



José Eduardo Gomes Oliveira

# INTEGRAÇÃO M2M DE SISTEMAS EMBEBIDOS PARA GESTÃO DE ACTIVOS INDUSTRIAIS

Tese de Doutoramento em Física, especialidade de Física Tecnológica, orientada pelo Senhor Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso e apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**JOSÉ EDUARDO GOMES OLIVEIRA**

## **INTEGRAÇÃO M2M DE SISTEMAS EMBEBIDOS EM GESTÃO DE ACTIVOS INDUSTRIAIS**

Tese de Doutoramento em Física, especialidade em Física Tecnológica, orientada pelo Senhor Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso e apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Este trabalho foi parcialmente suportado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, e pela Eneida, Lda., através do programa de Bolsa de Doutoramento em Empresa com a referência: SFRH/BDE/33436/2008. Foi também parcialmente suportado pela eneida® wireless & sensors, S.A. e pelo contracto QREN IDT n° 28482.



*Ao Manuel Maria de Oliveira  
também conhecido por Manuel Martinho*



## RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo de um modelo para o exercício da gestão de activos industriais, baseado na integração de sistemas embebidos de medida e controlo com módulos de comunicação sem fios de baixo consumo, num quadro de comunicações Máquina-a-Máquina (M2M), e subseqüentes realizações para aplicações industriais diversas. São aqui apresentados e discutidos os aspectos que caracterizam sistemas de informação locais e remotos, para aplicações industriais de manutenção preditiva de activos, segurança de pessoas e activos, e optimização da produção. São apresentados sistemas realizados para cenários e aplicações industriais com características bem distintas: subestações da rede eléctrica, perímetros de processo químico, e minas subterrâneas. É aqui demonstrado que os sistemas embebidos têm capacidade para conduzir aplicações simples de diagnóstico e reduzir o volume de dados desde a origem, sem perder a qualidade da informação, constituindo-se assim como agentes de suporte à decisão, em tempo útil. O trabalho conclui também que uma autonomia energética necessária à viabilidade dos sistemas é conseguida com a simplificação da sua programação, com o exacto dimensionamento da sua memória interna, e com a correcta selecção da frequência de operação.

**Palavras-chave:** *M2M, IoT, sistemas embebidos, redes sem fios de baixo consumo, infra-estruturas industriais, ATEX.*

## ABSTRACT

This dissertation addresses the activity of industrial asset management, based on sensing and controlling embedded systems, and bridging information over low power, low range, low cost, wireless networks, in a machine-to-machine (M2M) framework. Local and remote information systems are characterized, and different solutions are described, corresponding to a wide range of industrial applications such as predictive maintenance, safety evaluation of both people and assets, and productivity improvement. Different industrial scenarios are evaluated and their respective constraints analysed – power grid substations, chemical process plants, and underground mines. Emphasis is put on the capabilities to handle data locally, often doing simple diagnostic tasks, which makes it possible to achieve a good deal of data reduction, thus reducing message traffic over communication networks, yet at no information loss. Embedded wireless systems are thus able to perform dually, for both timely warning/alarm messaging, and long-term decision support. It is also concluded that the devices are able to reach higher levels of energy autonomy through small footprint programming, thus sparing both execution time and memory, and by adopting clock frequencies adequately low.

**Keywords:** *M2M, IoT, embedded systems, wireless sensor networks, industrial infra-structures.*



## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Francisco Cardoso agradeço o seu esforço e dedicação na criação da importante ponte entre o Departamento de Física e a empresa Eneida, e pela construção da oportunidade de realizar investigação aplicada à indústria. Agradeço-lhe ainda a sua disponibilidade no apoio às tarefas de especificação, desenvolvimento e teste, e pela sua assertiva orientação dos trabalhos e da presente tese.

Ao Carlos Pina Teixeira agradeço a oportunidade de fazer parte da equipa da Eneida, e pelo seu interesse em promover a investigação e a construção de soluções inovadoras. Agradeço-lhe também pela curiosidade e interesse na investigação realizada, e por dar o seu contributo na condução de resultados para o mercado.

Agradeço aos meus colegas do grupo de sensores inteligentes, Rui Gomes, Sérgio Faria, António Macedo e Sónia Semedo, por todo o apoio na construção de protótipos, e pelo trabalho de equipa realizado nos diferentes projectos. Agradeço aos meus colegas de equipa Nuno Sousa, Duarte Raposo, Dien Tran e Flávio Cordeiro, por todos os seus comentários às especificações das diferentes fases do projecto, pelo seu apoio à realização dos desenvolvimentos e testes, e pelos seus contributos para a discussão dos resultados. Agradeço também todos os colegas da eneida®, pelos seus esclarecimentos sobre as circunstâncias e vicissitudes dos processos industriais, bem como pela sua colaboração nos aspectos construtivos dos dispositivos e na instalação de projectos-piloto. Agradeço ainda ao IPN, à Companhia de Bombeiros Sapadores de Coimbra, à EDP Distribuição, ao grupo Portucel-Soporcel, à GALP, e à CIRES, a oportunidade que nos foi dada para usar os seus espaços físicos para estudar e testar as diferentes tecnologias.

Agradeço à minha mãe pelo seu sólido e constante suporte à minha vida e ao meu trabalho. Agradeço a toda a minha família, em especial aos meus tios Maria Manuela e Manuel Raimundo, por todo o apoio que me deram em todo o meu percurso.

Agradeço à Maria Rita, por ter aprendido bem depressa a dormir a noite inteira e a sorrir todas as manhãs. Agradeço à Idália por me ter acompanhado em todos os momentos deste e de outros processos, e pelas elevadas doses de paciência que teve comigo durante todo este período, em especial na fase final do mesmo.

## ÍNDICE

RESUMO	III
ABSTRACT	IV
AGRADECIMENTOS	VI
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos	2
1.2. Internet das Coisas	3
1.3. Interacção Máquina-a-Máquina	4
1.4. O contexto empresarial	5
1.5. Descrição do documento	6
2. SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DE INSTRUMENTAÇÃO - MECANISMOS E PLATAFORMAS DE COMUNICAÇÃO	8
2.1. Redes “de campo”	10
2.1.1. Métodos “Acesso ao Meio”	11
2.1.2. “Modbus”	12
2.1.3. CAN	12
2.1.4. “Profibus”	14
2.1.5. HART	15
2.1.6. “Foundation Fieldbus”	16
2.1.7. Redes de Campo e “Ethernet” – Discussão	18
2.2. Redes de instrumentos sem fios	19
2.2.1. Factores Fundamentais	19

