.

Fonte: Foundation Fieldbus, 2009.

Figura 2.10: Modelo de comunicação *Foundation Fieldbus*.

²¹ Tipo de comunicação entre o transmissor e o controlador.

²² ISO-OSI: camadas de rede Open System Interconnection, padrão de estruturação utilizada pela Internet.

O protocolo *Foundation Fieldbus* demorou para ser desenvolvido em sua totalidade e padronizado. Seu desenvolvimento foi iniciado com a fundação do comitê SP-50 da ISA na década de 1980, mas foi somente em 1995 que foi emitida, em caráter preliminar, a norma ANSI/ISA-50.02. Durante esse período, na ausência de uma padronização, outras entidades também desenvolviam seus protocolos e, em 1995, o PROFIBUS chegava às indústrias de processo.

A tabela 2.7 ilustra as principais características desse tipo de transmissão.

Tabela 2.7: Principais características da transmissão digital com fio - FF

Características da tecnologia	
Topologia	Ponto a ponto; Estrela; Corrente; Árvore
Taxa de Transferência	31,25kbps
Controle de tráfego	Token-pass
Complexidade de implementação	Média
Meio Físico	Cabo de cobre específico
Energia para funcionamento	Energia elétrica + ar de instrumento
Tipo de Controle	Local ou Remoto
Tipo de Manutenção Permitida	Corretiva; Preventiva; Preditiva
Padrões	ANSI/ISA-50.02
Observação	Possibilita o controle total dos instrumentos

Fonte: Riego, 2009.

2.5.3. PROFIBUS-PA

Formado por um consórcio de empresas e instituições em 1989, analogamente ao *Foundation Fieldbus*, o desenvolvimento do Profibus-PA tinha por objetivo principal a redução dos custos de implantação de uma rede, atingindo os aspectos de engenharia de projeto, quantidade de materiais e hardware e redução no tempo de comissionamento e partida das unidades de processo. Conforme se pode notar na figura 2.11, estima-se uma redução de custos de implantação da ordem de 40% em substituição à instalação padrão analógica.

Figura 2.11: Redução dos custos de implantação de um projeto de rede.

A topologia da rede também pode ser representada pela figura 2.9 e seu princípio de funcionamento possui as seguintes características:

- Mestre-escravo bidirecional;
- Modo de transmissão adaptada da tecnologia ISO-OSI;
- Velocidade de transmissão de 31,25kbps.

A diferença principal do Profibus em relação ao Fieldbus Foundation é a necessidade de se manter o controle das malhas de processo exclusiva em um controlador (CLP ou SDCCD) centralizado, conforme ilustrado na figura 2.12.

Figura 2.12: Arquitetura da rede Profibus-PA com controlador exclusivo.

A tabela 2.8 ilustra as principais características desse tipo de transmissão.

Tabela 2.8: Principais características da transmissão digital com fio – Profibus-PA

Características da tecnologia	
Topologia	Ponto a ponto; Estrela; Corrente; Árvore
Taxa de Transferência	31,25kbps
Controle de tráfego	Mestre-escravo
Complexidade de implementação	Média
Meio Físico	Cabo de cobre específico
Energia para funcionamento	Energia elétrica + ar de instrumento
Tipo de Controle	Remoto
Tipo de Manutenção Permitida	Corretiva; Preventiva; Preditiva
Padrões	IEC 61158/IEC 61784-1
Observação	Possibilita o controle total dos instrumentos

Fonte: Riego, 2009.

2.6. TRANSMISSÃO DIGITAL SEM FIO

Apesar da tecnologia sem fio na indústria de processos datar do início da década de 2000, sua utilização pela indústria para aquisição de pontos e telemetria já era bastante difundida em meados do século passado. Seu princípio de funcionamento consiste em um transmissor e um receptor inteligente, um concentrador de sinais e um sistema de tratamento dos dados, conforme ilustrado na figura 2.13.

Figura 2.13: Arquitetura da rede sem fio para coleta de dados.

Na área industrial, as pioneiras redes sem fio eram as transmissões de dados entre sistemas de controle, inicialmente sendo trafegadas informações entre controladores, na maioria das vezes na topologia de rede estrela, conforme ilustrada na figura 2.14. Constata-se que as transmissões se concentravam no Nível 2 da Pirâmide de Automação, conforme explicado no Apêndice A.

Apesar de proprietária, esse tipo de aplicação se fazia economicamente viável para transmissões de longa distância, como aquisições de dados de um parque de tanques ou em um sistema central de monitoração e controle de gasodutos e estações de medição.

²³ UTR: Unidade Terminal Remota, dispositivo para leitura de sinais, tratamento e transmissão de dados.

Figura 2.14: Arquitetura típica das primeiras redes sem fio industriais.

Da década de 70 até o início da de 90, a crescente demanda por conectividade sem fio poderia apenas ser obtida por uma pequena alternativa de *hardwares* a preços elevados, baseados em tecnologias proprietárias, que não ofereciam interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes e não possuíam mecanismos eficientes de segurança (Rackley, 2007).

De acordo com Caro (2008), as mudanças das redes de dados ocorridas nos últimos cinco anos foram mais drásticas do que as ocorridas com o rádio no último século. Essa evolução tecnológica, aliada à crescente necessidade de competitividade na indústria, criou um nicho de mercado para a utilização das redes de dados sem fio nos instrumentos de campo, conforme ilustrado na figura 2.15.

Essa evolução ampliou o alcance das transmissões sem fio de apenas o Nível 2 para também o Nível 1 da Pirâmide de Automação, o que introduziu uma maior flexibilidade de implementação. Essa flexibilidade pode ser obtida em virtude do desenvolvimento de uma estrutura de comunicação, baseada em protocolos abertos e voltados à utilização.

Figura 2.15: Tecnologia da rede sem fio atual.

A partir deste ponto, decidir de que forma implementar uma rede sem fio começou a fazer parte da escolha do usuário, agora não mais fixo a um determinado modelo de projeto, mas com tecnologia que permita projetar redes de arquiteturas variadas, conforme explicado no capítulo seguinte.

Como pode ser evidenciado pela figura 2.15, este estudo se concentrará nas redes sem fio ao nível dos sensores e atuadores, que se mostrarão aptas a funcionar nas classes de operação de monitoração e controle de processos industriais. É importante ressaltar que sob nenhum propósito, este estudo visa substituir as classes de operação de segurança do processo, ainda realizado via *hardwired* (4-20mA).

Essa nova tecnologia, portanto, aponta à indústria um leque de características (vantagens/desvantagens) e desafios, tais como:

- Redução dos custos com cabos, caixas de junção e materiais de instalação;
- Diminuição do tempo de montagem, comissionamento, partida e manutenção da planta;
- Diferentes possibilidades de topologia, incluindo o conceito *Mesh*;
- Necessidade de um maior controle aos dados transmitidos;
- Susceptibilidade a ruídos e interferências eletromagnéticas;
- Necessidade de diminuir o consumo de energia nos instrumentos.

No próximo capítulo, se irá estudar os principais conceitos das transmissões sem fio, consolidando uma base de conhecimento necessária ao entendimento do capítulo 4, quando então se irá estudar os requisitos das transmissões sem fio. No item 3.3 descreve-se o estado atual das tecnologias que mais se adéquam às indústrias de processo.

2.7. EVOLUÇÃO DOS SENSORES

Conforme definição, sensor é todo dispositivo que responde a um estímulo físico ou químico (tal como calor, luz, som, pressão, campo magnético, movimento) e transmite o resultado para um sistema de medida ou controle.

Construído com base no elemento silício, um sensor é um semicondutor que possui suas características corretamente manipuladas e seus efeitos maximizados. Dentre algumas características que fizeram do silício a escolha para a construção dos sensores, pode-se destacar:

- Excelentes propriedades mecânicas;
- Efeitos transdutores disponíveis;
- Tamanho reduzido e possibilidade de co-integração de sensores e eletrônica;
- Baixo custo para alta escala de produção.

Os sensores podem ser divididos em cinco grandes grupos: Térmicos, Mecânicos, Magnéticos, Radiantes e (Bio)Químicos, conforme ilustrado na figura 2.16 e seus efeitos transdutores listados na tabela 2.9.

Figura 2.16: Grandes grupos de sensores

Tabela 2.9: Efeitos transdutores por grupo de sensores

Grupos de sensores	Efeitos transdutores
Térmico	Seebeck, Nerst
Mecânico	Piezo-resistivo, piezojunção
Radiante	Foto-voltaico, fotocondutivo, foto-elétrico
Magnético	Hall, magneto-resistência
(Bio)Químico	Galvânico, condução eletrolítica

Fonte: Fruett, 2009.

Durante muito tempo, os sensores limitavam-se a cumprir os papéis de transdutores de sinais entre o mundo real (grandezas físicas) e o mundo virtual (sistema de processamento). Os sinais convertidos eram processados por uma eletrônica desenvolvida separadamente, montada em um mesmo invólucro. A evolução dos sensores seguia a evolução da microeletrônica, e os avanços dos circuitos integrados, contribuíram para aumentar a capacidade de processamento de informação e diminuir seu consumo de energia e seu tamanho.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, como é o caso das MEMS (Sistemas Micro-eleto-mecânicos), estruturas microscópicas passaram a ser possíveis de serem construídas e os sensores evoluíram para sistemas sensores, incluindo em um mesmo substrato de silício, a parte sensorial, o processamento e a parte de atuação, conforme ilustrado na figura 2.17. Esses sistemas são capazes de

processar vários sensores e vários atuadores ao mesmo tempo, significando uma capacidade maior de processamento para um consumo menor de energia.

Fonte: Gardner, 1994.

Figura 2.17: Sistema integrado de sensoreamento.

Com o advento da tecnologia sem fio, os sistemas sensores ganharam mais uma função, incorporar em seu sistema de sensores inteligentes, o módulo de transmissão de rádio frequência – o que viria a impulsionar o desenvolvimento das redes sem fio.

