



Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade de Coimbra

Departamento de Física

# Rede de sensores inteligentes sem fios para a supervisão de parques de reservatórios industriais

---

Tese de Mestrado

Engenharia Física

Ivo Daniel G. Moreno

Professor Coordenador: Francisco Cardoso

Coimbra, Setembro de 2009

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade de Coimbra

Departamento de Física

# Rede de sensores inteligentes sem fios para a supervisão de parques de reservatórios industriais

---

Tese de Mestrado de Engenharia Física,  
realizada por Ivo Daniel G. Moreno sob a  
orientação do professor Francisco Cardoso

Coimbra, Setembro de 2009

## Agradecimentos

No fim deste trabalho, alguns agradecimentos não podem deixar de ser feitos àqueles que, de uma ou de outra forma, para ele contribuíram. Assim, pelas interessantes trocas de ideias e, sobretudo, de conhecimento que proporcionaram, começo por agradecer aos colaboradores da Eneida, nomeadamente ao Rui Gomes, ao José Oliveira e ao Alejandro Cruz, terminando num maior e justo agradecimento ao orientador deste projecto, o professor Francisco Cardoso.

Também por este texto representar o fim de um outro e maior percurso (...ou apenas o seu início), por me acompanharem e apoiarem desde o primeiro ano de faculdade, não posso deixar de agradecer aos meus amigos e colegas de curso. Da mesma forma, agradeço a todos os professores que, de uma ou de outra forma, contribuíram para todo o meu percurso académico.

Pelas mais diversas razões, termino com um profundo agradecimento à minha família, sem esquecer “a minha Beta”, a minha namorada a quem, nos últimos tempos, deixei de dedicar a merecida atenção.

# Índice

<i>Capítulo I</i>	Introdução .....	1
I.1	Objectivos .....	1
I.2	Motivação e Oportunidades .....	2
I.3	Estrutura Conceptual .....	3
<i>Capítulo II</i>	Monitorização e Controlo de Processos Industriais: Estruturação e Tecnologias .....	5
II.1	A Evolução dos Sistemas de Instrumentação Industrial.....	5
II.2	Mecanismos de Integração .....	8
II.2.1	Arquitecturas de Redes Locais .....	9
II.2.2	Comunicações Cabladas.....	13
II.2.3	Comunicações Sem Fios .....	16
II.3	Gestão de Potência em Dispositivos de Instrumentação Industrial.....	17
II.4	O Sistema de Aquisição de Dados: Arquitectura e Tecnologia .....	19
<i>Capítulo III</i>	A Unidade de Aquisição de Dados.....	20
III.1	O Parque de Reservatórios: A Instrumentação de um Tanque.....	20
III.2	A Unidade de Aquisição de Dados.....	23
III.2.1	A Unidade de Aquisição de Dados: Especificação Funcional .....	23
III.2.2	A Unidade de Aquisição de Dados: O Módulo <i>Gateway</i> .....	25
<i>Capítulo IV</i>	A Rede de Comunicações do Sistema de Aquisição de Dados .....	27
IV.1	A Rede de Comunicações: Visão Geral .....	27
IV.2	A Arquitectura da Rede de Comunicações.....	28
IV.2.1	A Arquitectura da Rede de Comunicações: Estudos Prévios.....	29
IV.2.2	A Arquitectura da Rede de Comunicações: Conclusão.....	32
IV.2.3	O Nó de Integração da Informação .....	33
IV.3	O Protocolo de Comunicações .....	34

IV.3.1	O Protocolo de Comunicações: Estrutura .....	34
<i>Capítulo V</i>	Conclusão.....	41
V.1	Análise ao Sistema de Aquisição de Dados .....	41
V.2	Trabalho Futuro.....	43
Bibliografia		44

# *Capítulo I*

## **Introdução**

### **I.1 Objectivos**

Com este projecto, pretende-se criar um sistema de aquisição de dados distribuído, embebido e não cablado, optimizado para a monitorização remota de parques de reservatórios de matérias potencialmente explosivas, como são os das refinarias petroquímicas.

Sendo um sistema distribuído, e ao contrário do que se verifica com a esmagadora maioria dos sistemas de monitorização actualmente implementados, este não será formado por uma única unidade, à qual convergiriam todas as variáveis de campo, mas sim por várias e pequenas unidades de aquisição de dados. Cada uma destas unidades será posteriormente colocada em cada um dos reservatórios, sendo a ela conectada o conjunto de sensores e de actuadores já ali instalado.

Por as unidades de aquisição de dados se encontrarem dispersas ao longo do parque de reservatórios, o sistema só será verdadeiramente constituído quando for estabelecida uma rede de comunicações entre estas, rede essa que terá que garantir uma transmissão fiável e segura da informação entretanto recolhida pelas várias unidades. Por sua vez, aquela informação terá como único destino uma unidade *gateway* que estabelecerá a ponte entre o sistema de aquisição de dados implementado no parque e um segundo sistema definido pelo utilizador, algo que poderá tomar a forma de uma base de dados e/ou de um terminal para visualização de dados e de alertas, no complexo industrial ou, até, algures no mundo. Destinando-se à monitorização de um parque de reservatórios de matérias potencialmente explosivas, a rede de comunicações do sistema terá ainda que, de uma forma rápida e eficaz, ser capaz de detectar, sinalizar e recuperar de eventuais falhas que possam ocorrer em elementos seus constituintes, mantendo, enquanto tal for possível, a sua integridade. Esta rede de comunicações será baseada em tecnologia *wireless*.

Para a posterior instalação em parques de reservatórios de matérias potencialmente explosivas, as unidades de aquisição de dados que formam este sistema terão que ser homologadas segundo a norma ATEX. Por se destinarem ao ambiente exterior e estando sujeitas aos elementos, as mesmas unidades terão ainda que ser construídas de forma a respeitar a norma IP 65. As opções tomadas ao longo do desenvolvimento deste sistema não deverão, devido a requerimentos, inviabilizar, ou mesmo dificultar de sobremaneira, o cumprimento daquelas normas e posterior homologação do equipamento.

## I.2 Motivação e Oportunidades

Um parque de reservatórios (*tank farm*) de uma refinaria petroquímica é caracterizado, essencialmente, por dispor de um largo número de reservatórios ao longo de uma vasta área. A título de exemplo, a refinaria da Petrogal em Sines, com uma área de implantação de 320 ha, possui, para armazenagem de 8 diferentes produtos, um total de 153 tanques, sendo que o tanque mais afastado da sala de controlo de movimentação de produtos dista, em relação a esta, cerca de 1,70 km. As principais características de um parque de reservatórios, e dos próprios reservatórios, de uma refinaria serão aprofundados no capítulo III.1.



**Figura I-1** Fotografia aérea da zona de armazenagem da refinaria de Sines (fotografia de MAlbino, recolhida via *Google Earth* a 10 de Novembro de 2008)

Tal como acontece num qualquer processo logístico, também num parque de reservatórios de uma refinaria será desejável dispor de um sistema de monitorização remota que, disponibilizando a informação em tempo real, facilite a gestão dos *stocks*. No caso particular do parque de reservatórios, uma constante supervisão do mesmo adiciona ainda uma componente de segurança que, de forma alguma, deva ser descurada. Porém, e devido à especificidade que estes parques apresentam, são levantados sérios condicionantes quando se pretende implementar sistemas de monitorização centralizados, o tipo de sistemas instalado na grande maioria das unidades industriais. Destas condicionantes, a maior talvez seja o avultado, ou até mesmo incomportável, investimento que a adopção de um sistema deste tipo acarreta, do qual a maior parcela se ficará a dever ao custo de aquisição de todos os cabos, um por sensor, necessários para os ligar ao sistema, e à construção das infra-estruturas que os suportarão.

Já os sistemas de monitorização distribuídos, por serem formados por várias unidades de aquisição de dados que são colocadas junto a *clusters* de variáveis, permitem uma redução substancial dos custos relacionados com cablagem, uma vez que os sinais provenientes dos sensores terão agora uma menor distância a percorrer. No entanto, e tal como se propõe com o sistema agora projectado, extremando o conceito de distribuição, alocando a cada reservatório uma unidade de aquisição de dados, e baseando o sistema de monitorização em comunicações sem fios, estes custos serão praticamente anulados. Ainda as comunicações sem fios, aliada à forte modularidade do sistema, permitem que este seja instalado rápida e facilmente. Podendo as unidades de aquisição de dados serem alimentadas pela mesma fonte que alimenta as bombas e válvulas que equipam os reservatórios, depois de instalado, este sistema não necessitará de qualquer tipo de manutenção. Assim, com base nas várias características referidas, os custos de aquisição, de implementação e de operação deste sistema serão, apenas, uma pequena fracção do que seriam se de um típico sistema de monitorização cablado e centralizado se tratasse.

Apesar de as comunicações sem fios trazerem a este sistema um importante conjunto de vantagens, as quais se tornam por demais evidentes quando se pretende monitorizar um amplo conjunto de variáveis dispersas por uma vasta área, as mesmas comunicações sem fios podem constituir um considerável entrave à adopção deste sistema por parte do meio industrial. Para fundamentar este receio, a fraca segurança e a reduzida fiabilidade destas comunicações são os pontos fracos mais frequentemente apontados.

Com a escolha adequada da arquitectura da rede de comunicações e do seu protocolo, a segurança e a fiabilidade do sistema de monitorização aqui proposto será bastante semelhante à dos actuais sistemas cablados. Juntando-se-lhes o facto de este novo sistema significar um investimento substancialmente menor que estes últimos, estaremos perante uma solução bastante mais atractiva para o cliente.

### **I.3 Estrutura Conceptual**

O corpo principal deste documento encontra-se dividido em três capítulos. Assim, no Capítulo II, são apresentadas, de uma forma breve, as tecnologias que actualmente mais se usam em instrumentação industrial, nomeadamente os sistemas de controlo de processos e os mecanismos de integração desses mesmos sistemas. O facto de conhecer estas tecnologias, tomando conta das suas principais características, pontos fracos e pontos fortes, permite melhor justificar e perceber as escolhas e compromissos que foram tomados ao longo do desenvolvimento deste projecto. Já o Capítulo III é iniciado com a descrição de um parque de reservatórios para produtos petroquímicos, identificando-se aí as principais condicionantes que

este poderá colocar à implementação de um sistema de aquisição de dados. A dar continuação ao terceiro capítulo, são depois indicadas algumas das características que a unidade de aquisição de dados deverá apresentar. O capítulo seguinte, o Capítulo IV, é dedicado à rede de comunicações do sistema de aquisição de dados, sendo aí apresentado e explanado um novo protocolo de comunicações

Os três principais capítulos, atrás indicados, serão precedidos pelo Capítulo I, a introdução, onde constam os objectivos deste projecto e qual a sua razão de ser. A finalizar este documento, no Capítulo V, encontra-se a conclusão, onde, de uma forma breve, se analisa o sistema de aquisição de dados projectado, identificando as suas características mais relevantes.

## *Capítulo II*

# **Monitorização e Controlo de Processos Industriais: Estruturação e Tecnologias**

### **II.1 A Evolução dos Sistemas de Instrumentação Industrial**

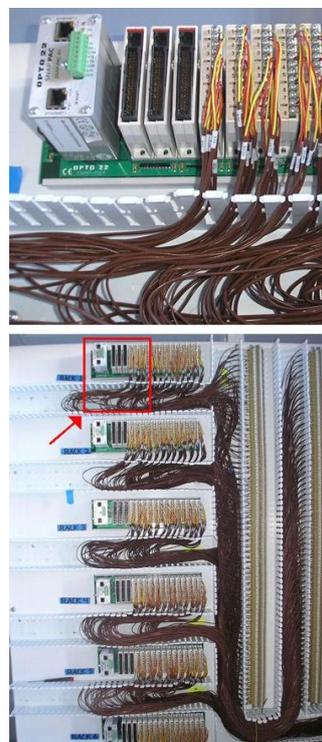
Nos anos 60, a indústria, e em especial a automóvel, começou a procurar aumentar a flexibilidade das suas linhas de produção de forma a melhorar a produtividade. Durante esse processo, tornou-se óbvia a necessidade de criar um novo sistema de automação capaz de substituir as cadeias de relés então usadas, uma vez que a reconfiguração destas era um processo demorado e pouco prático. No final daquela década, haveria então de surgir, pela mão da Modicon, o primeiro sistema de controlo baseado em microcomputadores, o PLC (*Programmable Logic Controller*).

Programados em diagrama de escada, tal como acontecia com as precursoras cadeias de relés, os PLCs foram, ao ritmo da evolução tecnológica, ganhando novas funcionalidades e uma maior versatilidade. Antes apenas capaz de tratar e controlar um pequeno número de variáveis digitais, hoje os seus promotores garantem que não existe uma aplicação onde este sistema não possa ser usado e, de facto, os PLCs são ainda a principal e mais popular solução usada em instrumentação industrial. No entanto, e apesar de estes sistemas serem implementados em números consideráveis, apenas na década de 90, ao ser estabelecido o padrão IEC 61131-3, os vários fabricantes de PLCs iniciaram um movimento de convergência que visava a adopção de linguagens de programação e de protocolos de comunicação padronizados em detrimento das linguagens e protocolos proprietários até então usados. Porém, e uma vez que é longo o período de tempo que decorre entre a aquisição destes equipamentos e a sua posterior actualização ou substituição, continua a ser difícil garantir a compatibilidade e interoperabilidade entre PLCs já

instalados e novos PLCs e/ou módulos que, eventualmente, venham a ser adquiridos e adicionados à unidade original, tendo em vista a actualização das características desta.

Com a maioria das aplicações industriais a requerer soluções pouco complexas, os fabricantes de PLCs centraram os seus esforços, sobretudo, em procurar oferecer sistemas simples e baratos. No entanto, cerca de 20% das aplicações requerem uma maior capacidade de cálculo e a possibilidade de implementar algoritmos mais complexos, duas características que não são oferecidas pelos tradicionais PLCs. Dessa necessidade surgiu então, na passagem da década de 80 para a de 90, um novo sistema de controlo que reunia a robustez dos PLCs com a flexibilidade dos PCs, um sistema que, em 2001, a ARC Advisory Group haveria de baptizar como PAC (*Programmable Automation Controller*).