2.2.1.1.	Autonomia	20
2.2.1.2.	Fiabilidade	20
2.2.1.3.	Segurança	22
2.2.1.4.	Arquitectura	24
2.2.2.	A plataforma IEEE 802.15.4	25
2.2.3.	ZigBee	27
2.2.4.	Tecnologias com sincronismo	30
2.2.4.1.	ISA 100.11a:2008	32
2.2.4.2.	WirelessHART	33
2.2.5.	Redes na banda ISM 433MHz	34
2.2.5.1.	DASH7 Alliance Protocol	36
2.2.5.2.	IEEE 802.15.4f	37
2.2.6.	SimpliciTI	38
2.2.7.	RFID e WPAN - Discussão	39
2.2.8.	WPAN e Internet - Discussão	40
<b>2.3.</b>	<b>Plataformas de interoperabilidade</b>	<b>42</b>
<b>2.4.</b>	<b>Discussão e Enquadramento</b>	<b>43</b>
<b>3.</b>	<b>ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE SISTEMAS – FACTORES TECNOLÓGICOS</b>	<b>45</b>
<b>3.1.</b>	<b>Construção de sensores</b>	<b>46</b>
3.1.1.	Avaliação de alcance e intensidade de sinal	47
3.1.1.1.	Avaliação da influência do epóxi na propagação RF	50
3.1.1.2.	Avaliação de módulos wirelessHART	53
3.1.2.	Avaliação de consumos e autonomia	54
3.1.3.	Avaliação em temperatura	57
<b>3.2.</b>	<b>Construção de redes</b>	<b>58</b>
3.2.1.	Avaliação do canal RF	59
3.2.1.	Configurações de rede	61
<b>4.</b>	<b>GESTÃO DE ACTIVOS INDUSTRIAIS REMOTOS</b>	<b>62</b>
<b>4.1.</b>	<b>Estações de serviços de interesse geral</b>	<b>62</b>
<b>4.2.</b>	<b>Sensor de alinhamento</b>	<b>65</b>
<b>4.3.</b>	<b>Ensaio no laboratório</b>	<b>67</b>
<b>4.4.</b>	<b>Ensaio externos - compatibilidade electromagnética e estanquicidade</b>	<b>68</b>
<b>4.5.</b>	<b>Avaliação em ambiente real</b>	<b>69</b>
<b>4.6.</b>	<b>Comunicação na rede pública</b>	<b>70</b>
<b>4.7.</b>	<b>Discussão</b>	<b>71</b>
<b>5.</b>	<b>APLICAÇÕES DE SEGURANÇA E PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL</b>	<b>73</b>
<b>5.1.</b>	<b>Localização de activos com base em redes de sensores sem fios</b>	<b>74</b>
<b>5.2.</b>	<b>Zonas potencialmente explosivas</b>	<b>75</b>
<b>5.3.</b>	<b>Arquitectura do sistema de localização de pessoas</b>	<b>76</b>
<b>5.4.</b>	<b>Tags</b>	<b>77</b>
5.4.1.	Ensaio de autonomia	79
5.4.2.	Ensaio do “intrinsecamente seguro”	79
<b>5.5.</b>	<b>Leitores</b>	<b>80</b>

5.5.1.	Avaliação da capacidade das diferentes redes do sistema	83
5.5.2.	Avaliação da medida de RSSI em função da humidade	84
<b>5.6.</b>	<b>Métodos de localização</b>	<b>85</b>
5.6.1.	Análise preliminar de métodos existentes	85
5.6.2.	Método de comparação de padrões	87
5.6.3.	Filtragem de Kalman com dados de movimento	89
<b>5.7.</b>	<b>Testes em ambiente industrial</b>	<b>91</b>
5.7.1.	Avaliação de métodos existentes	91
5.7.2.	Avaliação do método de comparação de padrões	93
5.7.3.	Avaliação do método corrigido com pedómetro	95
<b>5.8.</b>	<b>Discussão</b>	<b>97</b>
<b>5.9.</b>	<b>Gestão de tráfego em minas subterrâneas</b>	<b>98</b>
5.9.1.	Avaliação da medida de RSSI em função do movimento	100
5.9.2.	Notas finais	101
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>102</b>
	REFERÊNCIAS	104
	ANEXOS	124
	A1. PATENTE DE INVENÇÃO NACIONAL: MÉTODO DE MONITORIZAÇÃO SEM FIOS DE SECCIONADORES EM SUBESTAÇÕES DE REDES ELÉCTRICAS E RESPECTIVO DISPOSITIVO	A
	A2. PATENTE DE INVENÇÃO NACIONAL: SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO FINA TRIDIMENSIONAL EM TEMPO-REAL	B

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Canais dos <i>standards</i> IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, na banda ISM 2,4GHz. Fonte: [128].....	26
Figura 2: Pilha protocolar do ZigBee. Fonte: [134].....	27
Figura 3: Módulos estruturantes da pilha protocolar do ZigBee.....	28
Figura 4: Reencaminhamento de mensagens no ZigBee.....	29
Figura 5: Representação da alteração do canal de operação em janelas temporais bem definidas. Emissor e receptor partilham o código de sequência de canais de operação. Fonte: [128].....	31
Figura 6: Exemplo de arquitectura de uma rede ISA 100.11a. Fonte: [158].....	33
Figura 7: Placas de avaliação dos circuitos RF na banda dos 433MHz. ....	48
Figura 8: Placas de avaliação dos circuitos RF na banda dos 2,4GHz.....	48
Figura 9: Alcance máximo para a detecção de mensagens por parte do PCB de teste e do dispositivo receptor. ....	49
Figura 10: PCB 1 – Circuito de <i>balun</i> discreto e antena helicoidal.....	51
Figura 11: PCB 2 – Circuito de <i>balun</i> discreto e antena <i>whip</i> exterior.....	51
Figura 12: PCB 3 – Circuito de <i>balun</i> discreto e antena PCB. ....	51
Figura 13: PCB 5 – Circuito de <i>balun</i> integrado e antena helicoidal. ....	52
Figura 14: PCB 6 – Circuito de <i>balun</i> integrado e antena <i>whip</i> exterior.....	52
Figura 15: PCB 7 – Circuito de <i>balun</i> integrado e antena <i>chip</i> .....	52
Figura 16: Esquema da rede wirelessHART.....	53
Figura 17: Local do ensaio à rede wirelessHART. ....	53
Figura 18: Protótipo de sensor de temperatura (2,4GHz).....	55
Figura 19: Protótipo de sensor de humidade e temperatura (433MHz).....	55
Figura 20: Processo de aquisição de temperatura, adesão à rede e transmissão de mensagem do protótipo que opera nos 2,4GHz [8]. ....	56
Figura 21: Capacidade máxima das comunicações. ....	60



Figura 22: Capacidade máxima das comunicações em função do número de tentativas (CSMA), para um <i>payload</i> de 9 bytes.....	60
Figura 23: Taxa de utilização da rede com o protocolo eneida® (9 bytes de <i>payload</i> ), em função do número de nós da rede. ....	60
Figura 24: Arquitectura do sistema de monitorização de subestações. ....	63
Figura 25: Esquema da rede da subestação do Alto de S. João (Coimbra).....	64
Figura 26: Sensores do grupo 3 - transformadores 60KV-15KV. ....	64
Figura 27: Sensores do grupo 4 - seccionadores de alta tensão. ....	64
Figura 28: Seccionadores de um circuito trifásico de 60KV. ....	65
Figura 29: Esquema da orientação dos feixes de infravermelhos. Estão representados a cinza os foto-transístores, e a preto ao centro o LED.....	66
Figura 30: Interface de visualização da condição de um seccionador.....	67
Figura 31: Protótipo em ensaios CE. Em cima: montagem final do protótipo. Em baixo, à esquerda: PCB anterior; à direita: PCB posterior.....	68
Figura 32: Primeira instalação em seccionadores.....	69
Figura 33: Segunda instalação em seccionadores.....	69
Figura 34: Veículos de comunicação na rede pública.....	70
Figura 35: Arquitectura da rede sem fios.....	76
Figura 36: Motor de localização e serviços de consulta. ....	77
Figura 37: Primeira versão da tag (com o acelerómetro à esquerda do microprocessador). ....	77
Figura 38: Ilustração da <i>tag</i> do sistema. ....	78
Figura 39: Segunda versão da tag (com o microprocessador a manter a mesma posição da tag anterior, o acelerómetro ao meio, e o giroscópio no topo).....	78
Figura 40: Excerto do relatório de ensaio Ex ia. ....	80
Figura 41: <i>Gateway</i> CAN-433MHz, certificada para ATEX zona 2.....	81
Figura 42: Repetidor 433MHz de dois canais, alimentado a painel solar.....	81
Figura 43: Circuito de protecção da saída de potência do painel solar.....	82
Figura 44: Circuito de carga dos supercondensadores.....	82
Figura 45: Variação do RSSI com a temperatura, humidade – curta distância. ....	84
Figura 46: Representação do espaço de implementação no IPN.....	86
Figura 48: Tabelas do método de comparação de padrões.....	89
Figura 50: Operador no processo de Alquilação da BP Castellón.....	90
Figura 51: Implementação de um filtro de Kalman com dados de movimento.....	91
Figura 47: Espaço de implementação na SOPORCEL.....	92
Figura 49: Planta do espaço de implementação – CIRES, Estarreja. ....	94
Figura 52: Percurso 1, cota 0. ....	96
Figura 53: Percurso 2, cota de +0,37m.....	96
Figura 54: Aspecto gráfico da solução de gestão de tráfego implementada. ....	99
Figura 55: Ilustração da rampa de acesso à superfície.....	99
Figura 56: Local do teste de movimento em Coimbra.....	100
Figura 57: Distribuição do RSSI para uma tag em movimento.....	100