A figura 2.18 ilustra a capacidade desta nova tecnologia (MEMS) em produzir dispositivos cada vez menores e mais precisos. A figura ilustra um rádio comunicador construído a partir de uma peça de silício.

Fonte: Brown, 2006.

Figura 2.18: Dispositivo MEMS.

3. CONCEITOS DA TRANSMISSÃO DIGITAL SEM FIO

As transmissões digitais sem fio são transmissões de rádio frequência (RF) que usualmente operam nas faixas de 915MHz e 2,4GHz, sendo caracterizadas como transmissões UHF²⁴, conforme ilustrado pela tabela 3.1. Apesar da faixa de 5,8GHz começar a ser estudada para utilização no mercado, a frequência de 2,4GHz é a que possui um maior número de dispositivos em funcionamento.

Tabela 3.1: Sub-divisões do espectro de RF

<i>Tipos de Transmissão</i>	<i>Frequência</i>
Muito baixa frequência (VLF)	9-30 kHz
Baixa frequência (LF)	30-300 kHz
Média frequência (MF)	300-3000 kHz
Alta frequência (HF)	3-30 MHz
Muito alta frequência (VHF)	30-300 MHz
Ultra alta frequência (UHF)	300-3000 MHz
Super alta frequência (SHF)	3-30 GHz
Extrema alta frequência (EHF)	30-300 GHz

Fonte: Rackley, 2007

Um dos principais aspectos que foram considerados na escolha das frequências acima é o fato delas pertencerem a uma faixa de utilização não licenciada, ou seja, uma faixa em que não é necessária licença de utilização concedida pelos órgãos de regulamentação de cada país. No Brasil, este órgão é a ANATEL²⁵ e nos Estados Unidos, o FCC²⁶.

Essas três faixas de frequência são denominadas faixas ISM²⁷ e por não serem licenciadas, toda e qualquer interferência proveniente de sinais de mesma frequência são de inteira responsabilidade dos usuários. Esta é provavelmente a principal desvantagem de se utilizar as frequências ISM, uma vez que não há o

²⁴ UHF: *Ultra high frequency*.

²⁵ ANATEL é a Agência Nacional das Telecomunicações, responsável pelo gerenciamento das frequências de transmissão no Brasil.

²⁶ FCC é a Comissão Federal de Comunicação americana, responsável pelo gerenciamento das frequências de transmissão nos Estados Unidos.

²⁷ ISM: *Industrial, Scientific and Medical band*.

controle do número de dispositivos que transmitam na mesma frequência e que podem causar interferência no sinal transmitido.

Entretanto, hoje a faixa de ISM contém um enorme número de transmissões sem fio comerciais e industriais, já que sua transmissão de dados não gera custos e já existe tecnologia para projetar redes de transmissão que minimizem os efeitos de interferência.

3.1. TRANSMISSÃO DOS SINAIS

Devido à possibilidade de outros dispositivos operarem na mesma frequência, as transmissões desses sinais foram projetadas com o propósito de minimizar as interferências geradas por dispositivos vizinhos e de aumentar a segurança dos dados transmitidos.

Existem diversas formas de atingir esses objetivos, dentre as quais pode-se citar: a utilização de determinados tipos de antenas e a escolha da tecnologia de espalhamento espectral para a transmissão dos dados.

3.1.1. ESPALHAMENTO ESPECTRAL

O espalhamento espectral é originado na Segunda Guerra Mundial, quando se tornou necessária a transmissão de dados com a máxima segurança possível, sendo segura quanto a interceptações e robusta quanto a perturbações intencionais ou não, evitando assim que “caíssem em mãos inimigas”.

A técnica do espalhamento espectral consiste, como o próprio nome sugere, em espalhar o sinal ao longo de uma faixa de frequência. Em virtude disso, sua transmissão utiliza uma largura de banda maior do que a largura de banda da informação a ser transmitida e possui a vantagem de reduzir as frequências de interferência, conforme pode ser observado na figura 3.1.

Figura 3.1: Técnica do espalhamento espectral.

Conforme Rackley (2007), a chave para o espalhamento espectral são as funções utilizadas para espalhar a informação ao longo da faixa de frequência. Esse processo resulta em uma largura de banda de 20 a 100 vezes maior do que a largura de banda da informação propriamente dita em aplicações comerciais e industriais e de mil a um milhão de vezes maior em aplicações militares.

Existem diversas formas de realizar o espalhamento espectral do sinal transmitido; entretanto, apenas duas delas são amplamente utilizadas: o DSSS²⁸ e o FHSS²⁹.

O DSSS consiste em espalhar a informação ao longo da faixa de frequência. Para tanto, realiza uma função XOR³⁰ do sinal de entrada com uma função código, chamada de *chipping code*. Esse novo sinal é então transmitido e deve ser decodificado na recepção, utilizando a mesma função código utilizada em sua criação.

O FHSS consiste em transmitir o sinal de entrada alternando entre os vários canais da faixa de transmissão, em uma sequência determinada por uma função código. Assim como o método anterior, para ser decodificado na recepção, a mesma função código deve ser utilizada para que seja possível obter, na ordem correta, os dados transmitidos de cada canal.

²⁸ DSSS significa Espalhamento Espectral por sequência direta, ou *direct sequence spread spectrum*.

²⁹ FHSS significa Espalhamento Espectral por salto em frequência, ou *frequency hopping spread spectrum*.

³⁰ XOR é uma função lógica que tem como resultado 0, se as entradas forem iguais e 1, se forem diferentes.

As figuras 3.2 e 3.3 ilustram de forma conceitual os métodos de espalhamento espectral DSSS e FHSS, respectivamente.

Figura 3.2: Método de espalhamento espectral: DSSS.

Figura 3.3: Método de espalhamento espectral: FHSS.

Além da imunidade à interferências, a utilização de espalhamento espectral aumenta a segurança da transmissão, uma vez que para sua decodificação é necessária a função código, única para cada aplicação.

3.1.2. ANTENAS

Outro aspecto muito importante nas transmissões sem fio é a área de cobertura do sinal transmitido. Conforme Rackley (2007) e Caro (2008), as antenas

além de transmitirem os sinais de ondas eletromagnéticas, podem alterar a forma e a potência do sinal enviado.

As aplicações usuais possuem antenas chamadas de omni-direcionais. Essas antenas transmitem seus sinais em todas as direções - 360°. Algumas antenas, entretanto, possuem a capacidade de trabalharem polarizadas, alterando o direcionamento da sua transmissão. Conforme ilustrado na figura 3.4, uma antena helicoidal pode transmitir como uma antena do tipo dipolo, sem direcionamento do sinal, ou pode transmitir como uma antena direcional, focando o sinal em uma determinada direção.

A utilização de antenas direcionais oferece vantagens claras por aumentar a disponibilidade do uso do espaço e a possibilidade de transmissões simultâneas. Também é importante ressaltar que esse tipo de antena pode aumentar o alcance do sinal transmitido sem a necessidade de um consumo maior de energia.

Figura 3.4: Diagrama de radiação de uma antena helicoidal.

Se, por um lado, a transmissão direcional fornece ganhos, o próprio direcionamento do sinal pode trazer desvantagens dependendo da arquitetura da rede. Caso os dispositivos da rede não estejam contidos na faixa de transmissão direcionada, estes não estarão disponíveis para a comunicação. Em arquiteturas como árvore e estrela é possível utilizar antenas omni-direcionais no *gateway* e antenas direcionais nos dispositivos, garantindo assim uma arquitetura com um menor consumo de energia e maior segurança.

Entretanto, deve-se ter muito cuidado ao utilizar antenas direcionais em dispositivos de uma rede *mesh*, evitando áreas que não tenham cobertura, o que limitaria sua funcionalidade e se tornaria um problema.

Estudos estão sendo desenvolvidos para minimizar os problemas de cobertura das transmissões com antenas direcionais com as antenas chamadas de *phase array* e novos protocolos de transmissão de sinal.

Detalhes sobre os equipamentos e arquiteturas da rede são apresentados nos próximos itens.

3.2. ARQUITETURA DE REDES

As arquiteturas de redes são compostas de equipamentos da rede distribuídos conforme suas topologias, como mostrado nos subitens a seguir.

Em virtude das características dos protocolos utilizados nas redes sem fio, os equipamentos que compõem as redes podem ser definidos conforme abaixo.

3.2.1. EQUIPAMENTOS DA REDE

Basicamente, é descrita a periferia da rede, constituída de equipamentos que podem ser definidos como:

- *Devices* (Dispositivos):

Definidos como os instrumentos que incorporam em sua concepção, a unidade de aquisição e conversão da grandeza física em elétrica (sensor-transdutor), a unidade de processamento digital e a unidade de transmissão do sinal – antena, conforme ilustrado na figura 3.5.

Cada *device* pode adotar, neste conceito de redes sem fio, funções diferentes na rede, dependendo da necessidade. Estes *devices* podem ter a única

função de enviar sinais a um controlador central ou podem ter a função de coordenadores da rede PAN³¹ na qual participa. O aumento das funções de um *device* ocasiona um maior consumo de energia e assim, sua vida útil diminui, aumentando a manutenção. Nesses casos, é recomendado a utilização de dispositivos externos de geração auxiliar de energia, como explicado no próximo capítulo, ou mesmo uma alimentação de energia constante.

Atualmente, os *devices* ilustrados na figura 3.5, conforme descrito na seção 2.7, são construídos como uma peça única, utilizando-se da tecnologia de nanosensores, fazendo com que todas as partes ilustradas façam parte de uma única barra de silício, utilizada neste tipo de construção. Isto confere aos *devices* um maior encapsulamento, um menor consumo de energia e um menor tamanho físico.

Figura 3.5: Ilustração dos equipamentos de rede: *devices*.