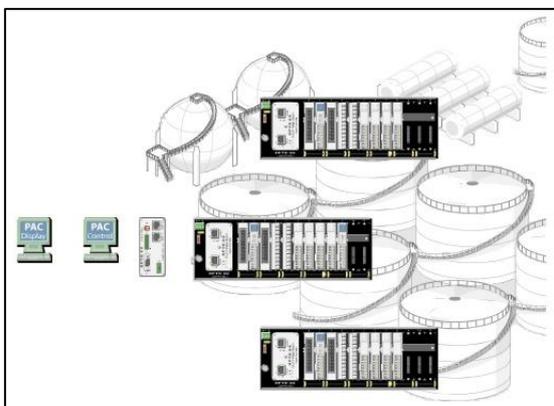
A primeira característica que destaca o PAC do PLC é o facto de o primeiro ser programado da mesma forma que os computadores e não em diagrama de escada, o que, aliado a uma maior capacidade de processamento, permite levar a cabo tarefas mais complexas e um conjunto maior destas, quer em quantidade, quer em diversidade. Também as comunicações e linguagens de programação usadas não são proprietárias mas sim padronizadas, algo que garante uma completa interoperabilidade entre diferentes módulos e facilita a expansão ou reconfiguração do sistema. De facto, a promoção da distribuição da capacidade de processamento e de várias funcionalidades por diferentes módulos que se regista nos PACs constitui uma vantagem sobre os PLCs, resultando numa maior flexibilidade do sistema, que pode agora, de uma forma mais fácil e prática, ser construído à medida dos requisitos de determinada aplicação.



**Figura II-1** Aspecto de uma rack de um PAC do fabricante Opto 22, onde é notória a elevada concentração de I/O.

Em comum, os PLCs e os PACs têm o facto de serem sistemas essencialmente centralizados, nos quais as funções de controlo e as entradas e saídas das variáveis de campo se encontram concentradas num número bastante restrito de unidades adjacentes. Em processos que reúnam largas centenas de variáveis dispersas por enormes áreas, processos como os que ocorrem num parque de uma refinaria petroquímica ou numa rede de distribuição eléctrica ou de água, o uso de sistemas deste tipo acarreta custos elevadíssimos. Tal fica-se a dever, essencialmente, ao facto de as variáveis estarem a longas distâncias das unidades de I/O, sendo então necessário construir novas e maiores infra-estruturas que alojem os cabos das diversas

variáveis estendidos ao longo de distâncias consideráveis. Ainda com o aumento dessas distâncias, os sinais analógicos tornam-se mais susceptíveis a serem corrompidos pelo ruído electromagnético que eventualmente possa existir no ambiente atravessado pela respectiva cablagem.



**Figura II-2** Exemplo da aplicação de um PAC num parque de reservatórios (proposto no website do fabricante Opto 22)

monitorização e controlo executadas localmente, junto às variáveis. No entanto, na prática, os DCSs não são mais do que um pequeno conjunto de PACs ou PLCs distribuídos pelos grupos das variáveis de campo e ligados a uma unidade central através de uma rede de comunicações (esta, habitualmente, usa protocolos de comunicação determinísticos, como os protocolos *fieldbus*).

Já ao longo da última década, uma série de avanços tecnológicos, ainda aliado a uma forte diminuição nos custos de aquisição dos componentes de *hardware*, levou à concretização de um novo conceito de sistemas de controlo distribuído, tendo, actualmente, nas redes de sensores sem fios (WSN – *Wireless Sensor Networks*) o seu expoente máximo. Este sistema é constituído por inúmeras e pequenas unidades, idealmente autónomas, que monitorizarão e /ou controlarão nunca mais que uma dezena de variáveis de campo, sendo que este número tende a aproximar-se de apenas uma variável, levando assim ao extremo o conceito de distribuição. As comunicações entre unidades e entre estas e a unidade central são feitas através de radiofrequência, algo que, por dispensar o uso de qualquer cablagem, torna a instalação do sistema num processo rápido e fácil mas, sobretudo, bastante mais barato do que seria expectável num sistema cablado.

Desenvolvidas inicialmente para aplicações militares, as WSN têm vindo ao longo dos últimos anos a ser usadas em aplicações civis das mais variadas áreas, entre elas a instrumentação industrial. Porém, este é um meio que tem oferecido, e continua a oferecer, uma

Com os fabricantes de semicondutores a oferecerem desde a década de 60 um crescente número de microcomputadores e a preços cada vez menores, a Honeywell e a japonesa Yokogawa haveriam de lançar, em meados da década de 70, os primeiros sistemas de controlo distribuído (DCS – *Distributed Control System*). Nestes sistemas, a capacidade de processamento é distribuída espacialmente, sendo as tarefas de

forte resistência à sua adopção, bem como a qualquer outra solução assente em comunicações sem fios.

Suscitando desde logo o interesse das indústrias petroquímicas, químicas e farmacêuticas, os DCSs têm vindo a conquistar alguma consideração por parte de indústrias mais tradicionais, indústrias onde o uso dos PLCs e dos PACs está ainda fortemente enraizado. Face a estes, os sistemas distribuídos trazem algumas vantagens, tais como a digitalização das variáveis analógicas *in loco*, algo que reduz a incerteza do valor medido. No entanto, talvez a maior vantagem esteja no simples facto de se reduzir, ou mesmo eliminar, o número de cabos que se estenderiam desde as variáveis de campo até junto da unidade central, os mesmos cabos que, quer pela sua aquisição, quer pela construção das devidas infra-estruturas, constituiriam a maior parcela nos custos de um sistema centralizado<sup>1</sup>.

## II.2 Mecanismos de Integração

Quando um sistema informático é constituído por várias unidades separadas fisicamente e distribuídas espacialmente, torna-se necessário estabelecer uma rede de comunicações entre elas. Esta poderá variar quanto à tecnologia usada (sem-fios, cablada, fibra óptica, ...) e à forma como as várias unidades se relacionam entre si. Usualmente, as redes são ainda classificadas segundo o seu tamanho:

### Personal Area Network (PAN)

As redes PAN estão normalmente confinadas à área de um pequeno escritório (não mais que 10m) e são usadas quase somente para conectar os vários periféricos de um computador. As comunicações nesta rede podem ser cabladas, usando tecnologias como o USB, ou sem-fios. Neste último caso, popularizou-se o IrDa (Infrared Data Association), que usa acoplamento óptico, e os padrões para comunicações por radiofrequência definidos pela norma IEEE 802.15, como o Bluetooth (IEEE 802.15.1) ou o ZigBee (IEEE 802.15.4).

### Local Area Network (LAN)

As redes LAN estendem-se usualmente pela área de um edifício, apresentando, em relação às redes PAN, uma largura de banda muito superior. Sucedâneas da ARCNET e do Token Ring, actualmente as tecnologias mais frequentemente usadas nestas redes são a Ethernet

---

<sup>1</sup> Algumas estimativas apontam para que, em certas instalações, o preço da cablagem ascenda a 6000\$ por metro. Um sistema centralizado *high-end* para controlo de sinais remotos poderá ter mais de 8000 I/O com os sinais destes a percorrerem distâncias entre os 150m a 3km.

(IEEE 802.3) e, nas WLANs (Wireless LAN), o Wi-Fi (IEEE 802.11). Ambas as tecnologias apresentam larguras de banda de dezenas de Mb/s, sendo que as últimas revisões feita à norma IEEE 802.3 permitem à primeira atingir valores na casa das dezenas de Gb/s.

### **Metropolitan Area Network (MAN)**

Uma rede MAN destina-se a essencialmente a interligar, através de vias de comunicação com elevadas larguras de banda, um conjunto de LANs e/ou de CANs de uma mesma cidade a uma rede de maiores dimensões.

Sendo considerada um tipo de rede MAN, uma rede CAN (Campus Area Network) interliga, à semelhança da primeira, duas ou mais redes LAN, fazendo-o, no entanto, numa área menor, como o é um campus de uma universidade ou um complexo industrial.

### **Wide Area Network (WAN)**

Uma rede WAN interliga várias redes MAN (ou LAN) ao longo de uma área que pode abranger várias regiões ou mesmo vários países, usando, normalmente, vias de comunicação como as que são detidas pelas companhias telefónicas. A rede WAN mais popular, e também a maior, é a Internet.

## **II.2.1 Arquitecturas de Redes Locais**

Dito de forma sucinta, uma arquitectura de rede descreve a forma como os seus constituintes são interligados e a hierarquia que terão que respeitar, algo que terá repercussões na forma como fluirá a informação ao longo da rede. Podendo ser divididas em dois grandes grupos - redes centralizadas e redes descentralizadas -, cada uma das várias arquitecturas de redes locais apresenta características únicas. Perante uma falha num dos seus elementos constituintes, redes com diferentes arquitecturas reagirão pois de formas diferentes, sendo também diferentes as consequências que advenham dessa mesma falha. A facilidade e o custo de implementação variam igualmente de arquitectura para arquitectura.

Para uma correcta escolha, será pois importante conhecer as principais características das várias arquitecturas de rede, tendo sempre presente a aplicação a que se destinam.

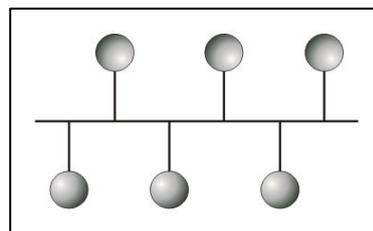
### **Ponto-a-Ponto**

Consiste numa simples ligação entre dois elementos terminais da rede. Esta ligação pode ser permanente, onde a comunicação entre as unidades estará inerentemente garantida, ou feita “a pedido”, tal como acontece na rede de um serviço telefónico. No último caso, o número

de potenciais ligações ponto-a-ponto é proporcional ao quadrado do número de nós, sendo que com o aumento destes aumenta igualmente a robustez e fiabilidade das comunicações.

### Bus

Era esta a arquitectura de rede mais comumente usada nos anos iniciais das redes informáticas, contribuindo para tal a facilidade e o seu baixo custo de implementação bem como a rapidez e simplicidade com que novas unidades podem ser adicionadas à rede.

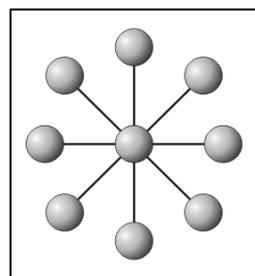


A rede bus é formada por uma única via de comunicações comum a todos os seus elementos constituintes, a qual necessita de ser terminada com uma resistência a fim de evitar a reflexão do sinal propagado e sua posterior deterioração. Uma vez que as mensagens circulam ao longo de um tronco comum, caso duas ou mais unidades da rede transmitam simultaneamente ocorrerá uma colisão entre as mensagens, tornando-se necessário a implementação de um protocolo que evite esta situação. Paralelamente, e excluindo os atrasos na propagação do sinal, uma mensagem será recebida simultaneamente por todos os elementos da rede. Estes factos fazem pois com que esta arquitectura se torne inadequada quando está envolvido um número considerável de unidades e se requeira uma elevada largura de banda. Por não existirem unidades a repetir o sinal transmitido ao longo da via de comunicações, uma rede bus tem ainda o seu desempenho fortemente condicionado pelo comprimento que aquela via terá que apresentar.

Para além do bus dito linear, este pode ainda ser distribuído. Neste caso, à via de comunicações principal, serão conectadas novas vias. O bus distribuído assemelha-se, assim, a uma rede em árvore, com a excepção de que no primeiro caso não existem quaisquer unidades a centralizar a informação.

### Estrela

Numa rede em estrela, todas as unidades da rede estão conectadas a uma unidade central, para a qual transmitirão as suas mensagens. Posteriormente, a unidade central retransmite a mensagem para as unidades às quais se destina.



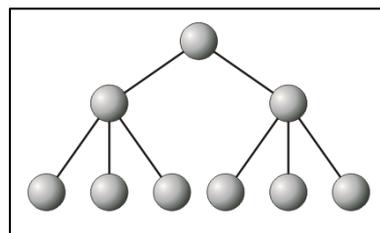
Uma rede em estrela é, à semelhança da rede bus, de fácil implementação e acarreta baixos custos. Em relação àquela, dispõe ainda de uma maior redundância, uma vez que a presença da unidade central garante o funcionamento da rede caso uma ligação periférica falhe permanentemente. No entanto, uma falha na unidade central afectará toda a rede, estando a fiabilidade e robustez desta

intrinsecamente ligada à daquela unidade. Das capacidades desta dependerá ainda o número máximo de unidades que a rede poderá integrar bem como o seu desempenho. Porém, e por ser um sistema centralizado, um upgrade à rede é facilmente conseguido com um aumento das capacidades da unidade central. A detecção de falhas está igualmente facilitada.

As redes em estrela (e as suas variantes) são das arquitecturas mais populares quando se pretende instalar uma rede Ethernet num escritório ou, até, num edifício.

### Árvore/Hierárquica

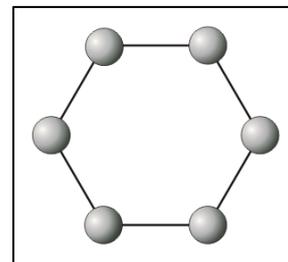
Uma rede em árvore é em tudo semelhante a uma rede em estrela, com a excepção de que não existe uma unidade central. Nesta arquitectura, a unidade principal comunica com uma ou mais unidades do nível hierárquico inferior, às quais, por sua vez, serão conectadas outras unidades hierarquicamente inferiores.



Sendo também ela uma rede centralizada, a rede em árvore apresenta, essencialmente, as mesmas características da rede em estrela. Assim, uma falha numa das unidades intermédias ou na unidade central irá afectar, respectivamente, apenas um dos seus segmentos ou toda a rede. Comparativamente a outras arquitecturas, a arquitectura em árvore requer o uso de mais *hardware*, as unidades intermédias, algo que afecta negativamente o seu custo de implementação e a sua facilidade de configuração. No entanto, e uma vez que tais unidades funcionam igualmente como repetidores, uma rede com esta topologia poderá abranger áreas substancialmente maiores que uma rede em estrela.

### Anel

Uma rede em anel é uma rede descentralizada, onde não existem quaisquer unidades que concentrem a informação enquanto esta circula entre as unidades transmissoras e as receptoras. Nesta arquitectura, cada unidade é sim antecedida e precedida de duas outras unidades, fazendo com que a informação circule ao longo de um anel fechado até chegar ao seu destinatário.