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Características da camada física do Dash7. ....	37
Tabela 2: Características da camada física do IEEE 802.15.4f. ....	37
Tabela 3: Características da camada física explorada pelo SimplicíTI. ....	38
Tabela 4: formato da trama do Dash7 Mode 2 [197]. ....	41
Tabela 5: Tipologia das placas de circuito impresso para os 433MHz. ....	48
Tabela 6: Tipologia das placas de circuito impresso para os 2,4GHz. ....	49
Tabela 7: Influência do epóxi na propagação RF. ....	50
Tabela 8: Consumos medidos com recurso a um osciloscópio. ....	56
Tabela 9: Teste de temperatura. ....	57
Tabela 10: Especificação de um regime de operação. ....	57
Tabela 11: Especificação da temperatura do equipamento durante um ano. ....	57
Tabela 12: Consumos da <i>tag</i> com acelerómetro. ....	79
Tabela 13: Custos dos leitores do sistema de localização. ....	81
Tabela 14: Número de mensagens a fluir nas redes de baixo débito. ....	83
Tabela 15: Avaliação da precisão de localização interior. ....	87
Tabela 16: Avaliação da precisão de localização com o método KF-kNN. ....	93
Tabela 17: Precisão do método de comparação de padrões. ....	95
Tabela 18: Precisão do motor de localização corrigido com movimento. ....	96
Tabela 19: Autonomia da <i>tag</i> com a pilha SAFT LS14500 ....	97



## 1. INTRODUÇÃO

As revoluções industriais dos tempos modernos trouxeram consigo um desenvolvimento socioeconómico maior e cada vez mais acelerado. Da máquina a vapor à industrialização do silício, passando por grandes marcos como a invenção dos motores a combustíveis fósseis; a geração de energia eléctrica e as telecomunicações; as revoluções modernas têm vindo a promover as suas conseguintes, abrindo em avalanche as oportunidades para o desenvolvimento tecnológico que nos trouxe até hoje. Com base em diferentes tecnologias de comunicação e num enorme desenvolvimento de ferramentas de *software*, teve lugar o nascimento da Internet, que cresceu e cimentou bem depressa a sua presença na sociedade, e constituiu a última grande revolução industrial, sendo hoje responsável por quotas de emprego substanciais em todo o mundo, e com forte tendência para as aumentar [1].

A par dos notáveis crescimentos económicos, sociais e culturais, a era moderna trouxe também novas preocupações decorrentes de condições de trabalho mais exigentes e de maior exposição aos perigos que os novos processos conferem. A este cenário, a indústria foi respondendo com o estudo mais detalhado dos princípios físicos, o desenvolvimento de novos mecanismos de segurança e a consecutiva automatização dos processos industriais. É verdade que a oportunidade do aumento da produção e o rápido retorno do investimento determinam o sucesso das novas tecnologias e metodologias, mas é também um facto que, desde cedo, toda a evolução industrial foi ao encontro da necessidade de libertar as pessoas de um maior esforço físico e de minimizar os riscos associados à profissão.

A gestão da segurança em ambiente industrial tem como objectivo criar uma cultura para responsabilidade humana e para o conhecimento dos perigos, atribuindo a maior prioridade à integridade física de todas as pessoas. A gestão da manutenção de activos industriais tem a responsabilidade de conseguir responder às regras da segurança e às previsões da produção, obrigando-se a conhecer em pormenor a condição dos activos, de forma a não permitir a ocorrência de acidentes de origem não humana, e garantindo a disponibilidade dos activos para a execução dos processos programados.

Se os processos produtivos são projectados para operar continuamente, e portanto sem exposição humana a condições perigosas; já as inspecções de activos, prévias às acções de manutenção dos mesmos, mas efectuadas em pleno funcionamento, obrigam tantas vezes à

exposição humana a tais condições, ainda que temporariamente. Por este motivo, pelas restrições provenientes da produção, e por outras razões de ordem prática, que se prendem com a monotonia das acções e pelo tempo despendido pelos recursos envolvidos, a indústria irá evoluir para a monitorização remota, automática e em contínuo do estado dos seus activos críticos, e tornar-se-á residual a prática das inspecções periódicas.

O presente trabalho foca-se em responder a estas novas necessidades. Trata-se então de estudar, conceber e desenvolver novos sistemas de monitorização da condição de activos industriais, que permitam obter uma maior qualidade de informação, e que a entreguem aos utilizadores mais habilitados para a consumir, usando para tal todas as redes de informação necessárias para a entrega desta num curto lapso de tempo. Para além da descrição detalhada da construção de instrumentos de medida mais inteligentes e mecanicamente mais ajustados ao ponto de medida, este trabalho explora a expansão das redes de informação do centro dos modernos sistemas de instrumentação para 3 direcções: a caracterização dos processos na origem da condição de falha; a actuação automática com vista a regulação dos processos; e o supervisor mais habilitado para digerir a informação gerada. O sucesso deste novo figurino tecnológico está dependente da utilização da Internet, como forma expedita de ligar diferentes redes em qualquer ponto do mundo, e também dos mecanismos de segurança que o conjunto de redes seja capaz de fornecer para responder às necessidades de robustez da conectividade, de fiabilidade da informação e da segurança na entrega ao destinatário. Um outro ponto não menos importante é a segurança no acesso à rede e às diferentes máquinas, às diferentes fases do processamento da informação, e à actuação remota.

## 1.1. Objectivos

Os objectivos que orientaram o caminho do trabalho realizado foram os seguintes:

- Criar um modelo de desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão, para satisfazer funções da instrumentação na Indústria, relativas a segurança de pessoas e activos e a gestão da exploração (operação e manutenção), baseado na monitorização contínua da condição dos recursos, e no acesso remoto à informação;
- Caracterizar de forma mais fina, e portanto mais local, os activos e os processos industriais;
- Distribuir a inteligência por todos os dispositivos da rede, por forma a permitir o uso de redes sem fios, necessária à melhor caracterização dos activos e dos processos;
- Dimensionar funções e recursos por forma a garantir a necessária autonomia dos dispositivos de uma rede sem fios;
- Reduzir os volumes de informação, por forma a viabilizar o uso das redes sem fios de baixo consumo e curto alcance.
- Compreender o conceito de suporte à decisão, os diferentes entendimentos do mesmo por parte de diferentes utilizadores, e as exigências inerentes à prestação deste serviço.

## 1.2. Internet das Coisas

A Internet é o resultado de um conjunto de enormes desenvolvimentos em comunicações e redes de computadores, e constitui hoje a rede das redes. Trata-se de uma ferramenta altamente complexa, global e uma vez constituída, imprescindível. A ideia primeira é o acesso à informação por qualquer pessoa em qualquer lugar, a qualquer hora. Perante esta realidade, a expressão “à distância de um *click*” ganhou fama e forma, mas a Internet é muito mais do que o acesso directo à informação. A esmagadora maioria das comunicações de voz por redes móveis, das transmissões televisivas e de rádio, passam hoje também pela Internet. Compras e vendas, acessos a contas bancárias e transferências, acções de controlo e gestão, tudo hoje tem como base a rede das redes. Estas e outras acções que realizamos hoje no nosso quotidiano implicam centenas de iterações em múltiplos computadores – de acesso à rede, do prestador do serviço utilizado, do prestador do serviço de Internet, dos prestadores de serviços de segurança sobre a *web*, de base de dados, entre outros – e sem darmos conta disso. Este é o conceito de computação ubíqua [2], a omnipresença dos computadores na nossa vida.

Para além dos computadores, outras coisas começam a estar em rede sem darmos conta disso. Hoje em dia o utilizador comum partilha ficheiros e tem o seu próprio arquivo na *web*. Deixamos a possibilidade de nos esquecermos dos arquivos no computador de casa e passamos a ter acesso a estes através do acesso à rede das redes, também conhecida agora como a “nuvem”. Em contexto profissional, a informação mais crítica tem vindo a deixar de ser guardada em equipamentos locais, para passar a ser guardada na nuvem por quem oferece esses serviços com grande competência em nome da maior segurança e da eficiência no consumo de energia. Depois dos arquivos foram as aplicações permitindo agora o acesso remoto, a qualquer altura, de uma consulta ou decisão, de qualquer processo à distância de um “*log in*” e “*password*” – é a era do “*Cloud Computing*”.