- *Gateway (pontos de acesso):*

Os *gateways*, também conhecidos como pontos de acesso à rede sem fio, têm a função de conectar todos os *devices* pertencentes à rede e realizar o elo de conexão entre os dispositivos de campo e o barramento de controle (CLP ou SDCCD) da unidade de processo.

³¹ PAN: *Personal Area Network*

- *Gerenciador da rede (assume as funções de sincronismo)*

O gerenciador da rede é o responsável pelas funções de roteamento e repetição, com controles de redirecionar uma mensagem direcionada a outras sub-redes. Também é o responsável pelas funções de sincronismo da rede e de monitoração dos dispositivos e de tráfego, executando funções de QoS³². Como função de monitorar os dispositivos, realiza os controles de entrada e saída dos mesmos à rede, coordenando suas atividades e monitorando suas performances.

- *Gerenciador de segurança:*

O gerenciador de segurança é o responsável pelas funções de segurança da rede, como autenticação e criptografia dos dados enviados e pelas funções de acesso à rede.

Os pontos de acesso, geralmente incorporam em um mesmo equipamento, as funções de prover acesso dos *devices* à rede, de gerenciar o tráfego de rede e sua segurança. Na figura 3.6 mostra-se a configuração de uma rede típica, com seus equipamentos incorporados, enquanto que na figura 3.7 apresentam-se possíveis equipamentos desse tipo.

Figura 3.6: Configuração de uma rede típica.

³² QoS: *Quality of Signal* são funções que tem como objetivo garantir o tempo de transmissão de um sinal.

Figura 3.7: Ilustração dos equipamentos da rede: pontos de acesso.

3.2.2. TOPOLOGIAS DAS REDES

As redes sem fio podem ser categorizadas pela sua topologia, da mesma forma que as redes fiadas. Entretanto, essa definição não se baseia na simples interconexão entre os dispositivos de campo, mas sim pela conexão lógica existente entre esses dispositivos.

- Ponto a ponto:

Consiste na conexão direta entre dispositivos individuais. Como um exemplo na indústria, há o acesso aos dados de instrumentos e válvulas, assim como a realização de operações de calibração e manutenção via *handheld*, conforme ilustrado na figura 3.8. Essa topologia é a base para todas as outras formas de conexão entre equipamentos, uma vez que quaisquer outras topologias são ramificações e ampliações dela.

Figura 3.8: Topologia de rede: ponto a ponto.

▪ Estrela:

A topologia mais difundida e simples de implementar. Os *devices* se interconectam com o provedor de acesso somente, sem se comunicarem entre si. Sua topologia se encontra representada na figura 3.9.

Figura 3.9: Topologia de rede: estrela.

Vantagens:

- Fácil manutenção;
- Fácil implementação e configuração;
- Caso um *device* pare de funcionar, o sistema continua em operação.

Desvantagens:

- Quantidade limitada do número de dispositivos conectados, devido ao aumento do tráfego e, conseqüentemente, aumento do tempo de latência e aumento do consumo de energia;
- Perda da rede caso o provedor de acesso central pare de funcionar;

Como a comunicação ocorre diretamente, sem intermediários, possui a mais alta taxa de transferência entre todos os tipos de topologia. Uma confiabilidade maior pode ser obtida utilizando dois provedores de acesso, instalados em modo de redundância.

▪ Árvore:

Da mesma forma que a topologia anterior, nesta configuração os instrumentos/válvulas se comunicam com o ponto de acesso que realiza as mesmas funções de prover acesso à rede e também de gerenciar e prover segurança. Sua diferença consiste em cada ponto de acesso possuir comunicação com um grupo seleto de instrumentos/válvulas e que as demais configurações sejam realizadas ao nível de pontos de acesso. Essa configuração é utilizada quando há a necessidade de atender uma grande área de cobertura com instrumentos/válvulas geograficamente espalhados pela unidade de processo, ficando inviável a topologia simples do tipo estrela. Sua topologia se encontra representada na figura 3.10.

Figura 3.10: Topologia de rede: árvore.

Vantagens:

- Caso um *device* pare de funcionar, o sistema continua em operação;
- Não ocorre a perda total da rede caso o provedor de acesso local pare de funcionar;

Desvantagens:

- O aumento do número de ramificações pode representar um aumento de tráfego entre provedores de acesso, o que diminui a taxa de transferência e o tempo de latência;
- O aumento da rede pode significar a necessidade de se adquirir novos provedores de acesso, o que impacta em custo maior de implantação.

- *Mesh*:

As redes *mesh* são definidas pela capacidade que seus dispositivos possuem de se comunicar diretamente com os dispositivos adjacentes, sem a necessidade de comandos de controle central, dada pelo ponto de acesso. Em virtude disso, a topologia de uma rede *mesh* é dinâmica e está em constante alteração, pois depende da adição ou subtração de dispositivos na rede, ou na perda de comunicação com o ponto de acesso por parte de algum deles. Isso caracteriza uma grande vantagem para a indústria, pois há a redução dos custos de instalação de um instrumento a praticamente custos individuais.

Entretanto, a capacidade de roteamento entre dispositivos requer que cada um comunique sua informação de roteamento a cada dispositivo, assim que algum dispositivo se conecte ou deixe uma rede. Essa funcionalidade, embora acrescente à rede características de confiabilidade devido ao seu auto-roteamento, aumenta o tráfego da rede e, portanto, sua concepção deve prever esse aumento do fluxo de informações trafegadas. Sua topologia se encontra representada na figura 3.11.

Figura 3.11: Topologia de rede: *mesh*.

Vantagens:

- Redução dos custos de instalação de um instrumento a praticamente seu custo individual;
- Aumento da confiabilidade devido às funções de auto-roteamento, que garante a rede características de sistemas redundantes;

Desvantagens:

- Aumento do consumo de energia devido às funções de auto-roteamento;
- Aumento do tráfego da rede devido às funções de auto-roteamento;
- Dependendo do caminho encontrado para um novo roteamento, pode ocorrer aumento do tempo de latência.

▪ Híbridas:

As redes híbridas possuem a capacidade de funcionar integrando as redes fiadas e sem fio. Podendo ser construídas através de qualquer uma das topologias anteriormente citadas, sua utilização é justificada caso a implantação das redes sem fio seja feita de forma parcial, alterando de maneira gradativa as redes fiadas já instaladas. Possuem as combinações de vantagens e desvantagens das topologias descritas e deve ser projetadas com a finalidade de se obter as melhores características de cada arranjo. Sua topologia se encontra representada na figura 3.12.

Figura 3.12: Topologia de rede: híbridas.

3.3. TECNOLOGIAS ATUAIS

Dentre as tecnologias existentes no mercado, podemos citar três como as de maior destaque: o WirelessHART, a ISA100.11a e o ZigBee.

Detalharemos sobre as duas primeiras tecnologias devido à aplicação e desenvolvimento focados na indústria de processo, foco de estudo deste trabalho, explicando seus fundamentos e realizando uma comparação entre elas.

No conceito das transmissões sem fio, ambas tecnologias se fundamentam na norma IEEE802.15.4.

3.3.1. IEEE802.15.4

Desenvolvido sob a chancela de WPAN³³, possui como principais objetivos, o uso de redes de baixo consumo de energia e baixo custo para aplicações como automação residencial, industrial entre outras.

Atuando apenas nas camadas Física e de Ligação (esta última parcialmente) da estrutura ISO-OSI, define que seus dispositivos da rede podem operar em duas topologias distintas, a estrela e a ponto a ponto, assumindo duas configurações possíveis:

- FFD (*Full Function Device*): dispositivos com total capacidade dentro da rede, com funções de roteamento e coordenação.
- RFD (*Reduced Function Device*): dispositivos com restrições de capacidade dentro da rede, seja ela fixa ou configurada. Quando nesta função, o dispositivo não é capaz de realizar roteamento ou coordenação, ou mesmo assumir a coordenação caso o coordenador venha a apresentar problemas.

Outras topologias se enquadram como variações da topologia ponto a ponto e poderão existir se configuradas nas camadas de rede de mais alto nível. Sua estrutura e funções complementares não estão cobertas por esta norma.

Dentre as funções de operação implementadas nessa norma podemos citar: criptografia, chave de identificação de grupo, modo de operação síncrono ou não síncrono, níveis de segurança, auto-roteamento e auto-organização.

A criptografia e chave de identificação de grupo fazem parte das implementações voltadas a garantir a segurança das transmissões que se complementam pelos níveis de segurança definidos e implementados nas camadas superiores da rede. Dentre as funções de segurança implementadas destacamos a confidencialidade, autenticidade e a proteção de dados duplicados, garantindo que os dados sejam transmitidos apenas para o receptor de direito, que a origem dos dados provenientes de um transmissor específico seja comprovada e que dados duplicados sejam detectados e não processados indevidamente.

³³ WPAN: Wireless Personal Area Network

A criptografia das transmissões fundamenta-se nos conceitos mostrados no capítulo 3 e a chave de identificação de grupo serve para evitar que dispositivos móveis não autorizados, que se encontrem sob a abrangência da área de cobertura da rede, se integrem a mesma.

São funções do coordenador da rede, ou seja, do dispositivo com as funções de FFD, de estabelecer e gerenciar o acesso e a distribuição das chaves de identificação de grupo, assim como garantir o correto funcionamento da rede, seja ela em modo síncrono ou assíncrono, seja ela em modo de auto-roteamento e auto-organização.

Conforme definição da própria norma, “auto-roteamento consiste na habilidade da rede de detectar, e se recuperar, de falhas que possam a aparecer seja elas localizadas nos nós de comunicação ou nos provedores de acesso, sem que necessite de intervenção humana”; e “auto-organização consiste na habilidade dos nós da rede de detectar a presença de outros nós e de se organizar dentro de uma rede estruturada e funcional, sem que necessite de intervenção humana”.