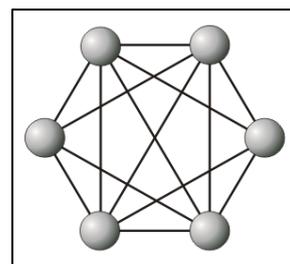
De forma a garantir que todas as unidades tenham oportunidade de transmitir e que duas ou mais mensagens não venham a colidir, é frequente implementar, com esta arquitectura, protocolos baseados em *token passing*. O uso destes protocolos, aliado ao facto de que cada unidade constituinte da rede actue como um repetidor, faz com que as redes em anel se possam estender por enormes distâncias, tornando-as numa escolha popular para a formação de MANs. Para tal contribui ainda o facto de esta arquitectura dispensar o uso de unidades centrais e de,

devido ao uso de *tokens*, todas as unidades processarem quantidades semelhantes de informação, possibilitando assim um melhor desempenho sob elevados volumes de informação comparativamente a outras arquitecturas.

Contrariamente às restantes arquitecturas, em caso de falha de uma qualquer unidade da rede e/ou de uma ligação, toda a rede fica comprometida. Para evitar esta situação, e em redes em anel cabladas, é usual constituir um segundo anel. Este poderá funcionar como *bypass*, permitindo que a informação contorne a unidade afectada, ou como uma via de comunicação de recurso, na qual a informação circulará em sentido contrário ao do anel original, formando assim um anel aberto em forma de “C”. Este método é usado em protocolos como o Spatial Reuse Protocol, da Cisco, ou o IEEE 802.17 (Resilient Packet Ring). Por sua vez, o IBM Token Ring (IEEE 802.5), bastante popular durante a década de 80, é organizado, a nível lógico, com um único anel.

### Emalhada (mesh)

Tal como a rede em anel, uma rede emalhada é uma rede descentralizada. Nesta arquitectura, cada unidade é conectada a todas as restantes unidades ou, alternativamente, apenas a um dado número delas, conforme se trate, e respectivamente, de uma rede totalmente ou parcialmente ligada.



Apresentando, para um mesmo número de unidades, uma soma de possíveis ligações substancialmente maior que a das restantes arquitecturas, a rede emalhada é a arquitectura que oferece mais redundância, tornando-se, conseqüentemente, na rede mais segura e robusta. Estas características serão tão mais assinaláveis quanto mais unidades integrarem a rede, uma vez que estará disponível um maior número de possíveis ligações. Porém, a par da segurança e da robustez, com o tamanho da rede aumenta também a sua complexidade e custos de implementação. Devido a tal facto, raras vezes são implementadas redes emalhadas totalmente ligadas, sendo muito mais comum a sua versão parcialmente ligada. Em termos práticos, com um número mínimo de ligações que cada unidade deverá efectuar a outras unidades, esta opção acaba por oferecer, a um custo e complexidade bastante menor, a mesma redundância das redes emalhadas totalmente ligadas.

Devido ao elevado número de ligações que poderá apresentar<sup>2</sup>, é impraticável a constituição de uma rede emalhada cablada que integre mais do que escassas dezenas de unidades. A maioria das redes que fazem uso desta arquitectura são pois implementadas através de comunicações *wireless*, algo que reduz significativamente o seu custo. Inicialmente

---

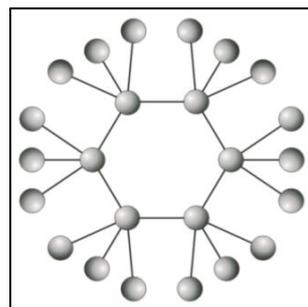
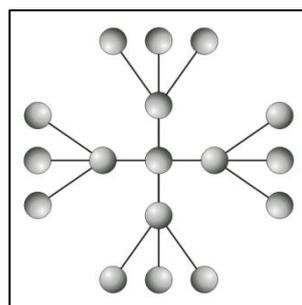
<sup>2</sup> Segundo a lei de Metcalfe, numa rede totalmente ligada, este número é dado por  $n(n - 1) / 2$ , em que  $n$  é o número de unidades que compõem a rede.

desenvolvidas para fins militares, e de entre as várias arquitecturas, são as redes emalhadas sem-fios que, ao longo dos últimos anos, mais atenção têm recebido e mais desenvolvimentos têm conhecido. Grande parte desses esforços visam desenvolver novos protocolos onde, essencialmente, se pretende otimizar a procura do caminho mais curto entre duas unidades e, perante a falha de uma ou mais unidades, também otimizar a capacidade da rede para se auto-reconfigurar e reduzir o tempo que demora a fazê-lo.

### Arquitecturas híbridas

Quando duas ou mais redes de diferentes arquitecturas são associadas, designa-se a arquitectura resultante de híbrida. Ao optar por interligar diferentes arquitecturas, e apesar de tal aumentar a complexidade da rede resultante, procura-se essencialmente destacar os pontos fortes das arquitecturas originais ao mesmo tempo que se atenuam os pontos mais fracos. O uso de arquitecturas híbridas permite ainda aumentar substancialmente o número de unidades que poderão integrar a rede sem que tal acarrete, na mesma proporção, um aumento da complexidade desta. Também a área que a rede poderá cobrir será maior.

Ao lado são mostrados dois exemplos de arquitecturas híbridas. O primeiro mostra uma rede híbrida formada por uma rede em estrela e por várias outras redes em árvore enquanto que o segundo é constituído por uma rede em anel a interligar várias redes em árvore.



## II.2.2 Comunicações Cabladas

Em instrumentação industrial, os sinais trocados entre sensores, actuadores e outros componentes dos sistemas de controlo são quase única e exclusivamente transmitidos sob a forma de sinais eléctricos. Os mesmos sinais eléctricos poderão ainda ser transmitidos de forma analógica ou digital, sendo que a primeira é recorrente nos sistemas centralizados (PLCs e PACs) e a segunda usada nos sistemas distribuídos.

### Transmissão analógica

Os sinais analógicos são transmitidos em voltagem, segundo os padrões 0-5 V, 0-10 V e 0-12 V, ou em corrente, a 4-20 mA ou a 10-50 mA. Em ambas as formas de transmissão, o padrão mais comumente usado é o primeiro (0-5 V para sinais em tensão e 4-20 mA para sinais em corrente).

Devido às características intrínsecas dos fios condutores (resistência, indutância, capacitância e constante temporal), os transitórios entre dois diferentes níveis poderão ser relativamente lentos quando comparados com os que se verificam nos sinais digitais, algo que se repercute negativamente na velocidade de transmissão de informação. No entanto, em sistemas puramente mecânicos, os sinais analógicos são bastante rápidos. Estes sinais são ainda bastante susceptíveis ao ruído electromagnético, abundante numa unidade fabril, e facilmente degradáveis se os fios condutores forem longos e, conseqüentemente, apresentarem uma elevada resistência. Principalmente devido a esta última razão, a grande maioria dos sinais analógicos é transmitido sob a forma de corrente, uma vez que esta se mantém constante ao atravessar uma resistência.

De forma a reduzir estas várias condicionantes, as alimentações dos transmissores e dos receptores terão que ser devidamente isoladas e reguladas, assim como deverão incluir filtros para as frequências indesejadas.

### **Transmissão digital**

De imediato, e face aos analógicos, algumas vantagens são apontadas aos sinais digitais: são transmitidos sem perda de integridade, a uma maior velocidade e consumindo muito menos energia.

Apesar de já existirem alguns protocolos (como o IEEE 488 ou o RS 232), as comunicações digitais no meio industrial não haveriam de ser implementadas em maior escala senão no final da década de 80 com o estabelecimento da norma ISA S50.02 e posterior surgimento dos protocolos *fieldbus*. Só cerca de 10 anos mais tarde haveria de estar pronta uma norma internacional, a IEC 61158, onde são incluídos 8 diferentes protocolos. Desses, o *Foundation Fieldbus* (FF) e o *Profibus* são os mais populares, sendo que o primeiro é usado maioritariamente nos Estados Unidos e Ásia e o segundo na Europa. Apesar de partilharem a mesma camada física, estes dois protocolos não são compatíveis entre si. De resto, investir em comunicações digitais pode, a longo termo, significar um risco mais elevado face às analógicas uma vez que o declínio de um protocolo ou a prevalência de outro pode tornar obsoleta a tecnologia então adquirida. Na tabela presente na página seguinte são indicados alguns dos protocolos mais populares e algumas das suas características.

	Topologia	Comprimento máx. de um segmento	Velocidade máxima	N.º máx. de unidades.	Tamanho máximo da mensagem	Standard
<b>BITBUS</b>	Bus	300m @ 75kb/s	375kb/s	251	248-bytes	IEEE1118
<b>CAN</b>	Bus	500m @ 125kb/s 40m @ 1Mb/s	1Mb/s	64	8 bytes	ISO11898    ISO11519
<b>ControlNet</b>	Bus; árvore; estrela	5km; 250m/48 nós	5Mb/s	99	510 bytes	Aberto
<b>DeviceNet</b>	Bus	500m @ 125kb/s 100m @ 500kb/s	500kb/s	64	8 bytes	Aberto
<b>Foundation Fieldbus</b>	Bus	2000m, 9.5 km no total	31.25kb/s	240	246 bytes	Aberto
<b>INTERBUS</b>	Anel	12.8km	500kb/s	255	64 bytes	EN50253
<b>LON</b>	Bus; árvore	6.1km @ 5kb/s	1.2Mb/s	2	228 bytes	ANSI
<b>Modbus plus</b>	Bus	1.8km	1Mb/s	32	32 bytes	proprietary
<b>P-Net</b>	Bus; Árvore	1200m	76.8kb/s	32 masters; 125 slaves	56 bytes	EN50170
<b>PROFIBUS FMS</b>	Bus	19.2km @ 9.6kb/s 200m @ 500kb/s	500kb/s	127	246 bytes	EN50170
<b>PROFIBUS DP</b>	Bus	1km @ 12Mb/s (4 repetidores)	12Mb/s	127	246 bytes	EN50170
<b>PROFIBUS PA</b>	Bus	1.9km	93.75kb/s	32	246 bytes	EN50170

**Tabela II-1** Comparação entre algumas características de diversos protocolos *fieldbus*.

Dos protocolos enumerados, chama-se a atenção para o CAN (*Controller Area Network*). Lançado em 1987, este protocolo foi desenvolvido pela Bosch tendo em vista a sua aplicação nos automóveis, como forma de interligar os vários componentes electrónicos neles presentes. Entretanto, devido ao baixo custo dos seus controladores e, principalmente, por ser um protocolo intrinsecamente seguro, o CAN tem vindo a ser progressivamente usado em aplicações médicas e industriais, nestas últimas como protocolo *fieldbus*.

### II.2.3 Comunicações Sem Fios

Se, relativamente à alternativa que seria a instalação de um cabo por variável, por permitir reduzir o número de cabos, uma rede cablada apresenta uma relação custo-benefício já por si só atraente, a possibilidade de estabelecer uma comunicação que não envolva quaisquer cabos torna-se bastante mais sedutora.

As comunicações sem fios são usualmente feitas através de acoplamento óptico, ultra-sónico ou por radiofrequência. Esta última opção proporciona uma comunicação a distâncias relativamente longas e sem necessidade de existir uma linha de visão desimpedida entre o emissor e o receptor, ao mesmo tempo que oferece uma largura de banda considerável e consumos energéticos moderados. Principalmente devido a estas características, a comunicação por radiofrequência tornou-se na solução predominante nas comunicações sem fios, sendo tipicamente usadas as frequências livres ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), mormente as bandas a 2,4 GHz, a 915 MHz, na América, e a 433 MHz, na Europa.

A operar nos mesmos 2,4 GHz, existem hoje dois protocolos que são usados na maioria das comunicações sem fios, o IEEE 802.11 e o IEEE 802.15.4. O primeiro protocolo, que, com a revisão de 1999, a IEEE 802.11b, havia de ficar conhecido por *Wi-Fi*, privilegia a largura de banda em detrimento de um menor consumo energético. Efectivamente, o elevado fluxo de informação proporcionado por este padrão (com a revisão de 2003, a IEEE 802.11g, é atingido um máximo de 54 Mb/s) tornou-o popular no meio empresarial e doméstico, onde veio substituir parte das redes informáticas cabladas. No entanto, esta largura de banda é conseguida com os dispositivos envolvidos na comunicação a dissiparem uma potência da ordem de alguns watts, algo que inviabiliza imediatamente o uso do protocolo IEEE 802.11 em sistemas alimentados a bateria onde a eficiência energética é prioritária, sistemas como os que usualmente constituem as redes de sensores sem fios. Por sua vez, o IEEE 802.15.4 é um protocolo orientado para comunicações a curta distância, com velocidades máximas de cerca de 250 Kb/s, onde os consumos energéticos dos dispositivos envolvidos na troca de informação não ultrapassam as poucas dezenas de miliamperes. Comparativamente ao IEEE 802.11, o protocolo de comunicações deste padrão é também ele bastante menos complexo, algo que, por

não constituir uma exigência significativa ao nível do *hardware*, permite construir transmissores e receptores a baixo custo.

Sendo sinónimo de comunicações a baixos custos e consumos, o IEEE 802.15.4 é o protocolo usado na maioria dos sistemas embebidos onde velocidades da ordem das dezenas de Kb/s permitem satisfazer os requisitos impostos. No entanto, e tal como sucedeu com a *Ethernet*, o protocolo IEEE 802.11, ou o *wireless ethernet*, como por vezes é apelidado, tem sido também ele usado em algumas aplicações de controlo e, sobretudo, de monitorização industrial. Hoje, este padrão é implementado em detrimento do IEEE 802.15.4 quando se requerem elevados débitos de informação, como acontece, por exemplo, na transmissão de imagem.

Como foi já referido, ambos os protocolos partilham a mesma frequência livre de 2,4GHz. O IEEE 802.15.4 permite, no entanto, que a comunicação se estabeleça a frequências inferiores (a 915 MHz, na América). Ao usar-se um sinal de menor frequência, ou seja, de maior comprimento de onda, este não será tão condicionado pela presença de obstáculos entre o emissor e o receptor como aconteceria com uma frequência superior, caracterizada por uma maior direcionalidade. Simultaneamente, o uso de frequências mais baixas permite elevar a potência irradiada pelos emissores sem que tal acarrete um aumento do consumo dos mesmos. Com estas duas características, uma transmissão a 915 MHz tem, relativamente às que são feitas a 2,4 GHz, um maior alcance, nomeadamente em ambientes com um elevado número de obstáculos. No entanto, a redução da frequência implica também uma redução na largura de banda.

A grande vantagem que as redes sem fios têm sobre as redes cabladas assenta no óbvio e simples facto de não necessitarem de fios, tornando a instalação de uma rede *wireless* em algo rápido e barato, uma vez que a aquisição de cabos e a construção das suas infra-estruturas é desnecessária. Este facto proporciona ainda uma elevada flexibilidade à rede, pois, perante a deslocalização das unidades existentes e/ou a adição de outras novas, será possível esta auto-reconfigurar-se.