Também a domótica cresceu da automação para o domínio das comunicações e Internet, permitindo hoje controlar uma casa remotamente, como ligar o aquecimento antes de lá chegar, ligar e desligar tomadas ou receber avisos de alteração do estado de portas e janelas. Aplicações mais complexas, mas não tão distantes como possam parecer, passam por configurar a casa através de um portal *web*, e permitir o acesso a algumas divisões da casa ao portador do telefone com aquele número, durante a semana a definir. Mas o Mundo quer ir mais além, e no limite colocar todas as coisas na Internet. A possibilidade de conhecer qualquer coisa em qualquer lugar, através da leitura do seu selo de radiofrequência; de uma pessoa ter o seu selo RF no braço, parar numa estação de serviço num lugar remoto, e a máquina de café poder identifica-la e servir-lhe o café ao seu gosto são ideias preconizadas no âmbito do tema “a Internet das coisas” – em inglês “*The Internet of Things*” (IoT) [3] [4].

O forte crescimento no número de acessos à Internet tem sido acompanhado pelo enorme desenvolvimento e crescimento das redes de fibra-óptica (nacionais, continentais e intercontinentais) e das infra-estruturas de redes móveis. O crescimento do uso do telemóvel potenciou também este processo, sendo que hoje existem perto dos 6 mil milhões de aparelhos conectados [5]. O acesso remoto à informação e à operação industrial, pode

agora ser realizado por equipamentos pessoais com acesso à rede sem fios local ou à Internet, funcionando como terminais cliente de um servidor na rede. Para acelerar este acesso a determinada máquina, ou *cluster* de sensores, podem ser criados *webservices* na máquina ou no *gateway* desse *cluster*. Os *webservices* permitem o acesso directo à leitura de dados em tempo-real, e à configuração da operação, a partir de um *browser web*. Este acesso implica que o servidor *web* esteja na máquina à qual se acede e portanto que esta tenha um endereço IP. No caso de um *cluster* de sensores e actuadores, o *webservice* é hospedado no *gateway* que estará disponível num endereço *http*. Para além das máquinas e *gateways*, também as bases de dados ou as aplicações podem estar na nuvem, permitindo assim o acesso ao histórico ou à análise de dados em tempo-real. Em comum, estes serviços *web* têm de compreender mecanismos de segurança elevada, uma vez que estão disponíveis para qualquer pessoa.

### 1.3. Interacção Máquina-a-Máquina

A optimização dos processos industriais passa por usar as soluções mais adequadas para cada situação específica, e que estas possam adaptar o seu modo de operação em função dos diferentes cenários previamente definidos. Passa ainda por libertar pessoas das tarefas de contínua monitorização para o controlo. Desta visão nasceu o conceito de comunicações máquina-a-máquina – em inglês “*machine-to-machine*” (M2M) [6] que pretende descrever um ambiente onde máquinas falam com máquinas, independentemente das tecnologias que as conformam, dos protocolos de comunicação implementados nas mesmas, e da sua localização no espaço, alterando o seu perfil de funcionamento sem intervenção humana [7]. O futuro deste conceito depende de dois factores primordiais: interoperabilidade e confiança nos sistemas inteligentes. A resposta mais pronta está na construção do entendimento entre máquinas, ou seja, na construção de *standards* que permitam a franca comunicação entre sensores e actuadores, de diferentes fabricantes – a interoperabilidade. A confiança na resposta automática de um actuador, face a um comportamento identificado por um processo de monitorização da condição, terá decerto um longo e lento caminho a percorrer para se tornar mais presente, tão longo quanto o necessário para se criarem os padrões de comportamento e para se aumentar resolução dos alertas. Em particular, a decisão de parar um processo produtivo, como resposta à identificação de um estado de alta degradação de um activo do processo, estará sempre ligada à ponderação do custo de não produção (naquele momento) e o custo da reparação em função do tempo de trabalho em estado degradado.

Dado o vasto leque de fabricantes, tecnologias e protocolos de comunicação, o sucesso do M2M depende de um esforço para a conectividade, a interoperabilidade e a segurança nos diferentes acessos. A criação de *standards* de comunicação muito contribuiu para tal, mas os diferentes cenários de aplicação convidaram à existência de dezenas de tecnologias *standards*, pelo que a interoperabilidade contínua dependente das interfaces entre estas.

A comunicação entre máquinas, construídas por diferentes fabricantes, implica então que cada uma delas seja inteligente para interpretar a outra – através de um protocolo comum – e inteligente para agir em conformidade – com capacidade para tomar decisões.

Em função da distância e dos cenários de aplicação esta plataforma de entendimento pode ser conseguida com recurso a unidades *gateway* – unidades com adaptação física de diferentes tecnologias e com a inteligência para a tradução protocolar – ou em sistemas mais avançados, através da Internet. O conceito de *gateway* não se esgota nos pontos referidos, podendo compreender também o significado das mensagens, o reconhecimento do tipo de equipamento, variáveis de medida ou parâmetros de controlo. Em nome do bom uso do recurso tempo, os sistemas mais avançados incluem aplicações que virtualizam a complexidade do sistema e da sua rede de informação, disponibilizando apenas o acesso à informação, à configuração e à actuação, de uma forma única, quaisquer que sejam os fabricantes dos equipamentos, tecnologias e protocolos das camadas intermédias do sistema de monitorização e controlo industrial.

As redes M2M são um veículo de informação e constituem uma enorme mais-valia para a optimização das operações industriais. Mas no campo da manutenção, o M2M por si só não resolve o maior ponto-chave do futuro tecnológico industrial - o apoio à decisão. Os sistemas mais avançados de gestão da automação e instrumentação industrial terão obrigatoriamente de passar pelo conhecimento profundo dos processos, para que os sensores possam comunicar directamente com os actuadores, e até mesmo para que os sistemas simplesmente apresentem ao operador humano a oportunidade de a dar ordem de realização da acção que o próprio sistema já determinou como óptima para a sua condição actual.

#### **1.4. O contexto empresarial**

A realização de um trabalho de investigação e desenvolvimento inovador em contexto empresarial é uma experiência muito enriquecedora. Desde logo, o investigador começa por fazer parte de dois grupos de investigação, o da Universidade e o da Empresa, e desta forma tem acesso a mais recursos e perspectivas.

A investigação em ambiente empresarial força a criação de muitos contactos, com diversos sectores da sociedade, e implica que os resultados da investigação sejam revistos por mais pessoas com diferentes competências técnicas, fazendo com que os diferentes pontos de vista cheguem ao investigador de forma contínua. Também ao nível das competências sociais existem aspectos muito positivos, uma vez que os muitos contactos com parceiros promovem as relações interpessoais. Mas é sobretudo a oportunidade da realização da prova de conceito em perímetro industrial que acrescenta mais valor ao doutoramento em empresa. No caso particular da Eneida [8], é de distinguir o enorme conjunto de desafios que foram colocados à investigação, sempre associados a projectos-piloto ou cenários reais. Esta realidade solicita ainda que os resultados cheguem depressa à forma de produto e não terminem na experiência, já que as indústrias que recebem esta prova de conceito só o permitem quando pretendem ver o resultado da investigação a acrescentar valor à operação em causa. Cria-se desta forma a oportunidade para a exigência



do resultado final, abrangendo as diversificadas competências já referidas, das regras de segurança, da optimização da produção e da manutenção, e do tempo de vida útil dos novos produtos em ambientes severos.