Para realizar as funções de auto-roteamento e auto-organização, os dispositivos deverão estar se comunicando da forma dispositivo a dispositivo, sendo ambos do tipo FFD. Vale ressaltar que nessa forma de comunicação, uma estrutura ponto a ponto pode ser configurada, com capacidades de realizar em sua totalidade as funções de uma rede inteiramente interligada.

Entretanto, caso a comunicação da rede se realize entre dispositivo a coordenador de rede ou vice-versa, sendo um dispositivo do tipo FFD e outro RFD, em virtude de um deles possuir recursos limitados, o alcance dentro da rede de suas funções também se encontrará limitado.

O coordenador controla os dispositivos com relação ao momento de transmitirem seus dados através do CSMA-CA³⁴ e pode operar sua rede em modo assíncrono, possibilitando colisões ocasionais e retransmissões, ou pode operar em modo síncrono, gerenciando o tráfego da rede, evitando colisões. Nesse modo, caso haja necessidade de se garantir a comunicação de um dado dispositivo em um

³⁴ CSMA-CA: *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

determinado tempo, este pode ser gerenciado a transmitir em uma faixa de tempo garantida³⁵, evitando a perda de tempo atribuída a colisões ocasionais.

Independente do modo de transmissão, os dispositivos podem assumir sua função de hibernação (modo de baixo consumo de energia) sempre que não estiverem agendados para enviar ou receber dados durante o período de tempo de transmissão da rede completa, ou quando não existirem dados novos a serem enviados. Durante este período de hibernação, eventualmente pode ser necessário verificar a existência de uma mensagem direcionada ao dispositivo.

Conforme Caro (2008), estima-se que a maioria dos nós, em modo síncrono, permaneceria em modo de hibernação por aproximadamente 97,5% do tempo. A figura 3.13 ilustra este modo de estrutura de transmissão.

Figura 3.13: Estrutura de transmissão – modo síncrono.

Sua topologia e propriedades estão representadas na figura 3.14 e na tabela 3.2, respectivamente, enquanto que as funções específicas de cada camada são ilustradas na tabela 3.3.

³⁵ Esta faixa de tempo garantida para a transmissão tem o nome de GTS, que significa, *Guaranteed Time Slot*.

Figura 3.14: Topologia básica da norma IEEE 802.15.4.

Tabela 3.2: Propriedades da tecnologia IEEE 802.15.4.

Propriedades da tecnologia	
Taxa de Transferência	250kbps
Alcance	10 a 300m
Frequência	ISM (900MHz / 2,4GHz)
Modo de transmissão	DSSS / FHSS
Controle de tráfego	Síncrono / Assíncrono
Topologia	Estrela / Ponto a Ponto
Complexidade de implementação	Baixa
Número máximo de nós	Não definido
Tempo Latente	10 a 50ms (nota 1)
Bateria (consumo de energia)	Baixo consumo (nota2)

Nota 1: Faixa de maior probabilidade, dependente do número de nós da rede.

Nota 2: Dependente do tipo de aplicação e da função do dispositivo.

Fonte: Riego, 2009.

Tabela 3.3: Funções específicas de cada camada

Camada Física	Camada de Ligação
Ativar e desativar o transmissor	Sincronizar os dispositivos e as transmissões
Detectar a energia no canal de transmissão	Oferece suporte às entrada e saída de dispositivos
Indicar a qualidade dos dados recebidos	Oferece suporte a segurança dos dispositivos
Selecionar a frequência do canal de transmissão	Emprega e gerencia o CSMA-CA
Enviar e receber os dados transmitidos.	Mantém e coordena o GTS

Fonte: IEEE802.15.4, 2007.

3.3.2. IEC/PAS-62591 (WirelessHART)

A norma IEC/PAS 62591 foi a primeira norma desenvolvida para redes sem fio na indústria de processo. Desenvolvida com o intuito de estabelecer um protocolo de comunicação que permitisse sua integração com os sistemas existentes no mercado, principalmente a substituição dos sistemas fiados que já se utilizam do protocolo HART.

Seus principais objetivos são:

- Garantir que as redes implementadas tivessem baixo tempo de latência;
- Definir aplicações e requisitos de gerenciamento de rede que fossem funcionais e que permitissem aumento de escala;
- Garantir robustez nas comunicações com presenças de interferências encontradas em ambientes industriais;
- Garantir a coexistência com outros protocolos de rede no mercado, assim como o protocolo fiado HART;
- Garantir a interoperabilidade entre os dispositivos, para que dispositivos de diversos fabricantes operem na mesma rede;

Apesar de utilizar as primitivas da IEEE 802.15.4, os dispositivos sofreram algumas alterações e restrições de funções realizadas nas camadas superiores da estrutura ISO-OSI e são caracterizados conforme segue e ilustrados na figura 3.15.

- Dispositivos de campo:

Caracterizam-se como sensores de atuação direta ao processo, com função apenas de se comunicar com outros dispositivos, com roteadores ou com provedores de acesso. Como padrão de norma, todos os dispositivos de campo possuem capacidade de atuar como roteadores, o que permite a qualquer momento, implementar uma rede de topologia *mesh*.

- Adaptadores de rede sem fio:

Caracterizam-se como dispositivos com capacidade de se comunicar com os dispositivos fiados, de protocolo HART, realizando uma ponte para que equipamentos existentes possam pertencer a rede sem que sua substituição seja necessária.

- Provedores de acesso (*gateway*):

São dispositivos que realizam a interface entre os dispositivos físicos no campo e o sistema de controle. Muitas vezes, incorpora as funções de gerenciamento do sistema e o gerenciamento dos tempos da rede.

- Dispositivo Roteador:

Caracterizam-se como dispositivos com capacidade única de transmitir o sinal de um dispositivo para outro dispositivo ou a um provedor de acesso. Apesar dos dispositivos de campo ter a capacidade de realizar esta função, sua utilização pode aumentar a taxa de transferência dos dados transmitidos e ainda diminuir o tempo de latência das transmissões, que percorrem uma rota de caminho menor.

Figura 3.15: Funções dos dispositivos da rede IEC/PAS 62591.

As propriedades da norma IEC/PAS 62591 podem ser resumidas nas características da tabela 3.4.

Tabela 3.4: Propriedades da tecnologia IEC/PAS 62591.

Propriedades da tecnologia	
Taxa de Transferência	250kbps
Alcance	Indeterminado (nota1)
Frequência	ISM (2,4GHz)
Modo de transmissão	FHSS
Controle de tráfego	Síncrono (TDMA)
Topologia	Estrela / <i>Mesh</i>
Complexidade de implementação	Média
Número máximo de nós	Não definido
Tempo Latente	< 150ms (nota2)
Bateria (consumo de energia)	Baixo consumo (nota2)

Nota 1: Ponto a ponto até uns 200m, alcance total da topologia indeterminado.

Nota 2: Dependente do tipo de aplicação e da função do dispositivo.

Fonte: Riego, 2009.

3.3.3. ISA 100.11a

A norma ISA 100.11a foi desenvolvida com o intuito de estabelecer o protocolo de comunicação referência na indústria de processo e permitir sua integração com os demais protocolos existentes no mercado, sejam eles fiados ou sem fio.

Seus principais objetivos são:

- Garantir que os dispositivos tenham um baixo consumo de energia;
- Garantir que as redes implementadas tivessem restrições ao tempo de latência;
- Definir infra-estrutura e interfaces, aplicações, segurança e requisitos de gerenciamento de rede que fossem funcionais e que permitissem aumento de escala, em todas as classes de operação (1 a 5) definidas na norma e ilustradas na tabela 3.5;
- Garantir robustez nas comunicações com presenças de interferências encontradas em ambientes industriais;
- Garantir a coexistência com outros protocolos de rede no mercado, como o WirelessHART, o 802.11x etc;

- Garantir a interoperabilidade entre os dispositivos, para que dispositivos de diversos fabricantes operem na mesma rede;

Tabela 3.5: Classes de operação definidas pela ISA 100.11a.

Segurança	Classe 0: Ação emergencial	Sempre crítico	↑
Controle	Classe 1: Controle em malha fechada - regulatório	Às vezes crítico	
	Classe 2: Controle em malha fechada –	Usualmente não crítico	
	Classe 3: Controle em malha aberta	Intervenção do operador	
Monitoração	Classe 4: Alertas	Baixas consequências	
	Classe 5: Registradores de informações	Sem consequência	

Fonte: ISA100.11a D2, 2009

Basicamente, possui as mesmas funções da norma WirelessHART (IEC/PAS 62591), com relação ao gerenciamento do sistema, com suas funções de controle de entrada e saída de dispositivos da rede, configuração de comunicação e monitoramento dos dispositivos, monitoramento e otimização da performance da rede. Sua principal diferença é o gerenciador de segurança inerente ao protocolo, que no caso do WirelessHART somente existe como políticas de segurança implementadas nas camadas de ligação, de transporte e de aplicação.

O protocolo permite que sejam criadas inúmeras sub-redes com o propósito de aumentar o controle e permitir uma maior troca de informações sem perda de tempo latente.

Outra diferença consiste na conceituação dos dispositivos. Apesar de utilizar as primitivas da IEEE 802.15.4, os dispositivos sofreram algumas alterações e restrições de funções realizadas nas camadas superiores da estrutura ISO-OSI e são caracterizados conforme segue e ilustrados na figura 3.16.

- Dispositivos de campo sem regra de roteamento:

Caracterizam-se como dispositivos, como sensores, com função apenas de se comunicar com outros dispositivos com regra de roteamento ou dispositivos de infra-estrutura.

- Dispositivos de campo com regra de roteamento:

Caracterizam-se como dispositivos com capacidade de se comunicar com outros dispositivos, sejam eles com ou sem regra de roteamento. São através desses dispositivos que as redes do tipo *mesh* são formadas.