### **II.3 Gestão de Potência em Dispositivos de Instrumentação Industrial**

Qualquer equipamento electrónico necessita, para operar, de uma certa corrente e diferença de potencial, daí resultando a potência que lhe terá que ser fornecida. Desta, apenas uma parte será verdadeiramente consumida pelo equipamento, sendo a restante, e por efeito de Joule, dissipada sob a forma de calor. A eficiência energética de um qualquer componente electrónico terá assim repercussões, não só ao nível do seu consumo, mas também sobre a quantidade de calor que este irá emanar.

Ao longo dos últimos anos, a voltagem, mas sobretudo a corrente, que são requeridas para o funcionamento dos mais diversos componentes electrónicos tem vindo a decrescer substancialmente, daí resultando uma clara diminuição da potência consumida. Inúmeras vantagens advêm de tal facto, começando desde logo pelo óbvio menor consumo energético que os equipamentos formados por estes novos componentes irão apresentar. Necessitando de lhes ser fornecida uma menor quantidade de energia, tornou-se assim plausível o uso de baterias em muitos desses equipamentos, não negligenciando o facto de que para tal contribuiu ainda um significativo desenvolvimento da tecnologia destas. Podendo agora, na alimentação de um dado equipamento, substituir a tensão do sector por baterias, será possível elevar a novos níveis a portabilidade deste.

Outra consequência que resulta da menor potência consumida é a diminuição do calor dissipado pelos componentes electrónicos. A certo ponto, a própria área dos componentes será suficiente para dissipar o calor por eles produzido. Torna-se assim dispensável o uso de dissipadores passivos e/ou activos, sendo que o uso destes últimos trazem impactos negativos ao nível do consumo energético do equipamento bem como a possibilidade de induzir algum ruído electromagnético na linha de alimentação. Se a quantidade de calor dissipada o permitir, poder-se-á ainda suprimir as entradas de ar da caixa que envolve e protege os vários componentes electrónicos. Ao selar e isolar esta caixa, pode-se assim proteger o equipamento de factores externos como a humidade e o pó e/ou prepará-lo para suportar condições atmosféricas adversas. Também qualquer interrupção eléctrica que possa ocorrer no interior desse equipamento ficará isolada e não se estenderá ao exterior. Estas duas características são de importância capital quando os ditos equipamentos se destinam à instrumentação industrial e são usados, por exemplo, em condições adversas, no exterior ou em atmosferas potencialmente explosivas. Os índices de protecção do equipamento contra factores externos e a segurança que o seu uso oferece em atmosferas explosivas são dados, respectivamente, pelas normas IP<sup>3</sup> e ATEX<sup>4</sup>.

Neste projecto, as unidades que irão formar a rede de sensores serão compostas por dois elementos chave, o microcontrolador e o transceptor (*transceiver*) para comunicação sem fios.

---

<sup>3</sup> A norma IP (International Protection rating) é definida pelo padrão internacional IEC 60529 e classifica a caixa envolvente de um equipamento quanto à protecção que esta oferece contra a intrusão de objectos sólidos, poeira ou água. A classificação é expressa na forma IP ij, onde i vai de 0 (não oferece protecção a elementos sólidos) a 6 (não permite a entrada de pó) e j vai de 0 (não oferece protecção contra a água) a 8 (o equipamento pode ser imerso em água para além de um metro em condições definidas pelo fabricante)

<sup>4</sup> A norma ATEX, que deve o seu nome ao título francês da directiva 94/9/EC (*appareils destinés à être utilisés en ATmosphères EXplosibles*), reúne um conjunto de requerimentos exigidos aos dispositivos electrónicos de modo a que estes possam ser usados com segurança em ambientes potencialmente explosivos. Entre esses requisitos encontra-se a necessidade de o dispositivo electrónico não apresentar pontos quentes, susceptíveis de iniciar uma ignição, e de não acumular electricidade electrostática.

Enquanto que os microcontroladores têm vindo a exibir uma clara diminuição da potência consumida, sendo que os actuais, e dependendo da quantidade de periféricos que estes integrem e do uso que se fará deles, podem apresentar consumos máximos na ordem das unidades de mili-Watt (mW), o mesmo não acontece com os *transceivers*. Estes últimos, e devido à natureza das comunicações sem-fios, necessitam de irradiar potência, tanto em maior quantidade quanto maior seja o alcance pretendido para as comunicações. Estes componentes assumem-se assim como sendo os mais dispendiosos a nível energético, sendo comum, numa aplicação que seja alimentada a baterias, activá-los somente quando exista a necessidade de comunicar.

## **II.4 O Sistema de Aquisição de Dados: Arquitectura e Tecnologia**

A principal premissa subjacente a todo o desenvolvimento deste sistema de aquisição de dados é assegurar, sob as mais variadas condições, uma correcta transmissão dos dados recolhidos. Assim, este sistema deverá ser capaz de responder e ultrapassar eventuais falhas em unidades suas constituintes, sendo-lhe garantida uma robustez e fiabilidade elevadas. Estas falhas deverão ainda ser prontamente assinaladas junto ao operador humano. O sistema de aquisição de dados deverá significar ainda, e na perspectiva do cliente, um baixo custo de aquisição e de manutenção.

Tendo em mente tais premissas, e segundo o que será explanado nos capítulos seguintes, o sistema de aquisição de dados será um sistema descentralizado, assente sobre uma rede de comunicações sem fios (IEEE 802.15.4) de arquitectura em anel. Também destinando-se as diversas unidades que o compõem a serem instaladas no exterior e em atmosferas potencialmente explosivas, estas deverão ser construídas de forma a poderem ser homologadas segundo a norma ATEX e encapsuladas em caixas que respeitem a norma IP65 (a caixa não permitirá a entrada de pó ou qualquer outro objecto sólido e resistirá à entrada de água corrente vinda de qualquer direcção).

## ***Capítulo III***

# **A Unidade de Aquisição de Dados**

### **III.1 O Parque de Reservatórios: A Instrumentação de um Tanque**

Apesar do sistema de aquisição de dados aqui projectado poder monitorizar outros processos que não os ocorridos num parque de reservatórios de uma refinaria petroquímica, ele foi idealizado e desenvolvido tendo em vista a sua aplicação nestas unidades logísticas. Estas, pela sua especificidade e pelos assinaláveis condicionantes impostos pelas suas características físicas, constituem desafios ímpares, elevando assim o número de requisitos que este sistema terá que satisfazer.

Tal como foi já referido no capítulo I.2, qualquer parque de reservatórios de produtos petroquímicos caracteriza-se por apresentar uma reduzida densidade populacional, dispendo, ao longo de uma vasta área, um substancial número de tanques, de diferentes capacidades e que armazenam diferentes produtos. Como exemplo, refira-se o Parque de Armazenagem da Boa Nova que, numa área de 14 hectares, dispõe de 54 reservatórios com capacidades de 50 a 4000 m<sup>3</sup> ou a Refinaria de Sines que, implantada numa área de 320 hectares, armazena 8 diferentes produtos em 153 tanques<sup>5</sup>. Assim, entre os tanques de maiores dimensões, os quais podem ter diâmetros de cerca de 100 metros<sup>6</sup>, é frequente registarem-se distâncias de 150 ou mais metros. Estas distâncias entre os tanques constituem, efectivamente, o maior dos desafios que os parques de reservatórios de produtos petroquímicos podem colocar a um sistema de aquisição de dados baseado em tecnologia *wireless*.

---

<sup>5</sup> A Galp Energia. Último acesso a 31 de Agosto de 2009, a partir de [www.galpenenergia.com](http://www.galpenenergia.com).

<sup>6</sup> Nord-West-Oelleitung GmbH – Technical Facilities. Último acesso a 31 de Agosto de 2009, a partir de [www.nwolv.de/NWOHOMEPAGE/en/](http://www.nwolv.de/NWOHOMEPAGE/en/).

Algo que também aumenta a especificidade destes parques, é o facto de estes serem formados por vários tanques de diferentes características, de forma a assim poderem responder aos diferentes estados e às diferentes propriedades dos diversos produtos. Estes podem ser armazenados em reservatórios abertos ou fechados, sem ou com aquecimento (de forma a manter fluidos os produtos mais viscosos), com tecto fixo ou flutuante (o qual limita a quantidade de vapores presente acima da coluna de líquido armazenada) ou em reservatórios pressurizados e refrigerados (destinados às gasolinas e produtos gaseificados). Porém, e apesar das diferentes características, os diferentes tanques partilham entre si um conjunto de sensores e de actuadores semelhante:

**Sensores:**

- Radar ou servo sensor – para medição do nível da coluna de líquido no reservatório;
- Termómetro – para medição da temperatura no interior do reservatório;
- Barómetro – para medição da pressão no interior do reservatório (de produtos voláteis ou gaseificados);
- Detector de gás, no exterior do reservatório;
- Medição do caudal de entrada e de saída do reservatório.

**Actuadores:**

- Válvulas de entrada e de saída do reservatório (on/off)<sup>7</sup>;
- Bombas de entrada e de saída do reservatório (proporcionais)<sup>8</sup>.

Em certos tanques, poderão ainda ser usados outros sensores, tais como um sensor de pressão hidrostática (para medir directamente a massa da coluna de líquido) ou um sensor de densidade de líquido. Transversal a todos os sensores e actuadores, é o facto de estes fazerem uso de uma interface analógica, usando um sinal em corrente sob o padrão 4-20 mA (o padrão “universal” da instrumentação industrial), sendo que em alguns estará igualmente disponível uma interface digital. Uma vez que as válvulas e as bombas dos reservatórios necessitam de

---

<sup>7</sup> As válvulas on/off apenas abrem ou fecham totalmente, não sendo possível adquirirem posições intermédias estacionárias. A mudança de estado é despoletada assim que o sinal analógico atinja determinados valores de referência.

<sup>8</sup> O caudal bombeado por estas bombas é proporcional ao valor do sinal analógico. Assim, quando este é de 4 mA a bomba estará inactiva, funcionando à sua capacidade máxima quando o sinal atingir os 20 mA.

alimentação eléctrica para o seu funcionamento, assim como alguns dos sensores, em cada reservatório é disponibilizado uma fonte de tensão.

Enquanto nos parques de reservatórios das refinarias petroquímicas, devido ao maior e constante movimento dos vários produtos e sub-produtos, estes sensores e actuadores encontram-se quase sempre integrados num sistema de aquisição de dados (usualmente um PAC), nos parques de armazenagem (mais pequenos e com menor movimento de produtos) os mesmos sensores são lidos localmente, por inspecção visual ou por transferência de dados para um dispositivo portátil. Casos ainda há em que os reservatórios de alguns parques apenas incluem os sensores integrados no sistema de segurança e de alerta, sendo desprovidos dos restantes sensores que permitem a gestão logística do parque. Nestes parques, o controlo de inventário é feito com o recurso a instrumentos de medida portáteis.

Embora com um tempo de vida que, dependendo da manutenção recebida, se pode estender por várias décadas, o custo de um tanque (sem contar com a restante infra-estrutura) poderá ir das centenas de milhares de dólares até alguns milhões de dólares, variando este valor, essencialmente, em função do tipo de produto a que se destina e da sua capacidade. Com um menor tempo de vida, os sensores e restante equipamento electrónico são substituídos a cada 10 a 20 anos.

Apesar do assinalável investimento que cada reservatório, por si só, significa, bastante mais valioso será, porventura, o seu conteúdo<sup>9</sup>. Perante os valores envolvidos, a fiabilidade e segurança que um sistema de aquisição de dados poderá oferecer é da extrema importância para os responsáveis destes parques de reservatórios. Sendo a tecnologia *wireless* algo relativamente recente no mundo industrial, esta tem sido vista e recebida com bastante desconfiança, sobretudo no que diz respeito à monitorização e controlo de variáveis críticas. Assim, e salvo raras e honrosas excepções, a monitorização e controlo dessas variáveis continua a ser feito através de sistemas cablados, sendo que aos sistemas *wireless* apenas tem vindo a ser permitido a monitorização de variáveis não críticas que auxiliem a gestão logística do parque.

---

<sup>9</sup> Um reservatório de crude de capacidade média, cerca de 80 000m<sup>3</sup>, sendo que os maiores reservatórios atingem capacidades superiores a 100 000m<sup>3</sup>, representa uma capacidade de cerca de 503 000 barris (cada barril de crude são 42 US gal ou 158,987 litros). A uma cotação de 75\$ por barril, um reservatório com aquela capacidade significa mais de 37 milhões de dólares em crude potencialmente armazenado.

## III.2 A Unidade de Aquisição de Dados

Tal como acabara de ser mencionado no ponto anterior, os reservatórios constituintes de um parque de produtos petroquímicos são em número apreciável e encontram-se dispersos ao longo de uma vasta área. São estes, aliás, os dois principais factores que elevam a custos proibitivos a implementação de um sistema centralizado cablado, no qual todas as variáveis de campo são conduzidas a uma única unidade. Num sistema deste tipo, sai ainda prejudicada a precisão com que são convertidos os dados enviados pelos sensores, uma vez que os sinais, analógicos, provenientes destes terão que percorrer distâncias consideráveis, estando assim mais susceptíveis a serem corrompidos por qualquer ruído electromagnético que se possa fazer notar. Colocando em cada reservatório uma unidade de aquisição de dados, já todas as variáveis serão digitalizadas localmente, algo que praticamente anulará os efeitos deste ruído. Para além desse facto, os dados então recolhidos podem agora ser enviados para a unidade concentradora através de um único cabo, através de uma rede de comunicações. No entanto, e mais uma vez, as consideráveis distâncias a superar tornam esta solução pouco atractiva a nível de custos de implementação, facto para o qual ainda contribui a necessidade de toda a cablagem e equipamento e infra-estruturas de suporte terem que obedecer à norma ATEX.