A investigação em empresa também oferece algumas restrições que em universidade não serão tão visíveis. Em ambiente empresarial o prazo de realização é sempre curto, dificultando o caminho da investigação com detalhe e promovendo a aceleração de um produto para o seu mercado. Este aspecto ganha maior relevância quando existe um projecto-piloto entre a empresa e um parceiro – e futuro cliente. Surgem assim mais fontes de pressão para o cumprimento de prazos curtos, obrigando o investigador a controlar melhor os tempos pesquisa e avaliação de opções, e a estreitar as direcções de teste e ensaio; para cumprir os objectivos do seu programa e da organização. É por isso muito importante que o investigador seja capaz de controlar o seu tempo e de reclamar o seu planeamento. No âmbito deste trabalho existiu a oportunidade de realizar duas candidaturas ao programa de incentivos QREN IDT individual, as quais foram aprovadas e executadas com rigor, permitindo criar o necessário espaço de oportunidade à investigação e ao teste.

As publicações são também alvo de fortes restrições quando se realiza investigação em ambiente empresarial. Por um lado a matéria mais nova e mais competitiva é alvo da solicitação para a sua ausência em publicação, no período prévio a um pedido de patente, inibindo assim a submissão de artigos capazes de chegar a revista científica, no referido período. Por outro lado, a motivação da empresa é, em geral, diferente da universidade no que se refere à selecção de conferências e revistas, surgindo neste campo as pressões para orientar publicações a mercados-alvo, a conferências mais participadas por potenciais clientes e não tanto por colegas investigadores. Ainda assim, o trabalho descrito no presente documento pôde ser apresentado aos dois públicos e discutido ora por uns ora por outros. Foram ainda submetidos dois pedidos de patente provisório, um em 2013 e outro já em 2014 (ver anexos A e B), para os quais se obteve do INPI relatórios preliminares que apresentam um parecer de cumprimento dos requisitos de patenteabilidade. O primeiro pedido provisório foi convertido em definitivo em 2014, com a apresentação de novos cadernos técnicos. O segundo fará agora o mesmo caminho.

## **1.5. Descrição do documento**

A revisão da matéria é feita na secção 2. Aqui são descritas as principais tecnologias de comunicação, as suas camadas físicas, os mecanismos de encriptação e de segurança das redes. O estado-da-arte fica completo com a análise da aplicabilidade das diferentes tecnologias, e com a discussão das interfaces para a interoperabilidade.

Na secção 3 são apresentados os elementos que constituem os sistemas de gestão de activos, e os principais factores tecnológicos que condicionam as escolhas de tecnologia. São ainda apresentados os ensaios e discutidos os resultados que suportaram as especificações criadas ao longo deste trabalho.

Na secção 4 são apresentados alguns sensores inteligentes, desenvolvidos para aplicações de manutenção preditiva em ambientes agressivos, focando as considerações técnicas e construtivas para a operação exposta a campos electromagnéticos fortes, ao ruído, e outras condições que afectam a condição do dispositivo. É também apresentada a arquitectura geral de um sistema inteligente e remoto de gestão de activos.

Na secção 5 é apresentado um sistema de segurança baseado na arquitectura defendida anteriormente, mas para um domínio distinto: a evacuação e resgate de pessoas em recintos industriais potencialmente explosivos, baseada na localização de pessoas. São referidas as regras de actuação nestes ambientes, bem como os requisitos legais que condicionam a construção dos dispositivos. Nesta secção é ainda apresentado um sistema de optimização da produção numa mina subterrânea, baseado na tecnologia desenvolvida para os sistemas de segurança.

A secção 6 apresenta as considerações finais, as conclusões dos trabalhos desenvolvidos e as linhas orientadoras dos trabalhos futuros.

## 2. SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DE INSTRUMENTAÇÃO - MECANISMOS E PLATAFORMAS DE COMUNICAÇÃO

O processo industrial é a realização da automatização das técnicas de fabrico, com vista ao aumento da repetibilidade e da produtividade. A eliminação das diferenças entre os resultados dessa mesma produção conduz ao aumento da confiança no produto final e à diminuição do esforço a alocar à análise de qualidade do mesmo. Os autómatos são então dispositivos capazes de alterar o perfil de operação de um aparelho ou máquina do processo produtivo, em função de um sinal eléctrico que lhes é transmitido. Os instrumentos de medida são dispositivos habilitados com elementos transdutores que em função da condição física à qual estão expostos, promovem a alteração dos sinais que os atravessam possibilitando assim a medição de um ou mais parâmetros. Entre estas duas entidades está o centro de processamento e decisão, aquele que tem a responsabilidade de analisar o estado do processo a partir das medidas fornecidas pelos instrumentos, e em função destas fazer actuar os autómatos. Ao conjunto composto por estas 3 entidades vamos passar a chamar sistema de controlo.

Inúmeras são as arquitecturas possíveis para a criação de um sistema automático de controlo de um processo industrial, desde a mais tradicional rede de sinais eléctricos (analógicos ou digitais, para medida e actuação) comandada por um único ponto de processamento, aos modernos sistemas que distribuem o controlo das operações por diferentes autómatos e computadores, interligados entre si e ao sistema de supervisão por redes industriais, até às contemporâneas redes M2M onde um sensor e um actuador comunicam entre si e gerem os seus processos sem intervenção humana. Em todo o caso, os processos industriais são controlados e instrumentados, e esta informação está, de alguma forma, disponível à gestão e supervisão do processo. Este capítulo foca a evolução do estado-da-arte na integração da informação de um processo, e o impacto que os diferentes métodos podem ter na gestão de uma planta.

Em 1975, a **Westinghouse Electric Corporation** conseguiu ver patenteado um gerador de energia eléctrica (com base numa turbina de gás) controlado por computador. Neste invento [9], o computador é constituído por um grupo de entradas analógicas, um grupo de

entradas digitais, um processador central, um sistema de interrupções ao processador, e um grupo de saídas digitais. Ao primeiro estão ligados todos os sensores do sistema, essencialmente de medida da temperatura em inúmeros pontos (óleo, ar e água), mas também de medida dos parâmetros eléctricos dos grupos geradores, bem como de pressão e vibração. O segundo é composto por um grupo de contactos que podem ser operados pelos motores ou pelos operadores no local ou remotamente. Estes dois grupos de entradas fazem accionar interrupções ao chamado processador central, que por sua vez faz accionar os respectivos contactos de saída. O controlo de velocidade e de potência foi projectado para ser realizado por passos (fecho de contactos da interface de saídas digitais) em função dos níveis de temperatura, pressão, corrente e tensão. A interface digital agregava a informação de fechos manuais ou dos relés de segurança, mostrando o estado de cada entrada no painel iluminado. Este computador, então designado por computador digital, foi dimensionado para controlar até 4 grupos geradores, ou seja, 4 plantas de produção de energia.

A conectividade entre sensores ou actuadores de campo, e a sua respectiva interface no computador central, começou por ser feita (e ainda hoje muito se pratica) através de sinais eléctricos, em corrente ou em tensão. Dadas as dimensões das áreas industriais e o maior número de processos em cada planta, os sinais em corrente tornaram-se o padrão da monitorização e actuação remota, evitando assim os erros de medida provocados pelas quedas de tensão ao longo dos condutores entre os instrumentos e o computador central. Também hoje, a grande maioria dos sensores industriais consistem em elementos transdutores fornecidos com transmissor de corrente.

A crescente modernização industrial depressa transformou o cenário da automatização para uma omnipresença de sensores e autómatos em todos os processos e subprocessos, em todos os departamentos, da produção à segurança, da manutenção de equipamentos à gestão mais geral de um sector. Os sistemas de controlo foram acompanhando esta evolução, umas vezes promovendo a disponibilidade para um maior número de instrumentos e autómatos, outras vezes obrigados a ter uma maior capacidade cálculo. Esta necessidade, não só promoveu a evolução dos computadores como também determinou a ideia de os agregar, aumentando assim a capacidade de análise de dados e realização de acções dos sistemas de controlo, agora distribuídos.

O computador central, como único dispositivo programado, deu lugar à distribuição de programas em diferentes nós controladores digitais programáveis – os *Programmable Logic Controllers* (PLC). Estes controladores são autómatos programáveis, desenhados para controlar em tempo-real processos sequenciais, efectuando cálculos lógicos. Têm a capacidade tratar os sinais analógicos dos instrumentos de medida e modelam aqueles que disponibilizam aos instrumentos de controlo, mediante a programação local. Tratam ainda sinais digitais, provenientes de transístores, relés, instrumentos de detecção ou contadores, entre outros, bem como fazem actuar elementos de contacto, essencialmente.