- Dispositivos de campo com regra de provisão de acesso:

Caracterizam-se como dispositivos com capacidade de prover acesso a um dispositivo novo integrando a rede. Possui todas as funções e diretrizes de segurança necessárias para realizar esta ação, validando o ingresso do novo integrante na rede através de chaves de criptografia e informando ao sistema de gerenciamento central seu mais novo integrante.

- Dispositivos de infra-estrutura com regra de provisão de acesso (*gateway*):

São dispositivos que realizam a interface entre os dispositivos físicos no campo e o sistema de controle. Muitas vezes, incorpora as funções de gerenciamento do sistema, o gerenciamento de segurança e o gerenciamento dos tempos da rede, que podem ser implementados por dispositivos dedicados a estas funções.

- Dispositivos de infra-estrutura com regra de roteamento (*backbone*):

São dispositivos utilizados para realizar a função de roteamento da rede, muitas vezes instalado no centro da rede ou sub-rede, coletando seus sinais e direcionando para outras sub-redes ou até mesmo ao *gateway*.

Figura 3.16: Funções dos dispositivos da rede ISA 100.11a.

As propriedades da norma ISA 100.11a podem ser resumidas nas características da tabela 3.6.

Tabela 3.6: Propriedades da tecnologia ISA 100.11a.

Propriedades da tecnologia	
Taxa de Transferência	250kbps
Alcance	Indeterminado (nota1)
Frequência	ISM (2,4GHz)
Modo de transmissão	DSSS
Controle de tráfego	Síncrono (TDMA ³⁶) / Assíncrono (CSMA-CA)
Topologia	Todas
Complexidade de implementação	Alta
Número máximo de nós	Não definido
Tempo Latente	100ms (máximo - nota2)
Bateria (consumo de energia)	Baixo consumo (nota2)

Nota 1: Ponto a ponto até uns 300m, alcance total da topologia indeterminado.

Nota 2: Dependente do tipo de aplicação e da função do dispositivo.

Fonte: Riego, 2009.

³⁶ TDMA: Time Division Multiple Access

4. REQUISITOS DA TRANSMISSÃO DIGITAL SEM FIO

O projeto de uma rede sem fio deve se concentrar em otimizar os requisitos da figura 4.1 de forma balanceada. Atingir um ótimo desempenho em todos os cinco pilares simultaneamente é estabelecer uma relação de compromisso entre eles, em uma tarefa que deve ser realizada por uma equipe que entenda, não somente da estrutura de rede de comunicações, mas de exigências do processo produtivo. Em virtude disso, nesse capítulo, se estudará os conceitos dos requisitos da transmissão, com o objetivo de obter o embasamento necessário a definir seus valores aceitáveis para cada aplicação.

É importante ressaltar que, diferentemente das redes fiadas, um novo requisito se faz presente nas transmissões digitais sem fio: o consumo de energia.

Figura 4.1: Requisitos de uma rede sem fio.

A energia necessária para o funcionamento dos dispositivos, que antes era provida através dos cabos, com a supressão dos mesmos deve ser obtida de outra maneira. Fontes de energia como bateria, painel solar e outras tecnologias serão discutidas com mais detalhes no decorrer deste capítulo.

Além dos itens de fundamental importância na concepção da rede, como confiabilidade, tempo de latência, taxa de transferência e segurança, a interoperabilidade entre seus dispositivos deve ser considerada.

Essa interoperabilidade pode ser denominada como a compatibilidade entre os produtos de diversos fornecedores, o protocolo de comunicação.

A figura 4.2 ilustra de que forma deve ser escolhido o protocolo de comunicação, passando pelas fases de se definir uma aplicação, que por consequência demandará requisitos de desempenho que poderão ser suplantados por serviços de rede. Alguns requisitos da aplicação, assim como restrições do protocolo, auxiliam nos parâmetros para a definição do tipo de sensor a ser utilizado e de que forma todo este conjunto será implementado.

Figura 4.2: Definição do protocolo em uma aplicação.

A definição por um protocolo de comunicação deve considerar em quais camadas este padrão a ser utilizado se encontra, uma vez que sua concepção é baseada na tecnologia ISO-OSI de camadas de rede, o que confere a possibilidade de coexistir na mesma estrutura de comunicação, mais de um protocolo de comunicação, com diferentes requisitos e características que venham a se complementar. É também por esta razão que serviços de controle de tráfego e qualidade de serviço muitas vezes podem ser implementados independentemente do protocolo, pois residem nas camadas mais altas da estrutura ISO-OSI, chamada de Camada de Aplicação. A figura 4.3 ilustra as camadas de rede ISO-OSI e suas funções.

Figura 4.3: Tecnologia de camadas ISO-OSI e suas funções.

Apesar de nem todos os protocolos de transmissão utilizar na totalidade as camadas de rede definidas na figura 4.3, sua aplicação é de extrema utilidade, uma vez que permite aos fornecedores desenvolverem produtos de aplicações diferentes sobre um mesmo meio físico de transporte. Conforme Rackley (2007), uma vez que as conexões lógicas operam sobre links físicos, ambas as arquiteturas (lógica e física) se suportam e possuem um alto grau de independência, conferindo capacidade à rede de manter uma arquitetura lógica, mesmo tendo sua arquitetura física alterada, além de suportar, em uma mesma arquitetura física, diferentes conjuntos de padrões e protocolos.

A figura 4.4 ilustra o caminho seguido por uma comunicação entre o sensor e o sistema de controle, passando pelo roteador e o provedor de acesso. Repare que as funções do roteador podem estar sendo realizadas por outro dispositivo de rede, em uma topologia de rede *Mesh*, conforme elucidada no capítulo anterior.

Figura 4.4: Exemplo do caminho seguido em uma comunicação.

Os conceitos e características dos requisitos de rede encontram-se detalhados no decorrer deste capítulo.

- **Confiabilidade:**

É a capacidade de garantir que uma informação transmitida por um dispositivo chegue ao sistema de controle, passando por toda a estrutura de rede existente.

- **Tempo de Latência**

É o tempo decorrido entre o início da transmissão de uma informação e sua chegada ao sistema de controle, passando por toda a estrutura de rede existente.

- **Segurança**

É toda a estrutura necessária para garantir a proteção, a autenticação e o sigilo dos dados transmitidos.

- **Taxa de Transferência**

É a taxa média de transmissão de informações por um determinado período de tempo. É importante lembrar que informações transmitidas são as informações de dados efetivos, e não dados de controle e cabeçalhos.

4.1. ANÁLISE DOS REQUISITOS

Em uma implementação de rede sem fio, devem ser adotadas as mesmas considerações que se utiliza em uma rede fiada convencional, como Fieldbus Foundation ou Profibus-PA.

Deve-se primeiro definir quais variáveis se deseja medir, qual a importância dessa variável no processo e qual o tempo de resposta necessário que ela demanda do sistema de controle. Com base nessas informações, é possível iniciar o projeto de uma rede sem fio.

É importante ressaltar que a utilização das redes sem fio ainda é incipiente e, por enquanto, não tem a intenção de substituir as instalações de segurança de uma unidade industrial, e que sua atuação abrange apenas a parte de supervisão e controle de malhas não muito críticas.

A tabela 3.5, definida pela norma ISA 100.11a, pode ser utilizada como uma boa referência de quais malhas ou sistemas podem ter sua implementação realizada por dispositivos sem fio. Como regra geral, a partir da classe 2 em diante podem ser implementados através de redes sem fio, mas mesmo a classe 1 pode ser utilizada dependendo dos cuidados tomados no projeto da rede.

Depois da classificação das malhas de controle, é necessário avaliar os requisitos de performance da rede, como o tempo de resposta da malha e a confiabilidade desejada.

Malhas com tempo de resposta baixo, ou seja, malhas de processo rápidas, necessitam de uma topologia que favoreça a obtenção de um menor tempo de latência. Uma dessas topologias é a estrela, que não suporta dispositivos intermediários entre os instrumentos finais de campo e os provedores de acesso ao sistema de controle. Quanto mais intermediários, maior o tempo de transmissão total e maior o tempo de latência.

Além da topologia, outro aspecto fundamental é o modo de transmissão. Conforme Hameed (2008), caso se necessite de uma transmissão em tempo real e com acesso garantido, deve-se utilizar o modo de transmissão síncrono com acesso de tempo garantido (GTS), conforme ilustrado anteriormente na figura 3.2.

A figura 4.5 ilustra o tempo de acesso ao meio de transmissão em modo síncrono (GTS) ou assíncrono (CSMA-CA).

Figura 4.5: Tempo de acesso ao meio de transmissão.

Nesses casos, o acesso à rede em modo síncrono ocorre em 30ms, independente do número de dispositivos da rede. Nota-se que ocorre um aumento do tempo de transmissão no modo assíncrono ao aumentar o número de dispositivos. Isto ocorre devido ao aumento das colisões ocasionais quando da tentativa de transmissão dos dados. Vale ressaltar também que a simulação ocorreu com até 7 dispositivos, número máximo de janelas GTS que é possível utilizar em transmissões baseadas na norma IEEE 802.15.4 e como mencionado, base para os protocolos de transmissão sem fio industriais.

Conforme Hameed (2008), independente do tamanho dos pacotes de transmissão em modo síncrono, seu tempo de acesso ao meio não varia significativamente e, portanto, conclui-se que 30ms é um bom parâmetro de projeto para o tempo de acesso ao meio.

Apesar de alguns artigos, como Bertocco (2009) e mesmo Hameed (2008), utilizar-se de mais de 7 dispositivos por enlace sem fio, recomenda-se não

ultrapassar este número quando se deseja utilizar a rede para o controle de malhas de processo.

Conforme mencionado, a topologia influi no projeto de uma rede, isso não somente pelo aumento do tempo de acesso ao meio – que corresponde proporcionalmente ao tempo de latência, mas no aumento do consumo de energia e na diminuição da taxa de transferência.