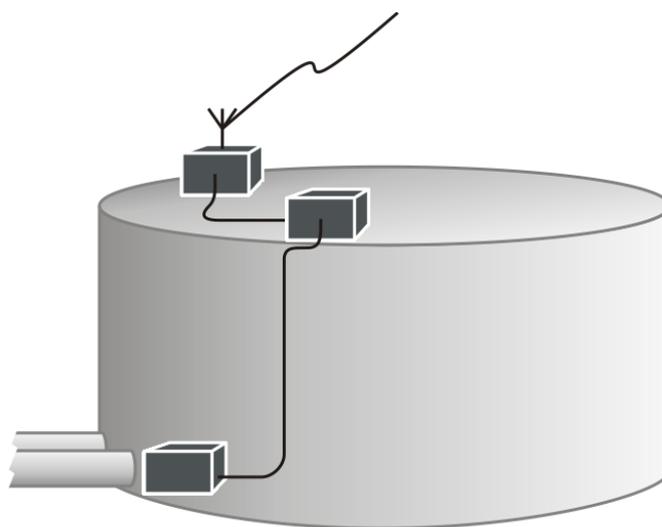
Tendo em mente os vários aspectos atrás mencionados, as comunicações sem fios surgem assim como uma alternativa bastante atractiva comparativamente às comunicações cabladas. Porém, e devido ao facto de se basearem em radiofrequência, a fiabilidade das comunicações sem fios poderá ser fortemente afectada por um ambiente com elevado ruído electromagnético e pela existência de estruturas metálicas entre os emissores e os receptores. Apesar de este tipo de estruturas ser abundante num parque de reservatórios, instalando as unidades de aquisição de dados no topo dos reservatórios, conseguir-se-á entre elas uma linha de visão relativamente desimpedida. Também devido ao facto de os parques de reservatórios serem construídos no exterior e de na sua área de implantação não existirem grandes equipamentos electromecânicos geradores de ruído electromagnético, os níveis deste deverão ser bastante reduzidos. Para além de atractivas, pelos reduzidos custos que implicam, as comunicações sem fios apresentam-se assim como sendo uma solução perfeitamente viável face à alternativa cablada, sendo, portanto, as que serão usadas neste sistema.

### III.2.1 A Unidade de Aquisição de Dados: Especificação Funcional

Apostando claramente na divisão da sua capacidade de processamento, o sistema de aquisição de dados será constituído por diversas unidades de aquisição de dados, tantas quantos os reservatórios a monitorizar. Por sua vez, também estas unidades serão formadas por vários módulos, a saber, interfaces analógicas, interfaces digitais e uma *gateway*. Optando por tal

modularidade, e não por uma única unidade monolítica, basta assim trocar ou adicionar novos módulos para que, em cada reservatório, a unidade de aquisição de dados responda ao número e tipo de sensores nele presentes.

A ambas as interfaces cabe a tarefa de receber os sinais dos sensores, analógicos ou digitais, e processar os dados recolhidos. Esta informação será depois enviada para o módulo *gateway*, o qual assim que possível, a colocará na rede de comunicações (sem fios) do sistema de aquisição de dados. A comunicação entre os vários módulos que formam a unidade de aquisição de dados, e uma vez que estes estarão em posições adjacentes ou distanciados por escassos metros, será feita através de uma ligação ponto-a-ponto cablada, usando o protocolo CAN<sup>10</sup>. Este último, com um crescente mercado na instrumentação industrial, é definido segundo um protocolo ao nível das camadas ISO/OSI que privilegia a redundância e o controlo de erros, oferecendo assim às comunicações uma maior fiabilidade em ambientes adversos em que, por exemplo, sejam elevados os níveis de ruído electromagnético. Também a impulsionar o uso deste protocolo, há o facto de os vários módulos da unidade poderem ser alimentados através desta ligação CAN, sendo assim desnecessário estender ao longo do reservatório um novo cabo de alimentação.



**Figura III-1** Representação de uma unidade de aquisição de dados aplicada num reservatório.

---

<sup>10</sup> Um pouco à semelhança do que acontece com o IEEE 802.15.4 nas comunicações *wireless*, o CAN (*Controller Area Network*), padronizado segundo a norma ISO 11898, define as duas camadas inferiores do protocolo de comunicações, a camada física e camada *data link*.

### III.2.2 A Unidade de Aquisição de Dados: O Módulo *Gateway*

O protocolo de comunicações da rede deste sistema, e face ao exposto no capítulo II.2.3, será definido sobre o protocolo IEEE 802.15.4, aquele que melhor se adequa ao que é requerido a este sistema. Efectivamente, o baixo consumo característico dos *transceivers* IEEE 802.15.4, na grandeza dos miliWatt, e a conseqüente reduzida dissipação de calor, constituem o maior proveito que sucede da sua escolha. Da sua parca largura de banda (cerca de 250Kb/s), e tendo em conta o volume de tráfego previsto<sup>11</sup>, não resulta também qualquer inconveniente para a gestão da informação na rede. Para além do mais, *transceivers* com protocolos como o IEEE 802.11 ou mesmo o IEEE 802.15.1 (usado no *Bluetooth*), seriam bastante penalizadores ao nível do consumo energético da unidade mas, sobretudo, iriam dissipar muito mais calor, podendo mesmo ter que vir a ser necessário equipar as unidades com dissipadores passivos. No entanto, do acréscimo de largura de banda conseguido ao usar estes protocolos em detrimento do IEEE 802.14.4, não resultaria qualquer vantagem de monta para o sistema.

Com o protocolo escolhido, o IEEE 802.15.4, existem *transceivers* a operar apenas na banda dos 2,4GHz. Nas restantes bandas ISM de sub-1GHz, os *transceivers* são usualmente disponibilizados sem protocolo de comunicações definido, ficando tal tarefa a cargo do seu programador. No entanto, e apesar de tal inconveniente, ao usar uma frequência mais baixa, como por exemplo os 433MHz, conseguir-se-ia um alcance superior relativamente ao obtido com 2,4GHz, nomeadamente se existisse um número considerável de obstáculos entre o emissor e o receptor. Porém, e como foi já referido, ao instalarem-se as várias unidades de aquisição de dados no topo dos reservatórios, consegue-se uma linha de visão praticamente desimpedida. Para além de tal facto, a maior atenuação que um sinal emitido a 2,4GHz sofre enquanto atravessa elementos (chuva, nevoeiro, ...) não chega a ter impacto suficiente no alcance rádio da unidade que transtorne o normal funcionamento da rede. Efectivamente, a maior direccionalidade e o menor alcance característicos de uma frequência mais elevada podem, inclusive, constituir uma vantagem<sup>12</sup>. Face às transmissões a 2,4GHz, as transmissões sub-1GHz apresentam ainda uma largura de banda mais baixa, algo que resulta em comunicações necessariamente mais lentas.

---

<sup>11</sup> Dado o enorme volume característico dos reservatórios, quando as há, as alterações físicas ocorridas no seu interior são manifestamente lentas. Mesmo destinando-se à avaliação das condições de segurança do reservatório, o período de tempo decorrido entre duas aquisições de dados não necessitará, portanto, de ser inferior a algumas dezenas de segundos.

<sup>12</sup> Aumentando o alcance, o sinal transmitido por uma unidade propaga-se ao longo de uma maior área, podendo assim ser recebido por mais unidades. No entanto, se no anel circular um número considerável de *tokens*, uma unidade que detenha um deles não transmitirá se, no seu raio de alcance rádio, existir já uma mensagem transmitida, atrasando a comunicação até que o espaço esteja livre.

Considerando os vários aspectos debatidos neste ponto, definiu-se que os módulos *gateway* das unidades de aquisição de dados operarão a 2,4GHz segundo o protocolo IEEE 802.15.4.

Com o protocolo IEEE 802.15.4, mesmo num meio onde, tal como acontece num parque de reservatório, entre as unidades rádio existem poucos obstáculos que condicionem as comunicações, o alcance destas não será, em condições normais, superior a 150 – 200 metros. Podendo este alcance não ser suficiente para, em algumas zonas do parque, responder às necessidades do protocolo de comunicações, o *transceiver* escolhido para equipar o módulo *gateway* deverá poder transmitir a uma potência superior aos 0 dBm que tipicamente estes componentes permitem. A escolha deverá, pois, recair sobre um *transceiver* como o CC2520 da Texas Instruments, o qual transmite a uma potência máxima de 5 dBm, podendo ainda esta, caso necessário, ser amplificada até 22 dBm com a adição do *front end* CC2591, também da Texas Instruments.

A norma ATEX permite que uma unidade rádio irradie, no máximo, uma potência de 2W sem com isso ser necessário a toma de medidas que não permitam a acumulação de carga electrostática em torno da antena. Uma vez que uma comunicação baseada no protocolo IEEE 802.15.4 nunca atinge potências superiores a algumas dezenas de miliWatts (tipicamente, entre 20 a 30 mW), e de forma a melhorar o alcance rádio dos módulos, estes deverão usar uma antena em chicote (*whip antenna*), colocada no seu exterior. As outras alternativas, as antenas PCB e as *chip antennas*, sendo desenhadas ou instaladas na placa de circuito, para além de verem sempre a sua eficiência afectada pela caixa do módulo, nunca apresentam um desempenho ao nível das antenas em chicote.

Tal como fora referido, em cada reservatório é disponibilizada uma fonte de tensão, a qual poderá e será usada na alimentação da unidade de aquisição de dados que lhe estará afecta. Por se tratar de uma fonte virtualmente ininterrupta, e ao contrário do que aconteceria se fossem alimentados a baterias, o que levaria à necessária implementação de rotinas que visassem um menor consumo energético, os módulos *gateway* que formam a rede de comunicações do sistema de aquisição de dados poderão comunicar entre si de uma forma contínua. Dessa forma, será então possível à rede de comunicações manter um elevado fluxo de informação.

De forma a acautelar as consequências que poderão advir de eventuais e pontuais falhas que possam ocorrer na fonte de alimentação, cada módulo poderá, no entanto, integrar uma pequena pilha. Esta, não permitindo que os vários módulos continuem a comunicar normalmente, permite garantir o armazenamento dos dados então adquiridos.

## ***Capítulo IV***

# **A Rede de Comunicações do Sistema de Aquisição de Dados**

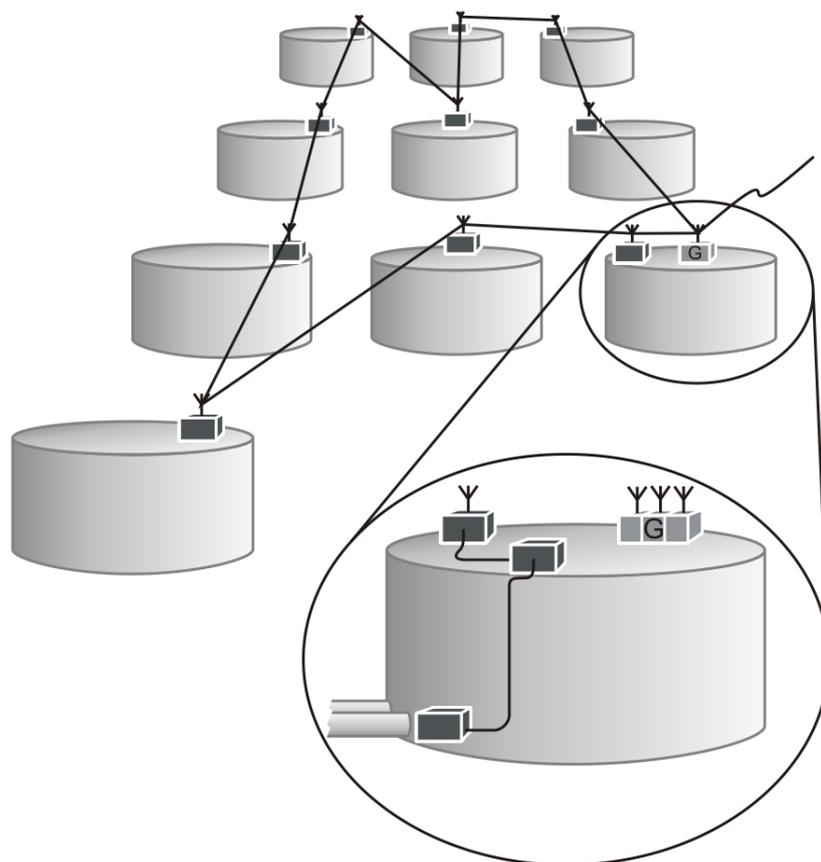
### **IV.1 A Rede de Comunicações: Visão Geral**

Como fora já referido no capítulo II.4, a rede de comunicações do sistema de aquisição de dados aqui projectado será uma rede em anel baseada em comunicações sem fios, segundo o protocolo IEEE 802.15.4, e operando a uma frequência de 2,4 GHz. A formar esta rede em anel estarão as *gateways* que constituem a unidade de aquisição de dados e que equiparão cada um dos reservatórios do parque. Também integrada neste anel, haverá uma segunda unidade *gateway*, cabendo a esta a função de estabelecer a ponte entre a rede local e a rede que equipará o centro de controlo. Na verdade, e por todo o fluxo de informação entre as duas redes estar dependente desta *gateway*, esta unidade será idealmente de redundância modular tripla, ou seja, serão três, e não apenas uma, as *gateways*. A rede proposta encontra-se representada na página seguinte, na Figura IV-1.

De forma a garantir a segurança e fiabilidade que se exige a qualquer sistema de monitorização e de aquisição de dados, a rede de comunicações deste sistema terá que ser capaz de responder positivamente a uma hipotética falha de um dos seus nós. Uma vez que numa rede em anel, e ao contrário do que acontece, por exemplo, numa rede em malha, as comunicações apenas podem seguir um *routing* pré-estabelecido, será necessário implementar nesta rede um equivalente ao *bypass* que se encontraria numa rede em anel cablada. Assim, e na sequência de uma falha de um dos nós da rede, esta terá a capacidade para detectar a sua ausência e excluí-lo do anel. Sendo aquela falha apenas momentânea, sem que tenha havido necessidade de

intervenção por parte de um operador, a unidade entretanto excluída assinalará a sua presença e será novamente integrada na rede, voltando esta ao seu estado original.

Os restantes pontos deste capítulo debruçar-se-ão, de forma mais aprofundada, sobre a arquitectura da rede de comunicações e o seu protocolo.



**Figura IV-1** Representação do sistema de aquisição de dados e da sua rede de comunicações.

## IV.2 A Arquitectura da Rede de Comunicações

Tal como fora já referido, o sistema de aquisição de dados é constituído por uma rede de comunicações cujos nós são as unidades de aquisição de dados instaladas em cada um dos reservatórios do parque. Exigindo-se desta rede um correcto e fiável encaminhamento dos dados então recolhidos, a escolha adequada da sua arquitectura surge assim como algo de extrema importância.