A distribuição da capacidade de processamento beneficiou e muito a implementação dos sistemas de controlo mais avançados, promovendo uma arquitectura descentralizada da inteligência do sistema, e assente em comunicação digital entre processadores. Desta forma

houve lugar à oportunidade para o desenvolvimento das redes de informação e protocolos de comunicação industriais. Os PLC mais modernos podem já trocar mensagens com as redes TCP/IP para um sistema de informação ou uma base de dados central hospedada num servidor. Em muitos casos realizam ainda as funções de concentrador de dados, garantindo assim que a informação não se perde.

A par dos PLC surgiram também os RTU (*Remote Terminal Units*) e os sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). O conceito de RTU é limitado à monitorização de processos, ou seja, realiza a aquisição de variáveis, digitaliza e serve o cliente da rede. O conceito de SCADA abrange a gestão de dados, armazenamento e consulta dos mesmos, e a interface de visualização e controlo geral – supervisão. Conceptualmente, o conjunto de pontos de processamento de informação (controlo distribuído pela área fabril e salas de controlo) designa-se por DCS (*Distributed Control System*). O DCS pode ser entendido como o sistema de monitorização e controlo de um processo fabril, ou em sentido mais lato, um sistema de gestão de um perímetro industrial, que reúne informação do estado da produção, da condição dos activos e da segurança na planta industrial, permitindo a supervisão e controlo de todos os processos, e facilitando ainda a realização de planeamentos de produção, bem como relatórios de estado e de progresso das inúmeras variáveis da fábrica.

O PLC potenciou a melhor organização e arquitectura de um sistema de medida e controlo industrial, permitindo, por um lado, a repartir as funções de um programa de controlo geral, por programas mais simples e distribuídos, por outro, potenciando a redução de cabos de sinal, através da criação de tecnologias de integração de comunicação entre dispositivos controladores, para dessa forma garantir a centralização da informação, essencial na gestão de todo o processo.

## 2.1. Redes “de campo”

As redes de campo [10] foram desenvolvidas para responder às necessidades de comunicação entre controladores digitais, e permitir a distribuição de inteligência até aos sensores e actuadores. O crescimento dos sistemas de automação e controlo industrial, depende da distribuição mais vasta do recurso ‘inteligência’ por todas as entidades do sistema. O crescimento pela via exclusiva do aumento dos recursos centrais será sempre um processo amortecido.

A transmissão de corrente é uma tecnologia bastante fiável, muito testada e bem consolidada na indústria. O par em tensão também é bastante usado, particularmente em conjunto com uma ponta de prova, que é colocada em pontos de difícil acesso. Em muitos sensores, mas particularmente em actuadores, as plantas industriais continuam a usar maioritariamente *loops* de corrente, devido à “instantânea” resposta ao comando. Assim, para que a implementação das redes de campo se tornasse efectiva, foi necessário criar os protocolos de comunicação sobre redes de campo, com características de tempo-real, ou seja, de garantir a entrega de mensagens e que esta entrega seja concretizada dentro de um prazo pré-definido e reconhecido por todas as entidades da rede. Estas redes são

caracterizadas por trocar pacotes curtos (dezenas de bytes), e por permitir a transmissão prioritária de sinalização de eventos ou mensagens de alarme.

A característica distintiva de cada tecnologia está essencialmente nas regras de acesso ao meio, camada 2 do modelo OSI para a construção de redes [11] [12]. Nesta secção são apresentadas as tecnologias com maior aplicabilidade em plantas industriais de processo. Os protocolos apresentados nesta secção são geridos por organizações independentes, constituídas pelos principais fabricantes dos instrumentos para processos industriais. Em cada uma das diferentes organizações participam todos os maiores fabricantes internacionais.

### 2.1.1. Métodos “Acesso ao Meio”

As redes de campo podem ser construídas numa lógica comando-resposta, onde cada nó é um servidor espera pela ordem do nó cliente (único) para lhe responder; ou numa lógica multiclente, onde cada nó tem a liberdade de aceder ao meio de acordo com as regras pré-definidas. O uso partilhado de um canal de comunicação não permite garantir a ausência de colisões entre mensagens [13], pelo que é fundamental criar regras que as minimizem.

As regras de acesso partilhado ao meio de comunicação seguem essencialmente dois tipos de métodos: a auscultação da portadora – *Carrier-Sense Multiple Access* (CSMA) ou a atribuição de tempo de oportunidade para transmitir – *Time Division Multiple Access* (TDMA). O primeiro método aplica-se a tráfego assíncrono e consiste na verificação do estado do canal, prévia à transmissão de mensagens, podendo um nó transmitir para a rede quando o canal se encontra livre. Em caso de conflito entre dois nós, aquele que perde a prioridade aguarda um tempo aleatório até voltar a avaliar a portadora. Diferentes protocolos implementam diferentes métodos de determinação da prioridade (ver 2.1.3). O segundo método aplica-se a tráfego síncrono, e cada nó tem uma oportunidade determinada pelo gestor da rede, durante a qual só este nó poderá transmitir à rede. A atribuição de oportunidade pode ser dada pelo coordenador do acesso ao meio, ou através da passagem de testemunho entre transmissores [14]. Este método promove a boa gestão em redes com muito tráfego de comunicações, permitindo uma maior exploração do volume de dados disponível para o canal. Por outro lado, e tal como acontece nos semáforos de sinalização rodoviária, em redes de baixo tráfego pode introduzir atrasos não necessários nas comunicações.

Sobre ambos os métodos, muitos protocolos especificam a oportunidade para o envio de eventos – mensagens assíncronas afectas a alarmes ou controlo prioritário. Nas redes baseadas em CSMA, em caso de colisão entre duas mensagens, todos os dispositivos transmissores esperam um tempo aleatório para voltar a tentar aceder ao meio, sendo que os mais prioritários têm um tempo menos de espera. Nas redes baseadas em TDMA, o evento é colocado fora da ordem, imediatamente a seguir à mensagem em curso. Nos protocolos com testemunho, o nó que quer transmitir um evento será o próximo a receber o testemunho, interrompendo a ordem na qual este estava a ser atribuído.

### 2.1.2. “Modbus”

O “Modbus” [15] [16] é uma tecnologia de rede baseada no modelo cliente-servidor [17], desenvolvida em 1979 pela Modicon (Estados Unidos da América) – hoje Schneider Electric (França) – para interligar os seus dispositivos baseados em controladores digitais – PLCs. O *standard* define a camada de aplicação, bem como as camadas de acesso ao meio e física: comunicação série sobre RS-232 ou RS-485 (e ainda RS-422) [18]. No início do século, o “Modbus” foi implementado também sobre redes TCP/IP [19], permitindo dessa forma uma maior integração no sistema geral de controlo de uma planta industrial, ou mesmo o acesso aos PLCs via Internet. Mais recentemente, e com o objectivo de reduzir custos de instalação em subsistemas, os RTUs foram capacitados de interfaces de rede sem fios (assunto discutido em 2.2). No exemplo [20] foi desenvolvida para este efeito um *gateway* “Modbus”-sem fios (IEEE 802.15.4).

A comunicação entre dois dispositivos é provocada por iniciativa do cliente, com a transmissão de uma mensagem de “*Request*”, à qual o servidor destinatário responde com uma mensagem do tipo “*Reply*”. No pacote de dados da mensagem seguem ainda o destinatário e o código da função, que indica quais as tarefas que o servidor irá executar para depois responder. Os dados necessários à execução da função seguem logo a seguir ao código da função, e a trama termina com o *checksum* – mecanismo para validação de recepção correcta da mensagem. O cliente pode ainda enviar uma mensagem a todos os destinatários – *broadcast* – mensagem esta que tem como objectivo a configuração de unidades remotas e à qual nenhum dispositivo servidor responde. A rede pode ter até 247 servidores (com endereços de 1 a 247), e um cliente. Os dispositivos “Modbus”, de acordo com a especificação para comunicação em série, têm obrigatoriamente disponíveis as taxas de transmissão de 9600 e 19200bps. Podem ainda disponibilizar outras taxas entre os 1200 e os 115200bps.