Redes sem fio com topologia *mesh* possuem uma menor taxa de transferência que redes com topologia estrela ou árvore, devido à necessidade de uma maior troca de informações entre dispositivos, necessárias ao estabelecimento das comunicações entre os dispositivos, e não dos seus dados propriamente ditos.

Entretanto, é essa troca de informações entre dispositivos que confere à rede com topologia *mesh* uma maior confiabilidade, pois caso exista alguma interferência, seja ela uma barreira física ou eletromagnética, que impeça um dispositivo de se comunicar com o provedor de acesso, a comunicação será direcionada a um outro dispositivo que roteará a informação no provedor de acesso, conforme ilustrado na figura 4.6.

Figura 4.6: Exemplo de roteamento em uma rede *mesh*.

Mas não é somente na utilização da topologia *mesh* que se obtém um aumento de confiabilidade da rede. Para atingir maiores níveis, pode-se incluir provedores de acesso e roteadores redundantes, sem esquecer de que o aumento da confiabilidade deve ser buscado sem prejudicar o tempo de resposta da rede como um todo.

E para garantir que o tempo da rede esteja dentro dos valores estipulados quando da definição dos requisitos, um estudo de macrociclo deve ser realizado.

Após a distribuição dos dispositivos pela rede e após a definição da topologia ideal, que atenda tanto os requisitos de confiabilidade, quanto os de tempo de latência e taxa de transferência, outros dois requisitos devem ser avaliados: segurança e energia.

A análise do requisito segurança deve ser realizado sob um aspecto diferenciado da análise comumente realizada na implantação de redes convencionais.

Com um conceito que privilegia a disponibilidade da informação à sua confidencialidade, a rede industrial diferencia-se da rede convencional pelo fato de não dispor da prerrogativa de negar o acesso à rede, ou mesmo, suspendê-la em casos extremos; pelo contrário, a rede industrial deve estar disponível em 100% das vezes. Essa diferença de requisitos de segurança é ilustrada na figura 4.7.

Figura 4.7: Requisitos de segurança.

Essa segurança deve ser conceituada não como uma regra geral e com aplicação específica a uma camada de rede, mas permeada em todas as camadas e desenvolvidas especificamente para cada tipo de aplicação.

A norma ISA 100.11a estabeleceu um grupo de trabalho de desenvolvimento conjunto com a norma ISA 99.00.01 – que fala sobre segurança de redes industriais – para definir políticas e diretrizes sobre o assunto para redes industriais, com a finalidade de atingir níveis seguros de funcionalidade.

Neste tipo de análise, são definidas zonas e níveis de segurança; assim como políticas específicas para cada divisão, com base nas seguintes considerações:

- Políticas de segurança;
- Inventário de ativos da rede;
- Requisitos de acesso e controle;
- Possíveis ameaças e vulnerabilidades;
- Conseqüências de uma quebra de segurança;
- Processo de gerenciamento de mudanças.

De posse dessas definições, é possível avaliar o nível de segurança da rede e, se necessário, alterar sua concepção de projeto, revisitando os requisitos anteriormente estabelecidos, fechando assim o ciclo de melhoria contínua desse projeto.

Como último requisito, e de extrema importância, a energia sempre foi um dos pilares no desenvolvimento da tecnologia sem fio, pois mesmo que um instrumento sem fio suporte funcionar ininterruptamente por 4 anos, caso existam 1500 instrumentos na unidade industrial, corresponderia, na média, a uma troca de bateria por dia. É em virtude dessa demanda, que inúmeras tecnologias estão sendo desenvolvidas – algumas já em fase de implantação.

Na figura 4.8 resume-se o passo a passo descrito neste sub-item.

1. definir as variáveis a serem medidas;
2. classificar sua importância e definir o tempo de resposta que esta demanda;
3. avaliar requisitos de performance, como tempo de resposta da malha e a confiabilidade desejada;
4. definição da topologia;
5. definição do modo de transmissão (síncrono ou assíncrono);
6. segurança;
7. energia

Figura 4.8: Passo a passo para implementar uma rede sem fio

Conforme descrito no item 2.7, a evolução dos sensores contribuiu para a redução do consumo de energia dos dispositivos, que também contaram com a evolução tanto da tradicional forma de alimentação: baterias, quanto das formas alternativas de geração de energia, dentre as quais destaca-se as seguintes:

- Solar:

As células solares são a forma mais comum de geração de energia e já em utilização em sistemas industriais. Seu sistema de painéis acoplado ao dispositivo, gera energia utilizada para carregar as baterias dos dispositivos, funcionando como um meio auxiliar de energia. Conforme Roundy (2004), uma simples célula solar pode gerar em circuito aberto, 0,6Vdc de tensão aproximadamente e pode facilmente ser montada em série.

A figura 4.9 ilustra um conjunto de painéis de células solares.

Figura 4.9: Painéis de células solares.

- Vibração:

Pequenas vibrações estão presentes na indústria em geral, como em dutos de ar condicionado, bombas, motores etc, tendo características similares, possuindo uma frequência dominante entre 60 e 200Hz, com amplitudes de 1 a 10m/s².

Algumas tecnologias existentes possuem a capacidade de converter tais vibrações em energia elétrica. Conforme Roundy (2004), essas tecnologias podem ser classificadas em três categorias: eletromagnéticas, eletrostáticas e piezoelétricas, tendo esta última categoria alcançado os melhores rendimentos.

O próprio Roundy (2003) demonstrou que um conversor de energia piezoelétrico de 1cm³ de tamanho produz cerca de 200mW de energia provenientes de vibrações da ordem de 2,25m/s² a 120Hz.

A figura 4.10 ilustra um gerador piezoelétrico, um circuito condicionador de energia e um transmissor de rádio alimentado por este sistema.

Figura 4.10: Gerador de energia piezoelétrico.

- Micro-turbinas:

Em instalações de sistemas sensores sem fio realizadas em válvulas ou dispositivos que necessitem de ar de instrumentação para funcionar, por exemplo, uma micro-turbina poderia ser confeccionada na mesma estrutura do posicionador, fazendo com que o movimento do eixo acionasse um micro-gerador e funcionasse como um carregador para a bateria interna, que ainda hoje é a principal fonte de energia para os sensores. Esta micro-turbina é

confeccionada pela tecnologia MEMS, já descrita no item 2.7 e ilustrada na figura 4.11.

Figura 4.11: Micro-turbina confeccionada pela tecnologia MEMS.

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Neste capítulo, serão citadas algumas possíveis utilizações das redes sem fio na indústria de processos, apresentando as características de implantação, como tipo de topologia utilizada, área de cobertura do sinal, tipos de transmissores e suas configurações de energia.

Escolheu-se para esta implantação algumas unidades da indústria sucroalcooeira, por ser uma indústria de bastante destaque na economia brasileira.

Esse tipo de indústria apresenta características que facilitam a utilização das redes sem fio, como áreas de extenso comprimento e baixa densidade de equipamentos e áreas de tancagem com tempo elevado de resposta do processo.

Não se pretende neste estudo, estabelecer um tipo específico de tecnologia a utilização, nem substituir as redes fiadas de sistemas de segurança da unidade e dos sistemas prontos de subfornecedores, os chamados sistemas “pacotes”, que muitas vezes constituem o conhecimento desenvolvido pelos mesmos. Dentre esses sistemas “pacotes” pode-se citar os turbogeradores, caldeiras e o difusor.

A figura 5.1 ilustra a planta geral de uma indústria padrão sucroalcooeira, com as suas respectivas unidades:

1. Unidade de descarregamento e extração
2. Unidade das caldeiras
3. Unidade dos turbogeradores
4. Unidade de tratamento de caldo e evaporação
5. Unidade de preparo de leite de cal/produtos químicos
6. Unidade de destilaria
7. Unidade de fermentação (dornas)
8. Unidade de torre de resfriamento
9. Unidade de tratamento de águas
10. Unidade de tancagem
11. Unidade de carregamento

Figura 5.1: Planta geral de uma indústria sucroalcooleira.

Neste estudo portanto, será analisada a utilização da tecnologia sem fio nas seguintes unidades:

- Unidade de tancagem;
- Unidade de preparo de leite de cal/produtos químicos;
- Unidade de fermentação (dornas).

5.1. UNIDADE DE TANCAGEM

A unidade de tancagem é uma das áreas com a maior flexibilidade nos requisitos de tempo de latência e taxa de transferência, pois em virtude de suas condições de processo e dimensões dos tanques, sua necessidade de resposta do processo é lenta.

Como pode ser observado na figura 5.2, com altura de 15 metros e diâmetro de 40 metros aproximadamente, cada tanque possui uma capacidade de armazenamento de cerca de 20 mil m^3 de volume.

Com bombas de alimentação com capacidades de 200 m^3/h de vazão, um tanque pode ser completamente enchido por duas bombas em 50 horas.

Figura 5.2: Modelo 3D de um tanque de armazenamento de álcool.

Com esses parâmetros, uma variação de 0,5 m no nível do tanque, que corresponde a uma variação de 630 m³ de volume, ocorre em 1h35min.

Isto significa que os instrumentos a serem instalados nesta unidade podem ser configurados para atualizarem seus valores em taxas acima de 1 minuto.

Informações de catálogos³⁷ de fornecedores informam que nestas condições, o consumo de energia é baixo e que sua vida útil sem a necessidade da troca de bateria é de cerca de 10 anos.

Face a essas informações, uma possível rede a ser configurada é uma rede *mesh*, com taxa de atualização da ordem de 2 minutos, com a distribuição dos instrumentos conforme figura 5.3.

Com os instrumentos localizados nos topos dos tanques de armazenagem, todos possuem visada livre, sem interferências entre eles.

Como o requisito de tempo não é limitante e, por consequência, o consumo de energia também não é, os instrumentos e o provedor de acesso nesta configuração são definidos com antenas do tipo omnidirecionais, abrangendo em 360° a área de cobertura.