### IV.2.1 A Arquitectura da Rede de Comunicações: Estudos Prévios

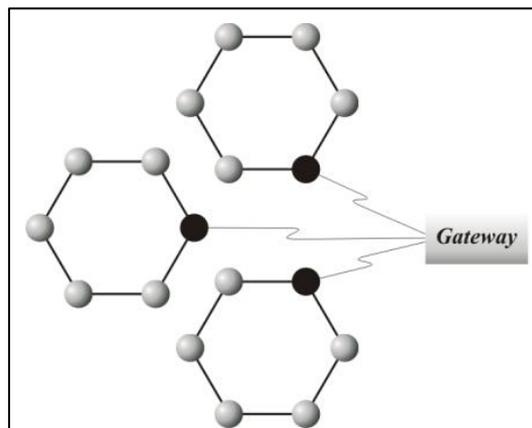
Neste projecto, desde logo as redes centralizadas, como as redes em árvore ou em estrela, foram preteridas em favor das redes descentralizadas uma vez que, e tal como é referenciado no capítulo II.2.1, a integridade daquelas arquitecturas está fortemente dependente da fiabilidade das unidades centrais. Já nas redes descentralizadas, também a arquitectura emalhada fora excluída como hipótese a seguir. Para além da maior complexidade do protocolo de comunicações, as consideráveis distâncias a que os reservatórios se encontram uns dos outros fazem com que sejam poucos os nós que se encontram dentro da área de alcance do seu sinal, o que, por conseguinte, tem um impacto negativo no número de possíveis ligações que se possam realizar caso um nó venha a falhar. Aquele que seria o ponto forte desta arquitectura surge assim fragilizado. Para contornar esta situação, seria necessário adicionar mais unidades, apenas com a função de repetidores, de forma a aumentar a densidade da rede e, assim, elevar o número de possíveis ligações que um nó poderia realizar. Como se torna óbvio, tal solução será mais onerosa do que uma solução que apenas faça uso das unidades instaladas nos reservatórios. Ainda a depreciar a escolha de uma rede emalhada está o facto de que, caso um nó da rede fique inoperacional, a sua falha não seja detectada de forma imediata. A escolha para a arquitectura de rede deste sistema de aquisição de dados haveria, pois, de recair sobre a arquitectura em anel ou sobre uma arquitectura híbrida que incluísse o anel.

Também já mencionado no capítulo II.2.1, uma rede em anel é uma rede descentralizada e cujos nós são hierarquicamente idênticos, limitando-se, cada um deles, a reencaminhar a informação do nó anterior para o nó seguinte até que esta chegue ao seu destinatário. Com qualquer comunicação a envolver todos os nós da rede, é pois possível detectar rapidamente uma eventual falha num desses nós, sendo talvez esta a maior vantagem desta arquitectura face às demais. No entanto, essa mesma falha significaria a impossibilidade de comunicarem entre si quaisquer dois nós intermediados pelo nó então inoperacional. Se numa rede cablada esta situação seria contornada através de um *bypass*, na rede sem-fios deste sistema o nó a montante do nó inoperacional terá que transmitir para o próximo nó funcional. Será, portanto, necessário garantir que o alcance rádio de qualquer nó da rede permita a comunicação com, pelo menos, os dois nós seguintes.

Indicam-se de seguida, e de forma sucinta, as arquitecturas que, ao longo do desenvolvimento deste sistema de aquisição de dados, foram consideradas para a sua rede de comunicações. Comum a todas essas hipóteses então criadas, há o facto de todas elas fazerem uso de, pelo menos, um anel. Também em qualquer uma dessas arquitecturas existirá uma unidade *gateway*, servindo esta de ponte entre a rede de comunicações do sistema de aquisição de dados e uma qualquer outra rede de comunicações que possibilite a chegada da informação ao operador humano.

### IV.2.1.1 Estrela de anéis

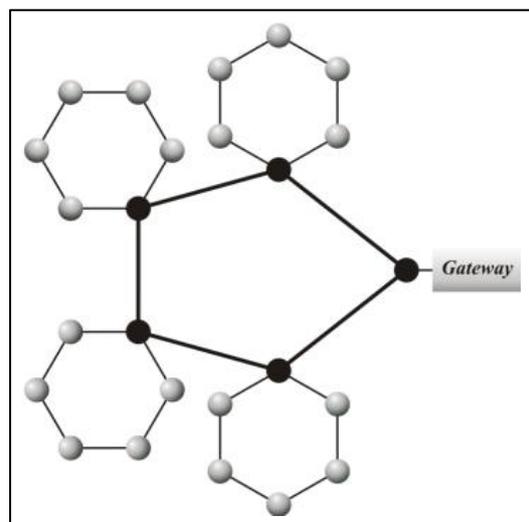
Esta é uma arquitectura híbrida, composta por vários anéis, correspondendo cada um deles a um grupo de reservatórios do parque, que comunicam directamente com uma unidade central, a *gateway*. Em cada um desses anéis existe uma unidade, também *gateway* (representada a preto na figura ao lado), que estabelece a comunicação entre aquela rede local e a *gateway* dita principal. Com esta



arquitectura, e de forma a evitar colisões entre as mensagens a circular em anéis adjacentes, cada um destes anéis teria que funcionar em canais de comunicações diferentes, ou seja, a diferentes frequências. Enquanto estas estariam na banda dos 2,4GHz, as comunicações entre as *gateways* dos anéis e a *gateway* principal seriam feitas, preferencialmente, a 433MHz. Ao diminuir a frequência do sinal, diminui-se igualmente a sua direcionalidade e a atenuação que sofre, por exemplo, num ambiente com elevada humidade, chuva ou nevoeiro. No entanto, e apesar de aquela frequência permitir atingir um alcance superior ao atingido usando 2,4GHz, tal poderia ser ainda insuficiente para cobrir as distâncias entre a *gateway* principal e os grupos de reservatórios mais afastados, o que obrigaria à implementação de unidade repetidoras.

### IV.2.1.2 Anel de anéis

De forma a suprimir as limitações das comunicações entre as *gateways* das redes dos grupos de reservatórios e a *gateway* principal evidenciadas na arquitectura anterior, estas deixariam de ser feitas ponto-a-ponto e passariam a ser realizadas através de uma rede em anel (realçada na figura). Esta, pelas mesmas razões anteriormente invocadas, operaria a 433MHz. Porém, o menor *bitrate* característico das frequências mais baixas não deixará grande margem para aumentar a taxa de aquisição de dados caso tal venha a ser necessário.



A influenciar negativamente a escolha desta arquitectura, bem como da anterior, existe o facto de que cada um dos anéis comunica com a *gateway* principal através de uma outra

*gateway*. Para além de tal significar um acréscimo do número de unidades a adquirir e a instalar, a sua presença vem, de certa forma, anular as vantagens que se procuravam obter com a escolha de uma rede descentralizada. Ficando uma daquelas unidades inoperacional, todos os nós constituintes do respectivo anel ficariam isolados e sem possibilidade de comunicar com a *gateway* principal, tal como aconteceria se de uma rede centralizada se tratasse.

#### **IV.2.1.3 Anel com mudança de canal da banda de frequência**

A nível lógico, esta solução é uma simples rede em anel, correspondendo a cada nó um reservatório do parque. As mensagens entre os vários nós seriam transmitidas como se de uma simples ligação ponto-a-ponto se tratasse: assim que fossem recolhidos, era composto um pacote de dados e transmitido para o nó seguinte, ficando o nó emissor a aguardar a chegada de um *acknowledgment* a confirmar a correcta recepção. No entanto, face ao elevado número de nós que então formariam o anel, estima-se que é relativamente elevada a probabilidade de dois nós, cujos raios de alcance se interceptem, comunicarem simultaneamente. Existindo então um elevado risco de duas mensagens colidirem, com o conseqüente bloqueio das comunicações, nesta solução proceder-se-ia a uma mudança do canal da banda de frequência (*channel hopping*) dos nós sempre que estes transmitissem, permitindo assim que dois nós que se encontrem dentro do raio de alcance um do outro comunicassem simultaneamente.

Mudando constantemente de frequência, esta rede teria outra inegável vantagem: seria praticamente imune a possíveis interferências com outras redes sem fios e ao *jamming*. No entanto, a probabilidade de ocorrência destas situações em campo aberto, como o é um parque de reservatórios, é diminuta, sendo, portanto, reduzido o peso que essa vantagem teria numa possível escolha desta rede. O protocolo de comunicações, por sua vez, seria já mais complexo que o de outras soluções.

#### **IV.2.1.4 Anel com passagem de *token* (*token passing*)**

À semelhança da solução anterior, esta rede é composta por um único anel no qual cada nó corresponde a um reservatório do parque. Estes, no entanto, não terão já a possibilidade de transmitirem em qualquer altura, sendo esse direito permitido apenas ao nó detentor do *token*. Assim, existindo um ou mais *tokens* a circular ao longo do anel, garante-se que todas os nós têm oportunidade de comunicarem, algo que não era possível afiançar na anterior solução sem a implementação da mudança do canal da banda de frequência. Porém, quando comparada a esta, a rede em anel com *token passing* apresenta um protocolo de comunicação bastante mais simples e, por isso mesmo, menos atreito a erros de programação.

Também a contínua circulação de um *token* ao longo do anel permite detectar, de uma forma quase imediata, a inoperacionalidade de um nó da rede, sendo tal falha detectada pela unidade que se lhe sucede e que não receberá o *token* dentro do período de tempo previsto. Assim, poder-se-á fazer uso deste tipo de *acknowledgments* implícitos nas comunicações entre dois nós, algo que, e comparativamente à solução anterior, permitirá reduzir para, sensivelmente, cerca de dois terços o volume de tráfego na rede<sup>13</sup> e para cerca de metade o tempo de uma comunicação. Se mesmo assim, e apesar da redução deste tempo, não for possível a um *token* circular as vezes necessárias ao longo do anel para que todos os nós tenham a possibilidade de transmitir no espaço de tempo decorrido entre duas recolhas de dados, a rede poderá ficar congestionada e os dados entretanto recolhidos não chegarão de forma fluida ao seu destino. Prevendo-se que tal situação venha a ocorrer se esta rede integrar um substancial número de nós e/ou se a taxa de aquisição de dados for relativamente elevada, está prevista a possibilidade de nela circular simultaneamente mais que um *token*.

#### IV.2.2 A Arquitectura da Rede de Comunicações: Conclusão

Das quatro arquitecturas apresentadas no ponto anterior, a escolha recaiu sobre o anel com *token passing*. Ao contrário das duas primeiras arquitecturas, esta não faz uso de unidades *gateway* a não ser para estabelecer uma ligação entre a rede de comunicações do sistema e uma segunda rede. Não se corre assim o risco de um, maior ou menor, conjunto de unidades poder deixar de comunicar para o restante sistema devido a uma eventual falha numa daquelas *gateways*.

Também o anel com *channel hopping* fora preterido perante o anel com *token passing*. O primeiro, por, em última instância, ser um conjunto de ligações ponto-a-ponto sucessivas e ordenadas, gerará um maior volume de tráfego entre as últimas unidades que antecedem a *gateway*. Por sua vez, ao manter a circular no anel um *token*, e apenas permitindo aos vários nós da rede transmitir quando estes o têm em sua posse, o volume de tráfego será uniformizado ao longo de toda a rede. Facto que também contribuiu para a escolha do anel com *token passing* em detrimento do anel com *channel hopping*, é o protocolo de comunicações do primeiro ser mais simples e de mais fácil implementação que o do segundo e, portanto, menos atreito a erros de programação que possam comprometer o normal funcionamento da rede. Um último factor, e talvez não de menor importância, que penaliza o *channel hopping* é a necessidade que a maioria dos *transceivers* têm em serem reiniciados para efectivarem a mudança do canal de frequência.

---

<sup>13</sup> Regra geral, o tamanho de um *acknowledgment* é bastante mais reduzido que o de uma normal mensagem de dados.

Tal processo estende-se ao longo de vários milissegundos que, doutra forma, poderiam ser ocupados com a recepção ou o envio de mensagens.

Apesar de o protocolo de comunicações permitir que integrem a rede um máximo de 255 nós, é fortemente recomendável que este número não ultrapasse as escassas dezenas. Dessa forma, o fluxo de informação sairá beneficiado (o *token* demora menos tempo a percorrer todo o anel) e a falibilidade da rede será menor, já que o risco que existe em uma mensagem de reconfiguração não chegar ao seu destino será ainda menor. Assim, e num grande parque de reservatórios, como por exemplo o da refinaria da Petrogal de Sines, com cerca de 150 tanques, recomenda-se que a rede do sistema de aquisição de dados se divida entre 3 a 4 anéis a operar em diferentes canais de frequência.

### IV.2.3 O Nó de Integração da Informação

Ao nó de integração da informação, ou, como até agora tem sido apelidado, à *gateway* principal, cabe a tarefa de estabelecer a ligação entre a rede de comunicações do sistema de aquisição de dados e a rede que equipará o centro de controlo.

A *gateway* será verdadeiramente composta por duas unidades, uma primeira, que fará parte da rede em anel do sistema de aquisição de dados, e uma segunda unidade que comunicará segundo o protocolo que mais convier ao cliente. A comunicação entre as duas unidades será feita, tal como acontece com as unidades de aquisição de dados, através de uma ligação ponto-a-ponto cablada, segundo o protocolo *CANopen*.

Subjacente à decisão de não encapsular num único bloco monolítico as duas unidades anteriormente referidas, há uma tentativa de assim aumentar a flexibilidade deste sistema no que diz respeito à sua integração com a restante rede da unidade fabril. Com a primeira unidade a fazer parte integrante da rede do sistema de aquisição de dados e a disponibilizar uma conexão como o *CANopen*, cada vez mais comum no meio industrial, a ela facilmente poderão ser ligadas unidades que comuniquem, por exemplo, através de uma rede Ethernet, IEEE 802.11 ou, inclusive, GPRS. O uso deste último meio de comunicação, o GPRS, tem sobre os restantes a vantagem de disponibilizar a informação directamente sobre a internet e, portanto, a nível global<sup>14</sup>.

Tal como fora mencionado no início deste capítulo, a *gateway* será, idealmente, de redundância modular tripla, ou seja, serão três as unidades integradas na rede em anel e que

---

<sup>14</sup> Esta é uma solução que, desde um passado recente, tem vindo a merecer uma atenção crescente, existindo já um consenso que, progressivamente, as comunicações de cada uma das unidades de aquisição de dados de um dado sistema de monitorização tenderão a ser baseadas em GPRS.

comunicarão com outras três unidades que farão já parte de uma segunda rede. Desta forma, e para além de poder existir algum tipo de vantagem para o cliente em receber a informação através de protocolos de comunicações distintos, estar-se-ia a adicionar uma importante componente de redundância ao sistema de aquisição de dados. Existindo apenas uma *gateway*, a fiabilidade da ligação entre as todas as unidades de aquisição de dados e a rede do centro de controlo estaria totalmente depende da fiabilidade daquela unidade.