O “Modbus” é hoje uma tecnologia bastante presente na indústria de processo, mas também noutras áreas de engenharia como a ‘automóvel’ [21]. Com a grande popularidade do protocolo, existem até ferramentas que possibilitam a rápida construção do código e a gestão de versões do mesmo, bem como uma visão de alto-nível e modular da *stack*, como o Protégé [22]. A implementação de “Modbus” TCP e a sua aplicabilidade sobre a Internet trazem consigo maiores riscos de segurança da rede e do processo monitorizado, riscos que são estudados e solucionados em [23]. Também as redes sem fios de curto alcance introduzem vulnerabilidades no protocolo “Modbus”. No trabalho [24] são apresentadas 4 classes de intrusão e um sistema de detecção dos mesmos.

### 2.1.3. CAN

A tecnologia CAN (*Controller Area Network*) [25] [26] foi desenvolvida no seio da indústria automóvel, com o forte apoio da empresa alemã “Bosch” [27], com o objectivo de transferir dados entre dispositivos inteligentes – sensores e actuadores – de uma forma rápida e económica. A rede permite a qualquer dispositivo receber e transmitir mensagens sem depender da autorização de outros dispositivos hierarquicamente superiores. Caracteriza-se como protocolo robusto, dotado de capacidades de tempo-real, ou seja, com

a garantia da entrega de mensagens no destinatário, e dentro de um prazo curto, bem definido. Para garantir a fiabilidade, o protocolo implementa ainda prioridades nas mensagens, garantindo assim um tempo máximo para a transmissão destas. No acesso ao meio físico, o CAN implementa ainda o mecanismo de monitorização da portadora – CSMA/CD (*Collision Detection*) ou CSMA/CA (*Collision Avoidance*) [28]. Um dispositivo com mensagem para transmitir procede à verificação da ocupação do canal. Sempre que se encontrem dois dispositivos a tentar transmitir no mesmo período de verificação, tem prioridade aquele cujo identificador da mensagem seja de valor inferior. O outro nó aguarda um tempo aleatório para voltar a tentar usar o canal de comunicação. No método CSMA/CA, um nó transmissor só comunica quando confirma a ausência de comunicações no canal. Já no CSMA/CD, o transmissor procede à verificação de boa entrega bit a bit. Assim que é detectada uma colisão, o transmissor para imediatamente o seu processo para minimizar outras possíveis colisões de mensagens.

O CAN consegue taxas de transmissão até 1Mbps (em barramentos até 40m), ou barramentos até 1km (com taxa de transmissão limitada a cerca de 50kbps). As regras para a construção de redes CAN [29] definem ainda a relação comprimento-resistência característica, secção dos condutores e a resistência de terminação do barramento. Em barramento muito longos, a resistência característica ganha maior importância, em particular quando dois dispositivos em lados opostos pretendem transmitir para um dispositivo ao centro. Se os primeiros não se escutarem um ao outro, podem transmitir para o último ao mesmo tempo, e promover o choque de mensagens. Este erro é corrigido através de um método de confirmação de mensagem recebida, no qual o transmissor espera uma mensagem de confirmação de recepção por parte do destinatário – o *Acknowledgment*. A ausência da confirmação dentro de um prazo bem definido provoca a repetição da mensagem (*Automatic Repeat Query*) até um número limite definido de retransmissões.

O “CANopen” [30] é um protocolo de alto nível criado originalmente para sensores inteligentes em redes CAN, para permitir que estes troquem comandos e dados, independentemente, do dispositivo em si e do seu fabricante. O *standard* define perfis de comunicação e perfis de aplicação, sobre os quais podem ainda ser implementados os perfis do fabricante. O perfil de comunicação é comum a todos os dispositivos de uma rede e define os processos e os serviços de troca de mensagens na mesma. Em [31] pode encontrar-se uma lista de documentos – CiA séries 400 – de diferentes perfis de aplicação, específicos a diferentes situações de instrumentação e automação. Qualquer dispositivo que integre a rede é reconhecido através da sua folha de dados – *Electronic Data Sheet* (EDS) – que inclui as informações e funções específicas de um dispositivo), e pelo seu ficheiro de configuração – *Device Configuration File* (DCF) – onde vem indicado o endereço e a taxa de transmissão de dados (*baudrate*), ambos fornecidos pelo fabricante. Em [32] foi desenvolvido um sistema de controlo doméstico, baseado em sensores inteligentes, uns membros de redes CAN e outros membros de redes sem fios IEEE 802.15.4, integradas num só sistema através do protocolo “CANopen”. Para a gestão do sistema, o “CANopen” permitiu entender todos os dispositivos como membros, virtualizando tecnologias de medição, processamento e comunicação.



Com o objectivo de aumentar o desempenho do CAN, conseguindo sem erros uma maior exploração da largura de banda, endereçando aplicações críticas como o controlo automóvel, a CiA desenvolveu o “*Time-Triggered CAN*” [33], baseado no acesso ao meio por contagem de tempo [34]. Uma versão deste protocolo combinado com a possibilidade de ter tráfego assíncrono – eventos – garantindo isolamento temporal está apresentada em [35].

Para comunicação simples entre PLCs e RTUs, a CiA adoptou o “DeviceNet” [36]. Esta tecnologia (criada originalmente pela “Allen-Bradley” [37]) permite, sobre uma rede CAN, criar hierarquia entre os dispositivos, comunicar ponto-a-ponto e em lógica cliente-servidor. Uma vez bem aceite na comunidade industrial, o “DeviceNet” foi capacitado de mecanismos de segurança para permitir aplicações de emergência em automação [38], garantindo a conformidade com os *standards* SIL (*Safety Integrity Level classification*) [39] [40].

#### 2.1.4. “Profibus”

O “Profibus” (*Process Field Bus*) [41] é um conjunto de tecnologias orientadas para a interoperabilidade entre subsistemas de um processo industrial, e com garantias de operação em tempo-real. Originalmente desenvolvido pelo departamento de educação e investigação do governo alemão (em 1989) o *standard* define os mecanismos de acesso ao meio [42] e os perfis de aplicação [43]. Os suportes físicos seleccionados pela tecnologia foram inicialmente o RS-485 e a fibra óptica. Em nome da interoperabilidade, está hoje disponível para outras redes físicas, como o “Ethernet” [44] e as redes sem fios [45].

A tecnologia permite criar redes em árvore, com diferentes mecanismos de acesso ao meio: a passagem de testemunho entre dispositivos cliente (*Token-Passing*) [46] [47] [48]; e o protocolo cliente-servidor (também utilizado pelo “Modbus”). Assim, no mais alto nível é possível criar um anel de dispositivos cliente, todos com oportunidade para gerir as comunicações no anel durante um intervalo de tempo curto e bem definido, entre dois *tokens*. Este anel pode ainda ser duplo permitindo a redundância nas comunicações, para a esquerda ou para a direita (à semelhança do que se faz hoje com os anéis de fibra-óptica). Num segundo nível é possível coexistirem ambos os mecanismos – dois (ou mais) PLCs realizam a passagem de testemunho para que cada um controle as comunicações do barramento no seu intervalo de tempo; cada RTU assume a posição de servidor perante o PLC que em determinado instante é o cliente. O terceiro nível é o mais próximo do processo, cada RTU assume-se como cliente na sua relação com os instrumentos de monitorização e controlo do processo. Estes instrumentos são então servidores do RTU.

As comunicações do primeiro nível – especificadas como “Profibus FMS” (*Fieldbus Messaging System*) – têm maior largura de banda. Com a evolução do “Ethernet” e a sua entrada no meio industrial, o “Profibus FMS” (sobre RS-485 ou fibra-óptica) desapareceu, dando lugar ao Profinet [44] – “Profibus” sobre Etehrnet (usando a pilha protocolar TCP/IP). O segundo nível de comunicações é designado por “Profibus DP” (*Decentralized Periphery*), e o terceiro por “Profibus PA” (*Process Automation*). O “Profibus DP” tem uma largura de banda até aos 12Mbps, limitada pela distância do barramento. A 1,5Mbps, a extensão é limitada a 2km para redes RS-485, e a 21km para redes de fibra-óptica.