O provedor de acesso pode ser tanto interligado a um sistema de controle ou conectado a um outro provedor de acesso em uma outra unidade, configurando uma topologia *mesh* interna e árvore externa. Apesar de existir tecnologia para alimentar esses provedores de acesso por células solares, informações de catálogo de fornecedores informam que os provedores de acesso necessitam ser alimentados por fonte externa de energia.

A tabela 5.1 resume as características da implementação desta rede.

Tabela 5.1: Características da rede: unidade de tancagem

Características da rede	
Topologia:	<i>Mesh</i>
Alimentação instrumentos:	Bateria interna
Alimentação provedor de acesso:	Alimentação externa
Tempo de acesso à rede pelos instrumentos:	1 a 5 min
Número de instrumentos:	16
Número de provedores de acesso:	1

Fonte: Riego, 2009.

³⁷ Instrumentos com protocolo WirelessHART, em uma rede *mesh* com comunicação até 2 vizinhos.

Figura 5.3: Distribuição de instrumentos sem fio: unidade de tancagem.

5.2. UNIDADE DE PREPARO DE LEITE DE CAL/PRODUTOS QUÍMICOS

A unidade de preparo de cal possui dimensões bem menores das encontradas na unidade de tancagem. Nessa área, os requisitos de tempo também são mais exigentes, mas ainda não críticos, figurando na categoria de classe 2 ou 3 conforme tabela 3.5.

Seu modelo 3D segue ilustrado na figura 5.4 e sua planta de distribuição de instrumentos na figura 5.5.

Fonte: Riego, 2009.

Figura 5.4: Modelo 3D da unidade de leite de cal/produtos químicos.

Com tanques de dimensões informados pela tabela 5.2, nota-se uma enorme diferença com relação às dimensões da unidade de tancagem. Em virtude dessas dimensões e das condições de processo, esta unidade demanda tempos menores de resposta dos instrumentos.

Tabela 5.2: Dimensões dos tanques e vasos: unid. de leite de cal/prod.químicos.

#	Altura	Diâmetro	Volume
1	6,0 m	4,0 m	~75 m ³
2	3,5 m	3,0 m	~25 m ³
3	3,0 m	2,0 m	~9,5 m ³
4	4,5 m	6,6 m	~153 m ³
5	4,0 m	4,0 m	~50 m ³

Fonte: Riego, 2009.

Figura 5.5: Distribuição de instrumentos sem fio: unidade de leite de cal/produtos químicos.

Configurados em uma topologia tipo árvore, os provedores de acesso foram localizados de forma a garantir visada livre entre eles e os instrumentos e entre si. Nesse tipo de configuração, a fim de maximizar sua vida útil, os instrumentos possuem antenas direcionais, limitando a área de transmissão apenas para o seu provedor de acesso respectivo e consumindo menos energia. O provedor de acesso, por ser alimentado por fonte externa de energia ou por painéis solares, pode ter sua antena do tipo omni-direcional, cobrindo 360°. Esse tipo de topologia aumenta a velocidade de comunicação do sistema (taxa de transferência) e essa configuração aumenta a confiabilidade, pois caso um provedor de acesso pare de funcionar, os instrumentos podem ser configurados para se comunicarem com os outros dois provedores restantes.

A tabela 5.3 resume as características da implementação desta rede.

Tabela 5.3: Características da rede: unidade de leite de cal/produtos químicos

Características da rede	
Topologia:	Árvore
Alimentação instrumentos:	Bateria interna / Vibração (bombas)
Alimentação provedor de acesso:	Alimentação externa / painel solar
Tempo de acesso à rede pelos instrumentos:	10s / 1s (bombas)
Número de instrumentos:	16
Número de provedores de acesso:	3

Fonte: Riego, 2009.

Uma característica ilustrada nesta instalação e que futuramente poderá ser replicada em qualquer outra, é a instalação de instrumentos sem fio no sistema de selagem das bombas. Neste tipo de instalação, poderá ser instalados dispositivos cuja alimentação é obtida através do novo conceito de energia de vibração, conforme explicado no item 4.1.

5.3. UNIDADE DE FERMENTAÇÃO (DORNAS).

A unidade de preparo de fermentação, conforme ilustrado na figura 5.6, ao contrário das duas outras áreas apresentadas, possui uma densidade muito grande de estrutura metálica de suportaço e acesso. Essa estrutura, apesar de concentrada na parte superior das dornas, circunda a maior parte dos instrumentos e válvulas que esta área contém.

Apesar de possuir demandas similares às da unidade de preparo de leite de cal, face a esta grande concentração de estrutura metálica – que nos remete a possíveis questões relacionadas a interferências eletromagnéticas nas transmissões – e por possuir malhas de controle no nível superior das dornas, não se mostra razoável a decisão de utilizar redes sem fio nesta unidade sem a realização de uma análise mais elaborada.

Estudos detalhados de visada para definição da locação dos instrumentos e provedores de acesso devem ser realizados, garantindo assim a não interferência da estrutura da comunicação. Estudos para a definição do número de provedores de

acesso e o tipo de topologia também devem ser realizados, com o intuito de estabelecer os tempos máximos aceitáveis de cada enlace de comunicação.

Figura 5.6: Modelo 3D da unidade de fermentação.

Figura 5.7: Vista de planta: alta densidade de estrutura metálica.

6. CONCLUSÃO

A tecnologia de transmissão de dados sem fio evoluiu tão rapidamente na última década, que seus efeitos atingiram a indústria de processos, fomentadas pelas aparentes economia de materiais de instalação (cabos, eletrodutos, bandejas e acessórios), redução do tempo de instalação dessa infra-estrutura e de comissionamento e partida das unidades. Face a esta nova demanda, este trabalho apresentou um novo conceito de transmissão de dados na indústria de processos: as redes de transmissão sem fio.

Foram estudados os conceitos que fundamentam este tipo de transmissão, como a técnica de espalhamento espectral do sinal transmitido, as formas de polarização e direcionamento do sinal através das antenas, as vantagens e desvantagens de cada tipo de arquitetura de rede, e os dispositivos necessários para que uma rede sem fio seja implementada.

Cada conceito listado representa um item de fundamental importância para o funcionamento da tecnologia, garantindo segurança intrínseca na transmissão dos dados e uma opção para economia de energia que deve ter avaliado seu custo x benefício.

Também foram analisados os requisitos que devem ser considerados na implementação de uma rede sem fio e exemplos de aplicação foram propostos para consolidação do exposto.

Uma aplicação deve ser estruturada levando em consideração os cinco requisitos de uma transmissão sem fio: confiabilidade, tempo de latência, taxa de transferência, segurança e consumo de energia; e para que resultados satisfatórios sejam obtidos, estes cinco pilares devem ser dosados de forma adequada para cada aplicação, em uma relação de compromisso entre eles, uma vez que a busca exagerada de um requisito penaliza outros.

Foram constatados que entidades certificadoras, no intuito de ocupar as lacunas da falta de padronização em tecnologias emergentes, criaram grupos tarefa para que normas fossem publicadas e que protocolos abertos fossem desenvolvidos. Neste cenário, duas normas dispostam na indústria de processos: a IEC/PAS-62591 (comumente chamada de WirelessHART) e a ISA-100.11a. Ambas as normas, são

fundamentadas na norma IEEE-802.15.4, desenvolvida com o intuito de ser uma norma que privilegiasse o baixo consumo de energia para aplicações do tipo PAN.

A busca por novas formas de geração de energia também obteve seu destaque no estudo, que verificou a existência de inúmeros estudos que estão sendo desenvolvidos, desde a busca por baterias de maior duração a fontes alternativas de geração, como a energia obtida da vibração e do sol.

Este trabalho não teve como objetivo o detalhamento das normas existentes e aplicações específicas, mas sim um estudo mais abrangente e qualitativo desta tecnologia que se mostra bastante incipiente na indústria de processos mas que, no conceito do autor, ocupará seu espaço e figurará como uma opção viável no rol das transmissões de sinais de campo.

Como toda nova tecnologia, existem questões que devem ser cuidadosamente endereçadas, para que se possa obter a confiança necessária para a utilização. Contudo, ao final deste trabalho percebe-se que as maiores barreiras a serem superadas não residem na tecnologia – que apesar de recente, possui maturação suficiente para ser implantada – mas sim na capacitação do corpo técnico dos profissionais “clientes” desta tecnologia, uma vez que esses novos conceitos demandam não somente a competência na área de automação deste profissional, mas também na área da telecomunicações.

Entretanto, além da barreira acima, existem outros desafios a serem vencidos para que as transmissões sem fio possam vir a ser utilizadas, e nesse aspecto, novos trabalhos deverão ser realizados com o intuito de trazer confiança e segurança para uma indústria tão conservadora como a indústria de processos.

Dentre esses trabalhos, podemos citar:

- Estudo detalhado das normas existentes;
- Simulações de aplicações existentes monitorando os parâmetros da rede, para que seja possível propor arquiteturas exclusivas;
- Integração de formas de geração de energia com instrumentos existentes;
- Estudo econômico-financeiro que quantifique a substituição da tecnologia fiada pela sem fio;

- Estudo do impacto que as interferências eletromagnéticas causam na transmissão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAWIEH, B.; ASSI C.; MOUFTAH H. *Power-aware ad hoc networks with directional antennas: Models and analysis*. Ad Hoc Networks 7, p. 486–499, 2009.

AMERICAN NATIONAL STANDARD; INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. *ANSI/ISA 99.00.01: Security for Industrial Automation and Control Systems - Part 1: Terminology, Concepts, and Models*. 2007.

_____. *ANSI/ISA 99.02.01: Security for Industrial Automation and Control Systems - Establishing an Industrial Automation and Control Systems Security Program*. 2007.

BELL TELEPHONE LABORATORIES. Apresenta as 10 maiores invenções dos Laboratórios Bell, como o transistor. Disponível em: <<http://www.alcatel-lucent.com>>. Acesso em: 05.jan.2009.