## IV.3 O Protocolo de Comunicações

### IV.3.1 O Protocolo de Comunicações: Estrutura

Tal como da arquitectura da rede, do protocolo de comunicações espera-se que este assegure a correcta transmissão dos dados recolhidos pelas unidades de aquisição de dados até junto da *gateway*. Este deverá ainda permitir, de uma forma rápida, identificar e recuperar de falhas que eventualmente venham a afectar os nós da rede.

O protocolo IEEE 802.15.4, já aqui tantas vezes mencionado, apenas define as camadas inferiores do *stack*, a camada física e MAC (*Media Access Control*), sendo as restantes camadas definidas por outro protocolo, como por exemplo o *ZigBee*. Para este sistema, e de forma a constituir uma rede que melhor se adapte aos requisitos impostos, foi idealizado um protocolo *ad-hoc*, ainda que baseado no IEEE 802.15.4. Este protocolo pode ser dividido em duas partes, a primeira que corresponde à formação e inicialização da rede e a segunda que rege o seu normal funcionamento, durante a aquisição de dados.

#### IV.3.1.1 Inicialização

Durante a sua programação, e a consequente realização do seu primeiro teste, a cada uma das *gateways* que compõem as unidades de aquisição de dados ser-lhes-á atribuído o chamado número de fábrica. Este número, único dentro de cada instalação do sistema, permitirá identificar o nó na rede, sendo incluído nas mensagens que nela circulam como remetente ou como destinatário das mesmas.

Durante o seu teste de fábrica, é possível preencher a tabela de conectividade das *gateways*, estabelecendo desde logo a ordem com que as mensagens circulam no anel. Neste caso, apenas será necessário conhecer antecipadamente a posição relativa que cada um dos nós da rede vai tomar. Esta forma de constituir a rede tem, porém, o inconveniente de, uma vez instaladas as unidades, não ser possível alterar aquela ordem. Tal facto torna-se numa evidente desvantagem caso se verifique que, após testar o sistema entretanto instalado, aquela

configuração não permite uma óptima circulação das mensagens e/ou caso seja necessário adicionar novos nós à rede. Respondendo a tal limitação, está prevista a possibilidade de a rede poder vir a ser (re)configurada através de uma cadeia sucessiva de mensagens, as quais serão enviadas pelo operador através da *gateway* principal.

Para constituir o anel, a *gateway* começará por indicar à unidade que se lhe sucede qual será a unidade para a qual esta terá que transmitir, ou seja, a *gateway* (G) indica a G+1 o número de fábrica de G+2 e assim sucessivamente. Na tabela de conectividade de cada unidade (ID), este número será guardado como ID+1. Ao receber a mensagem, a unidade guardará ainda o seu remetente como ID-1. Depois de todos os nós do anel conhecerem os seus antecessores e os seus sucessores, a *gateway* dará início a uma segunda fase na inicialização da rede e fará circular um novo *token* a partir do qual a unidade  $i-1$  indicará a  $i$  o número de fábrica de  $i-2$ . O conhecimento deste número, então guardado como ID-2, torna-se necessário durante o processo de recuperação do anel de uma eventual falha num dos seus nós. Chegado este *token* à unidade que o gerou, a *gateway*, esta faz circular ao longo do anel uma nova mensagem que indique aos vários nós da rede o fim do modo de inicialização, comutando-os para o modo de aquisição de dados. Dois *bits*, identificados na *frame* da mensagem como *Flag*, permitirão conhecer a que fase do modo de inicialização esta pertence.

No início do modo de inicialização, a *gateway* activará um *timer*, devendo a constituição do anel estar concluída antes que aquele expire. Tal não acontecendo, o operador será informado da falha na configuração da rede, dando simultaneamente início a uma nova tentativa. Também durante esta fase, e de forma a diminuir a probabilidade de a constituição do anel falhar devido a uma eventual e momentânea falha nas comunicações, sempre que um nó da rede transmite uma mensagem para o nó seguinte, o primeiro aguardará deste o envio de um *acknowledgment*. Não o recebendo no tempo devido, haverá lugar a uma nova tentativa do envio da mensagem.

Esquematiza-se, na página seguinte, o protocolo de comunicações durante o seu modo de inicialização, findo o qual a tabela de conectividade da unidade  $i$  deverá tomar a seguinte forma:

```
*id_local = ID_RF;  
*id_gateway = 0; //Identifica a unidade como sendo de  
                aquisição de dados (0) ou gateway (1)  
*id_i_minus_1 = ID-1;  
*id_i_minus_2 = ID-2;  
*id_i_plus_1 = ID+1;
```

```
*id_i_plus_2 = 0x00; //este endereço será apenas
//conhecido na eventualidade //de
i+1 ficar inoperacional
```

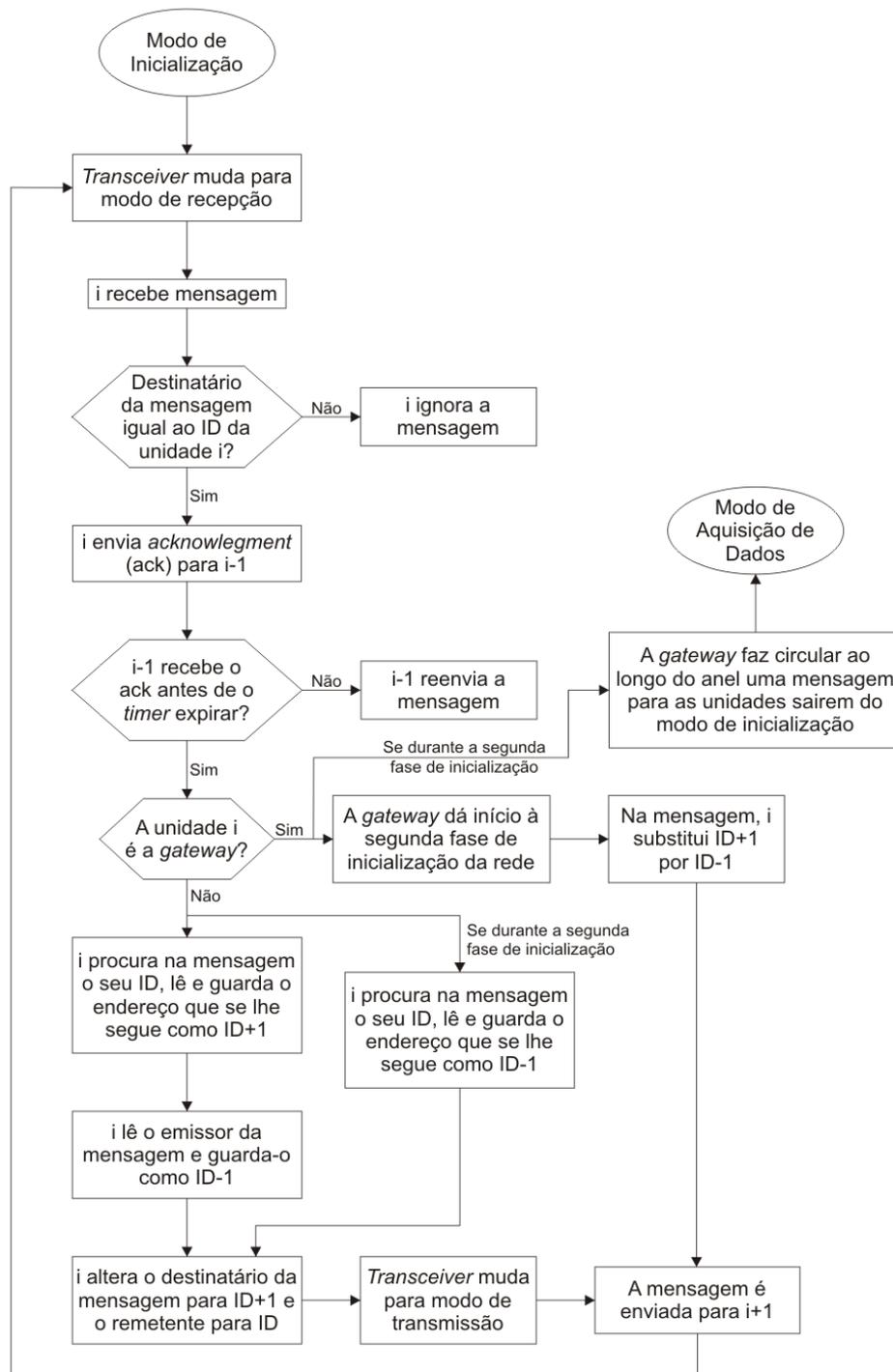


Figura IV-2 Diagrama esquemático do protocolo de comunicações em modo de inicialização.

Destinat_RF	Emissor_RF	Flag	ID_RF	ID+1	...
1B	1B	2b	1B	1B	2B
Cabeçalho da mensagem			Mensagem 1		Mensagem 2

**Figura IV-3** *Frame* de uma mensagem do protocolo de comunicações em modo de inicialização.

### IV.3.1.2 Aquisição de Dados

Finalizada a sua inicialização, a *gateway* emitirá uma mensagem que circulará ao longo de toda a rede informando que as unidades que a compõem deverão passar ao modo de funcionamento seguinte, o de aquisição de dados. Neste modo, um ou mais *tokens* circularão ao longo do anel. Ao receber um, a unidade avalia se este tem espaço disponível e, se assim for, e se tiver informação a enviar, adiciona-a ao *token* e transmite-o para a unidade seguinte. Simultaneamente, é activado um *timer* que expirará se um novo *token* não chegar dentro de um determinado intervalo de tempo, intervalo esse que estará dependente do número de nós que constituem a rede. Se tal acontecer, poder-se-á inferir que a unidade antecessora ( $i-1$ ) terá ficado inoperacional. Nessa situação, a primeira unidade,  $i$ , gerará um novo *token* e nele incluirá, para além de possíveis dados que tenha a transmitir, o aviso que a unidade anterior falhou. É ainda incluído um pedido endereçado a  $i-2$  para que este passe a transmitir para o remetente da mensagem<sup>15</sup>, a unidade ( $i$ ). Desta forma, no próximo *loop*,  $i-2$  comunicará directamente com  $i$  sem transmitir para  $i-1$ , o nó que entretanto ficara inoperacional. Quando esta unidade for reactivada, gerará também ela um novo *token* e nele incluirá a informação de que se encontra já operacional, voltando o anel à sua forma original.

Na página seguinte surge esquematizado o protocolo de comunicações desta fase e a *frame* das mensagens que circularão ao longo do anel.

<sup>15</sup> A unidade  $i-2$  pode agora, na sua tabela de conectividade, guardar o endereço de  $i$  como ID+2.

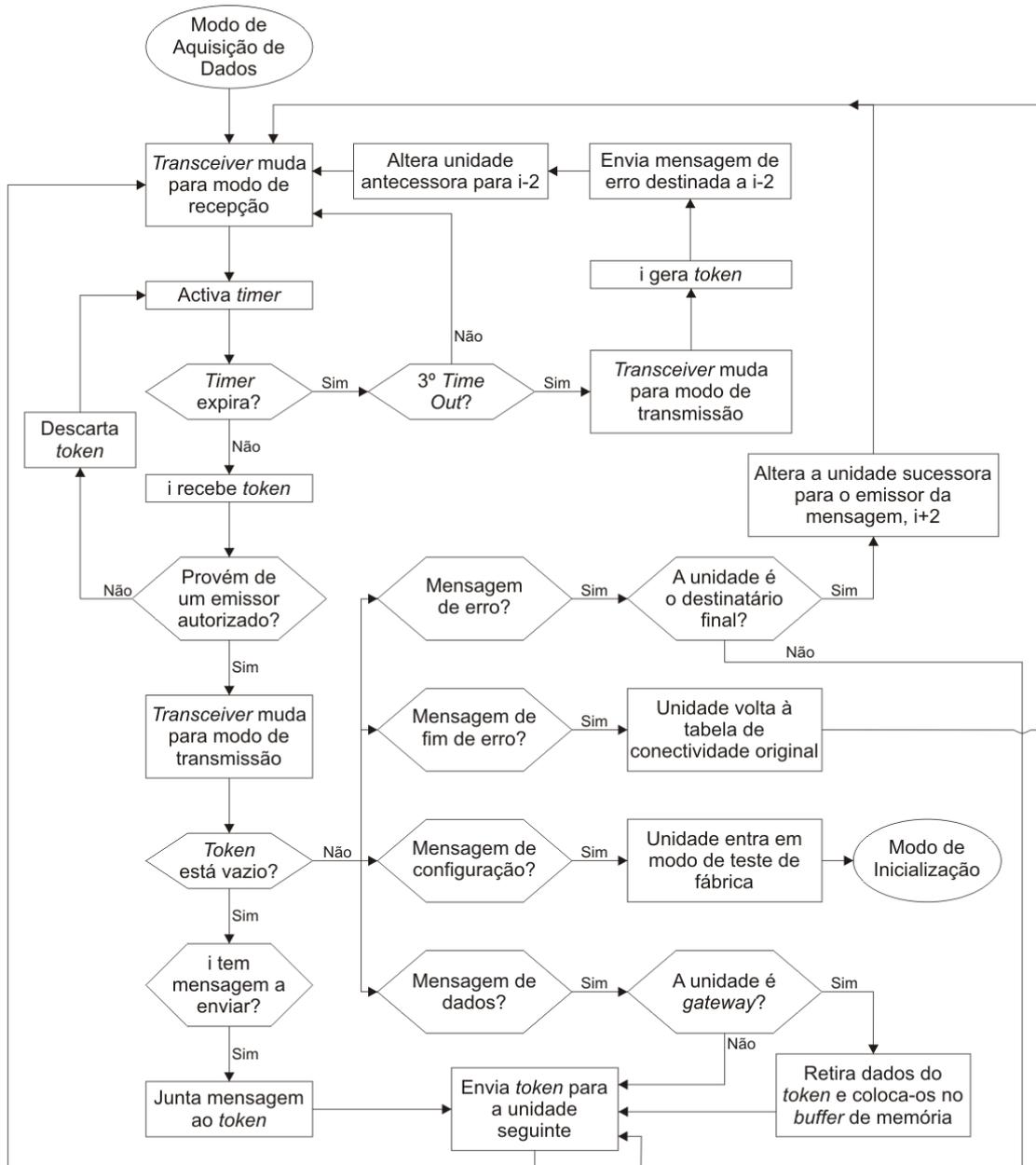


Figura IV-4 Diagrama esquemático do protocolo de comunicações em modo de aquisição de dados.