BERTOCCO, M. et. al. *Experimental Characterization of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 57, n. 8, p. 1537-1546, Agosto 2008.

BROWN, A. *MEMS across the Valley of Death*. MEMagazine. April, 2006. Disponível em: <<http://www.memagazine.org>>. Acesso em: 19.ago.2009.

BURIAN, R.; YAMAGUCHI, M. *Módulo V – Redes da Automação Industrial*. Apostila do curso de MBA em Automação Industrial. Julho, 2008. PECE – Programa de Educação Continuada – POLI-USP.

CARO, R. *Fieldbus: Where do we stand?*. Intech Magazine. April, 2007. Disponível em: <<http://www.isa.org>>. Acesso em: 16.dez.2008.

_____. *Wireless Networks for Industrial Automation*. Ed. ISA, 3rd edition, 2008. 109p.

CONSIDINE, D. M. *Process Instruments and Controls Handbook*. Ed. McGraw Hill, 3rd edition, 1985. 764p.

_____. *Process Instruments and Controls Handbook*. Ed. McGraw Hill, 4th edition, 1993. 764p.

DHANARAJ, M.; JAYASHREE, S.; MURTHY, C. S. R. *A Novel Battery Aware MAC Protocol for Minimizing Energy $\times$ Latency in Wireless Sensor Networks*. HiPC 2005, LNCS 3769, p. 312-321, 2005.

FOUNDATION FIELDBUS. Apresenta informações sobre o protocolo Foundation Fieldbus de comunicação. Disponível em: <<http://www.fieldbus.org>>. Acesso em: 26.jan.2009.

FRANCOMME, J.; MERCIER, G.; VAL, T. *A simple method for guaranteed deadline of periodic messages in 802.15.4 cluster cells for automation control applications*. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 11., 2006, Praga. Anais... Praga: HAL, 2006.

FRUETT, F. *Introdução aos Sensores Microeletrônicos*. Apresenta informações sobre sensores microeletrônicos. Notas de Aula de Pós-Graduação – IE-012. Unicamp. 2008.

GUTIERREZ, R. M.; PAN S. S. *Complexo Eletrônico: Automação do Controle Industrial*. BNDES - Estudo Setorial 28. Setembro, 2008.

GUTIERREZ, J. et al. *IEEE 802.15.4: A developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks*. IEEE Network. September/October, p. 12-19, 2001.

HAMEED, M. et al. *Performance Investigation and Optimization of IEEE802.15.4 for Industrial Wireless Sensor Networks*. IEEE. p. 1016-1022, 2008.

HART COMM. Apresenta informações sobre o protocolo HART de comunicação. Disponível em: <<http://www.hartcomm2.org>>. Acesso em: 05.jan.2009.

Industrial Wireless Technology for the 21st Century – December, 2002. Industrial Wireless Community. Disponível em: <<http://www.energy.gov>>. Acesso em: 12.dez.2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. 2006.

- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC/PAS 62591: Industrial communication networks – Fieldbus specifications – WirelessHART communication network and communication profile*. 2009.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. *ISA 100.11a: Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications*. 2008.
- LEE, J. S. *An experiment on performance study of IEEE802.15.4 wireless networks*. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 10., 2005, Catania, Itália. Anais...
- LIMA, A. C. *Fundamentos de Telecomunicações – Teoria Eletromagnética e Aplicações*. UFBA – Universidade Federal da Bahia. 2002.
- MANGES, W. W.; ALLGOOD, G. O.; SMITH, S. F. *It's time for sensors to go wireless part 2: Take a good technology and make it an economic success*. Sensors: The Journal of Applied Sensing Technology. v. 16(5), p. 70-80, 1999.
- MANGES, W. W. *ISA100.11a – Principles of Operation, Overview*. Web Seminar. 11.September.2007. Disponível em: <<http://www.isa.org/isa100wireless>>. Acesso em: 07.dez.2008.
- _____. *An Overview of Industrial Wireless, Applications and Technologies - An ISA100-WINA Tutorial*. ISA100 Wireless Solutions Summit. 18-19.May.2008, Cleveland. Disponível em: <<http://www.isa.org/isa100summit>>. Acesso em 19.05.2008.
- McCUNE, E. *DSSS vs. FHSS narrowband interference performance issues*. RF Design Magazine, p. 90-104. September, 2000. Disponível em: <<http://www.rfdesing.com>>. Acesso em: 16.fev.2009.
- NACHTIGAL, C. L.; *Instrumentation and Control*. Wiley Series in Mechanical Engineering Practice, 1990. 890p.
- PESSA, R. P. *Manual de Treinamento SMAR: Instrumentação Básica para Controle de Processos*. rev. 1.4. 1998.
- PEREIRA, A. P. *Manual de Treinamento EMERSON: Introdução ao Detalhamento de Projetos com Protocolos Digitais de Comunicação*. 2003.

PROFIBUS. Apresenta informações sobre o protocolo PROFIBUS PA de comunicação. Disponível em: <<http://www.profibus.com/pb>>. Acesso em: 26.jan.2009.

RACKLEY, S. *Wireless Networking Technology*. Great Britain: Newnes, 2007. 416p.

RALEIGH, P. *Attitudes to Wireless*. Process Engineering magazine. n. 89, p. 29-34, September/October, 2008.

ROUNDY, S. et al. *Power Sources for Wireless Sensor Networks*. EWSN 2004, LNCS 2920, p. 1-17, 2004.

SAVELLS, D.; McADAMS, B. *Em 2008, wireless, sem dúvida*. Intech magazine. n. 101, p. 22-26, 2008.

SCHWEITZER, P. *A bela e a fera*. Intech magazine. n. 101, p. 28-30, 2008.

SIERRA, G.; KARSCHNIA, B. *Wireless as a hot topic*. Intech magazine, September, 2005. Disponível em: <<http://www.isa.org>>. Acesso em: 05.jan.2009.

WANG, J.; WANG, H.; YU, H.; XU, A. *Research of Architecture and Scheduling for Wireless Industrial Control System*. IEEE Proceedings of the International Conference on Information Acquisition, p. 936-940, Agosto, 2006.

ZHANG, R.; ZILIC, Z.; RADECKA, K. *Structuring Measurements for Modeling and the Deployment of Industrial Wireless Networks*. IEEE ISIE 2006. July, p. 2880-2885, 2006.

APÊNDICE A – PIRÂMIDE DE AUTOMAÇÃO

Em uma estrutura industrial de automação é possível definir níveis de hierarquia de automação de acordo com sua funcionalidade específica. Os sistemas existentes em uma indústria podem ser representados pela figura A.1, possuindo as seguintes características:

- Nível 0: Nível composto de sensores (transmissores) e atuadores, e que corresponde a interação direta com o processo. Deste nível fazem parte os sensores de temperatura, pressão, vazão, assim como os posicionadores de válvulas de controle, inversores de frequência, botoeiras de acionamento de motores e válvulas etc.
- Nível 1: Nível composto dos controladores de processo. Esses controladores recebem e interpretam os sinais enviados pelos sensores, processam (através de uma lógica programada) e enviam sinais para os dispositivos atuadores. Este nível corresponde aos controladores lógicos programáveis (CLP's) e os sistemas digitais de controle distribuídos (SDCD's). Os processamentos são realizados com o intuito de se otimizar o controle das malhas individualmente, ou realizar lógicas de atuação no processo de forma individual.
- Nível 2: Nível composto por sistemas supervisórios ou autônomos, com o intuito de otimizar globalmente o processo da unidade industrial ou alterar seus parâmetros de controle. Essa otimização pode ser realizada por operadores de forma manual, em virtude da experiência individual, ou através de sistemas de gerenciamento e otimização dos processos. Um exemplo de atuação de sistemas neste nível é um aplicativo de gerenciamento de vapor para a indústria, que consiste em um sistema que integra e controla a produção de vapor na caldeira a medida que os consumidores (áreas da fábrica) necessitam, evitando uma produção fixa e desperdício de energia e água. Esse sistema processa os sinais recebidos dos controladores de nível 1, processa as informações recebidas e envia um novo conjunto de *set-points* de ajuste para cada controlador das unidades de produção.

- Nível 3: Nível composto por sistemas que visam à coordenação geral da produção, integrando o nível produtivo com as demandas acordadas de venda, minimizando assim estoques de produção.
- Nível 4: Nível composto por sistemas que visam à integração geral da empresa, através de sistemas como o SAP, integrando a produção com o planejamento fiscal e financeiro da empresa, otimizando assim seus recursos.

Figura A.1: Pirâmide de automação

Uma outra forma de representar as redes de automação é agrupá-las conforme sua utilização e suas funcionalidades, em cada nível definido anteriormente. Esse agrupamento, conforme ilustrado na figura A.2, nos permite compreender que as redes entre os dispositivos e os níveis devem ser cada vez mais interconectadas, permitindo uma maior integração entre os sistemas de medição, controle e atuação no processo, e garantindo um completo gerenciamento e controle da produção.

Assim como os níveis hierárquicos, cada categoria de rede possui seus requisitos para um bom funcionamento. As informações trafegadas nos níveis superiores ao Nível 1 demandam uma maior capacidade de transmissão, devido a um volume maior de informação trafegada. Os níveis 0 e 1, apesar de possuírem controladores dedicados para o controle dos processos de produção, não requerem uma capacidade de manipulação de informação alta, mas sim, determinística.

A escolha das redes de comunicação mais adequadas para um sistema de automação deve ser baseada nas características da rede e na necessidade do usuário. Conforme ilustrado por Burian (2008), as características das redes de automação podem ser listadas como:

- Meio físico de transmissão;
- Topologia da rede;
- Protocolo de controle de acesso ao meio físico de transmissão;
- Velocidade e taxa de transferência;
- Tipo de transmissão de dados no tempo;
- Método de comunicação;
- Tipo de tráfego.

Figura A.2: Níveis das redes de comunicação