Emissor_RF	Flag	ID_RF	Função	ID_Sensor	Dados	Nº de Ordem	...
1B	2b	1B	4b	4b	2B	2B	6B
Cabeçalho da mensagem		Mensagem 1				Mensagem 2	

Figura IV-5 Frame de uma mensagem do protocolo de comunicações em modo de aquisição de dados.

O *token* começa com a indicação do seu último emissor (o byte reservado permitirá, teoricamente, integrar na rede um máximo de 255 diferentes nós). Ao receber uma mensagem, a unidade começará por testar se este emissor corresponde ao ID-1 guardado na sua tabela de conectividade, ignorando a mensagem caso tal não se verifique. Ao retransmitir o *token*, a unidade alterará o emissor para o seu endereço, ID.

A seguir ao cabeçalho da mensagem (os dois *bits* identificados como *Flag* serão explicados mais à frente), surgem sucessivos conjuntos de 6 *bytes*. A cada um deles corresponde a leitura de um sensor (“Dados” – 2 *bytes* permitem que sejam digitalizadas variáveis analógicas com uma precisão de 12 *bits*), associando tal valor à sua identificação (“ID\_Sensor” – 4 *bits* permitem atribuir e identificar um máximo de 16 sensores por unidade de aquisição de dados) e à identificação da unidade de aquisição de dados (“ID\_RF”). Os dois *bytes* no final de cada mensagem, rotulados como “Número de Ordem”, constituem uma alternativa ao *time-stamp* que poderia igualmente ser usado para ordenar no tempo os vários dados transmitidos por um mesmo sensor. Optando por essa outra solução, e para além de ser necessário dotar cada unidade de aquisição de dados com um relógio de tempo real, seriam precisos 46 bits para indicar a data e hora de cada medição. Usando apenas 2 *bytes* com o número de ordem, reduz-se o tamanho da mensagem e, conseqüentemente, o tempo da transmissão. Já os quatro *bits* identificados como “Função” servirão para identificar cada uma das mensagens que poderão ser incluídas no *token* como sendo uma mensagem de dados, de informação de (re)configuração da rede ou de informação de fim de erro.

Sendo proveniente de um emissor autorizado, a unidade, através de sucessivos *shifts* (de 6 *bytes*) realizados ao longo da *frame* da mensagem, irá ler os vários “ID\_RF”. Quando o valor lido for zero (0x00), entende-se que a mensagem correspondente se encontra vazia, podendo a unidade ali adicionar qualquer conjunto de dados que tenha para enviar. Chegando ao fim do *token* sem encontrar espaço livre, a unidade considerará que o *token* se encontra totalmente preenchido e, antes de o reenviar, alterará a *Flag* do seu cabeçalho. Assim, às próximas unidades, e ao invés de testar sucessivos “ID\_RF”, bastará ler aquele parâmetro para saber se o *token* se encontra ou não já totalmente preenchido, reduzindo assim o tempo de processamento do *token*. Os 2 *bits* reservados à *Flag*, com o mesmo propósito de redução do tempo de processamento do *token*, serão também alterados para assinalar a inclusão neste de mensagens de reconfiguração do anel ou de mensagens de fim de erro.

Uma vez que o protocolo IEEE 802.15.4 apenas permite a transmissão de trechos com um tamanho máximo de 128 *bytes*, para além do cabeçalho do *token*, poderão ser incluídas 21 mensagens. No entanto, neste protocolo, as comunicações serão limitadas a 26 *bytes*, o que permite, para além do cabeçalho, a inclusão de quatro mensagens. Na base desta decisão está a

procura em minimizar o tempo de processamento e de transmissão do *token*. Mesmo assim, quer por não se prever que num tanque sejam monitorizadas em simultâneo mais de seis variáveis, quer por estas variarem lentamente ao longo do tempo, o espaço reservado em cada *token* para a inclusão das quatro mensagens será mais que suficiente para assegurar um normal fluxo de informação.

## *Capítulo V*

# Conclusão

### **V.1 Análise ao Sistema de Aquisição de Dados**

Referidos no capítulo II.1, consagrados pela tradição e por sucessivos anos de utilização, continuam a ainda hoje ser adquiridos e instalados sistemas de controlo industrial criados e desenvolvidos há já algumas décadas. Virtualmente, qualquer sistema de monitorização e/ou de controlo que equipe uma unidade fabril será um PLC ou um PAC, ambos sistemas que privilegiam a centralização e as comunicações cabladas.

Essencialmente ao longo da última década, numa unidade fabril, a manutenção foi gradualmente deixando de ser apenas reactiva e passou a, cada vez mais, incluir uma componente preditiva. Para o início de tal fenómeno contribuiu de forma decisiva o aparecimento, no seio da instrumentação industrial, das comunicações sem fios. Sem tal significar mais um investimento incomportável, esta tecnologia torna agora viável a monitorização de um maior conjunto de variáveis necessário à manutenção preditiva, muitas das quais recolhidas em máquinas rotativas e que só muito dificilmente poderiam ser recolhidas através de comunicações cabladas.

Tornando-se cada vez mais notórias as vantagens que as comunicações sem fios tinham para oferecer face às alternativas cabladas, os maiores fabricantes de instrumentação industrial começaram a oferecer soluções baseadas em tecnologia *wireless*, como disso é bom exemplo a fabricante Honeywell. Face aos anteriores sistemas, estas novas soluções gerem mais facilmente um elevado número de variáveis, significando simultaneamente um menor custo de aquisição, de implementação e de manutenção. No entanto, algo comum a praticamente todos os sistemas de aquisição de dados baseados em comunicações sem fios, é o facto de estes usarem redes emalhadas sobre o protocolo ZigBee.

Tal como estas soluções, o sistema de aquisição de dados aqui projectado é um sistema descentralizado, com a sua capacidade de processamento repartida ao longo das várias unidades que o compõem, assente sobre comunicações sem fios. Partilha, pois então, das mesmas vantagens que as comunicações sem fios oferecem aos demais sistemas, ou seja, o reduzido investimento que este sistema significa perante a alternativa cablada. Por ser descentralizado e, portanto, modular, este sistema apresenta também uma maior robustez que os sistemas centralizados, pois agora a falha de uma unidade não se repercutirá negativamente sobre o restante sistema. O sistema de aquisição de dados aqui apresentado tem, porém, a particularidade de a sua rede de comunicações ser uma rede em anel, arquitectura que, salvo raras e honrosas excepções, apenas é implementada em comunicações cabladas.

A grande popularidade de que goza a rede emalhada deve-se, sobretudo, à segurança que esta arquitectura pode oferecer. No entanto, com o protocolo de comunicações idealizado ao longo deste projecto, aplicado numa rede em anel, estaremos perante uma solução capaz de oferecer um nível de segurança idêntico ao oferecido por uma rede emalhada. Num parque de reservatórios, onde, por razões já atrás enunciadas (no ponto IV.2.1), a eficácia de uma rede emalhada sai também enfraquecida, estes níveis de segurança que as duas arquitecturas oferecem tendem a tornarem-se ainda mais próximos. De notar ainda a forma fluida com que as mensagens circularão na rede em anel com *token passing* onde, devido ao uso de *acknowledgments* implícitos, será mínima a quantidade de informação trocada entre os nós da rede, assim como o tempo que as transmissões demorarão a ser efectuadas. Desta forma, a rede de comunicações deste sistema de aquisição de dados oferecerá uma capacidade para suportar um volume de tráfego certamente superior ao que é característico do tipo de aplicações para o qual este sistema foi idealizado. O protocolo de comunicações desta rede permite-lhe ainda ser capaz de, uma forma rápida, identificar e recuperar de uma eventual falha que ocorra num dos seus nós. Terá assim sido criado um novo protocolo de comunicações que constitui uma alternativa válida às redes emalhadas, apontadas até agora como sendo a única arquitectura capaz de assegurar, em comunicações *wireless*, os níveis de segurança e de fiabilidade que são requeridos à instrumentação industrial.

A modularidade que as unidades de aquisição de dados exibem, adiciona a estas e, por conseguinte, ao sistema um interessante grau de flexibilidade. Na eventualidade de o número e tipo de sensores variar ao longo dos vários reservatórios, bastará, pois, trocar ou adicionar novos módulos para adequar a interface das unidades de aquisição de dados a cada um dos reservatórios. Também o facto de aqui serem usados módulos genéricos, e não unidades desenhadas exclusivamente para este sistema, fará com que estes encontrem um maior leque de

aplicações e tendam a ser produzidos em maior número, algo que conduzirá a uma redução dos seus custos de produção.

Com um custo de produção estimado a situar-se entre os 100€ a 150€, valor que estará sempre dependente do número de módulos a fabricar, assumem-se como valores aproximados de venda ao público 250€ para um módulo com duas entradas digitais e 350€ para um módulo com duas entradas analógicas e para um módulo *gateway*. Sendo estes módulos certificados segundo a norma ATEX, estes valores poderão ascender aos 500€.

Com os preços indicados, os quais oferecem já uma boa rentabilidade ao fabricante dos módulos, uma unidade de aquisição de dados a ser instalada num reservatório e composta por uma interface com quatro entradas analógicas e uma *gateway*, representaria para o cliente um investimento de cerca de 1500€. Apenas compare-se este valor com as estimativas que apontam para que o custo de instalação de um único metro de comunicações cabladas possa ascender aos 6000\$ e facilmente se constata que a aquisição e instalação de um sistema de aquisição de dados baseado em comunicações sem fios significa uma pequena fracção do investimento que significaria a alternativa cablada. De ressaltar ainda o facto de que, depois de instalado, o sistema sem fios é praticamente livre de manutenção, ao invés do que acontece com o sistema cablado que verá toda a cablagem ser substituída ao fim de 10 a 20 anos.

## V.2 Trabalho Futuro

Apesar de se poder inferir sobre a verdadeira performance que uma rede em malha e que uma rede em anel com *token passing*, proposta neste projecto, oferecerão quando aplicados a sistemas de aquisição de dados a serem instalados em parques de armazenagem de produtos petroquímicos, exercício que, aliás, fora feito ao longo dos últimos capítulos, a este trabalho ficará a faltar a sua confirmação. De forma a validar, ou não, a argumentação realizada em torno da defesa do novo protocolo aqui apresentado, propõe-se, como trabalho futuro, simular e testar ambas as redes de comunicações aplicadas a um sistema de aquisição de dados a ser instalado num parque com cerca de 50 reservatórios. Na sequência da comparação dos resultados, deverá então ser possível afirmar com maior certeza se, das duas arquiteturas, é de facto a rede em anel proposta neste trabalho a que atinge um melhor desempenho face às condicionantes únicas que um parque de armazenagem de produtos petroquímicos impõe. Deverá também ser possível confirmar se é, de facto, aquela a arquitetura que recupera de forma mais célere de eventuais falhas que ocorram nos seus nós.

# Bibliografia

Karl, Holger; Willig, Andreas (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.

Zhao, Feng; Guibas, Leonidas J.. *Wireless Sensor Networks - An Information Processing Approach*. Morgan Kaufmann Publishers

Peterson, Larry L.; Davie, Bruce S. (2003). *Computer Networks – a System Approach*, 3ed. Morgan Kaufmann Publishers.

Dunn, William C. (2006). *Introduction to instrumentation, sensors, and process control*. Artech House.

Nebojsa Matic. *Introduction to PLC Controllers*. Consultado em Fevereiro de 2008, a partir de <http://www.mikroe.com/en/books/plcbook/plcbook.htm>.

*PLCtutor.com*. Último acesso em Fevereiro de 2008, a partir de <http://www.plctutor.com/>.

National Instruments. *PACs for Industrial Control, the Future of Control*. Último acesso em Fevereiro de 2008, a partir de <http://www.ni.com/>.

Opto 22. Último acesso em Fevereiro de 2008, a partir de <http://www.opto22.com/>.

Yokogawa. Último acesso em Fevereiro de 2008, a partir de <http://www.yokogawa.com/>.

*A Galp Energia*. Último acesso a 31 de Agosto de 2009, de <http://www.galpennergia.com>.

Cisco. *Cisco Internetworking Technology Handbook*. Último acesso em 9 de Setembro de 2008, a partir de [www.cisco.com/](http://www.cisco.com/).

*Learn Networking*. Último acesso em 9 de Setembro de 2008, a partir de <http://www.learn-networking.com>.

*CAN in Automation*. Último acesso em Setembro de 2008, a partir de <http://www.can-cia.org>.

*International Electrotechnical Commission*. Último acesso em 12 de Setembro de 2008, a partir de <http://www.iec.ch>.

*Cenelec Standards Inspections*. Último acesso em 12 de Setembro de 2008, a partir de <http://www.cenelec.com>.

Ergen, Mustafa; et al; *WTRP-Wireless Token Ring Protocol*.

Lin, David; e tal; *A Delay-bounded Multi-Channel Routing Protocol for Wireless Mesh Networks using Multiple Token Rings: Extended Summary*.

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc (2002). *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture*.

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc (2002). *IEEE Std 802.15.4-200*

*IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee*. Último acesso em 19 de Setembro de 2008, a partir de <http://www.ieee802.org/>.

Steinhoff - Automation & Fieldbus Systems; *Fieldbus Comparison* (2009). Último acesso a 6 de Agosto de 2009, a partir de [http://www.steinhoff.de/fb\\_comp.htm](http://www.steinhoff.de/fb_comp.htm)

Oil & Gas Solutions. *Integrated Terminal Solutions* (Fevereiro de 2008). Último acesso a 31 de Agosto de 2009, a partir de [www.honeywell.com](http://www.honeywell.com).

Arabian Oil & Gas. *Petrochemicals focus: Storage tank farms* (Julho de 2009). Último acesso a 31 de Agosto de 2009, a partir de <http://www.arabianoilandgas.com>.

Arabian Oil & Gas. *Focus: Effective Asset Management* (Julho de 2009). Último acesso a 31 de Agosto de 2009, a partir de <http://www.arabianoilandgas.com>.

Texas Instruments. *CC2520 Datasheet* (Dezembro de 2007).

Texas Instruments. *CC2591 Datasheet, Rev. A* (Junho de 2008)

Andersen, Audun. *Application Note AN058 - Antenna Selection Guide*. Texas Instruments. Acedido a partir de <http://www.ti.com>.

Salvo expressa indicação, as figuras incluídas neste texto são da minha autoria.