O “Profibus PA” foi projectado para alimentar os dispositivos de instrumentação, e caracteriza-se por ser orientado a aplicações distintas, por meio de perfis. Existem perfis para diferentes tipos de sensorização e controlo (incluindo o perfil para ambientes potencialmente explosivos) bem como perfis para integração de dispositivos “CANopen” ou HART (ver 2.1.5). Para aplicações mais críticas foram criados 2 perfis a gestão do tráfego prioritário [49].

A largura de banda máxima na camada PA é de 31,25kbps, pelo que o RTU – servidor da sub-rede DP e cliente da sub-rede PA, tem de realizar o ajuste à taxa de transmissão de dados. O *standard* define ainda um máximo de 24 equipamentos em cada segmento PA, um máximo de 96 RTUs com interface DP/PA por barramento DP, e 5 barramento DP por PLC, num total de 11.520 dispositivos por PLC.

### 2.1.5. HART

Como referido no início desta secção, a indústria possui em massa, sistemas de monitorização e controlo baseados em *loops* de corrente 4-20mA. A substituição destes cabos de sinal analógico por cabos de redes de campo é um processo longo e dispendioso. Uma vez que continuam a existir diferentes *standards* que oferecem melhor desempenho para cenários de aplicação distintos, a migração de cabos de sinal para cabos de rede não é também um caminho universal.

A tecnologia HART (*Highway Addressable Remote Transducer*), gerida pela HFC [50], foi desenvolvida para realizar comunicações entre dispositivos controladores e instrumentos dotados de inteligência, sobre os cabos de transmissão analógica já existentes. O protocolo, criado pela Rosemount [51], realiza a comunicação digital bidireccional em simultâneo com a transmissão de sinais analógicos no par de fios do cabo de instrumentação. Neste sistema, um instrumento inteligente continua a transmitir em corrente a informação de aplicações críticas, e sobre este sinal troca mensagens de reparametrização, calibração e diagnóstico do dispositivo, com o sistema de controlo. O protocolo HART implementa as camadas física [52], de acesso ao meio [53] e de aplicação [54] [55].

O sinal digital é codificado em frequência – FSK (*Frequency Shift Keying*) [56] segundo o modelo Bell 202 [57]. Sobre o sinal analógico que varia entre 4 e 20mA a uma frequência baixa (até 25Hz), são moduladas correntes a altas frequências de 2200Hz e de 1200Hz, que correspondem aos valores lógicos “0” e “1”. O sinal digital é transmitido sobre o sinal analógico com uma amplitude de 1mA pico-a-pico, a uma taxa de transmissão de 1200 bps. A especificação define ainda os limites máximos de ruído provocados a um sinal pelo outro, bem como a relação entre o comprimento do cabo, secção do mesmo, e a impedância do circuito. Para responder à necessidade de maior taxa de transmissão, o protocolo evoluiu da modulação em frequência para a modulação em fase. O C8PSK [58] (*Coherent 8 Phase Shift Keying*) estabelece 8 símbolos de 3 bits, correspondentes a 8 diferenças de fase do sinal a 3200Hz, sobre o valor da corrente. Esta alteração permite então uma taxa de transmissão de 9600 bps (8 vezes superior ao FSK) [59] [60].

No acesso ao meio, o HART funciona no modelo cliente-servidor. A comunicação é sempre iniciada pelo cliente (unidade que controla o meio), através de um comando. Os dispositivos de campo respondem a este comando. Uma rede HART pode funcionar em modo ponto-a-ponto, isto é com um nó controlador e um dispositivo HART servidor, ou em modo barramento com um máximo de 15 dispositivos servidores HART – *multidrop*. No primeiro modo o servidor toma o endereço “0”; no segundo modo, só existem comunicações em sinal digital, sendo que o controlador fixa a corrente a 4mA que serve para alimentar os dispositivos de campo, que tomam os endereços de “1” a “15”.

Existe ainda a possibilidade de existirem dois clientes na mesma rede HART, o primário – que controla o sistema em contínuo – e o secundário – unidade terminal que temporariamente se liga ao meio para obter dados dos instrumentos sensores e actuadores [61]. Neste figurino, o controlo do meio é realizado pelo cliente que está na posse do testemunho (à semelhança do que acontece no “Profibus”), e quando este recebe uma resposta de um nó servidor, aguarda um tempo pré-determinado dando a oportunidade ao outro nó cliente para controlar a rede. A temporização do acesso ao meio existe ainda quando o nó controlador parametriza um nó servidor para responder a um comando em modo “burst”. Neste modo, o servidor responde ao comando periodicamente sem que a comunicação seja iniciada por um cliente. Este modo usa-se, sobretudo, quando se pretende que 2 clientes possam realizar um diagnóstico a um instrumento de campo.

Existem 3 classes de comandos: universais [54]; prática comum [55]; e comandos específicos a um dispositivo. Os primeiros são os comandos de base do protocolo, essencialmente de leitura de variáveis e parâmetros de configuração. Os segundos dizem respeito a aplicações específicas, e que portanto não estão disponíveis em todos os dispositivos HART, mas são criados dentro do HART para permitir a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes. Os terceiros são comandos específicos criados por cada fabricante. Na possibilidade de existirem dois comandos específicos iguais de fabricantes diferentes, a HCF promove o encontro e a concertação para que estes migrem para a classe de prática comum. À semelhança do que acontece no “CANopen”, os comandos específicos de um dispositivo são interpretados pelo nó controlador através da leitura de uma folha de especificações do instrumento HART – *Device Descriptor* (DD). Este documento contém informação de outros atributos, modos de operação, comandos e parâmetros, que permitem ao nó controlador operar o instrumento, e é produzido pelo fabricante usando uma linguagem própria para este efeito, comum a outras tecnologias – a *Device Descriptor Language* (DDL).

Um exemplo de um transmissor HART para ligar a um transdutor genérico pode ser visto em [62]. As aplicações mais comuns com transmissores HART são as de monitorização de temperatura [63] e pressão [64] (são também as variáveis mais monitorizadas em meio industrial), bem como o posicionamento de válvulas [65].

#### 2.1.6. “Foundation Fieldbus”

A par dos protocolos já descritos nesta secção 2.1, muitos outros foram desenvolvidos por um fabricante ou grupo de fabricantes. O consórcio “Fieldbus Foundation” [66] surgiu

em 1994 da fusão entre dois consórcios – a Fundação “Interoperable Systems Project” (ISP) e o WorldFIP [67] [68], com o suporte do ISA [69] [70] e do IEC [71] [72], e o objectivo de fornecer às indústrias de processo um standard independente do fabricantes, com maiores funcionalidades, e tendo em conta os sistemas já existentes [73] [74]. O protocolo, designado por “Foundation Fieldbus” (FF) [75], foi projectado para operar desde os instrumentos de campo ao sistema de alto-nível de gestão de uma planta industrial. A comunicação entre os dispositivos FF é realizada de forma digital, unicamente, sobre os pares de instrumentação analógica já existentes, e com garantias de tempo-real.

O protocolo inclui uma especificação para a arquitectura de redes de controlo digital de dispositivos de campo – o H1; e uma especificação para a infra-estrutura de banda larga – o HSE, esqueleto do sistema de informação de todas as operações da planta industrial. O H1 suporta uma taxa de transmissão de 31,25kbps sobre um valor fixo de corrente num par de fios de instrumentação. A proximidade com o “Profibus” é evidente, já que ambos os protocolos usam o mesmo *standard* [42]. O HSE suporta as taxas de transmissão do “Ethernet” (100Mbps, 1Gbps). O FF chegou a especificar o H2, com taxas de transmissão de 1Mbps ou 2,5Mbps sobre fibra-óptica, deixando cair este mais tarde em favor do HSE.

O acesso meio é realizado de acordo com a oportunidade atribuída a cada nó, pelo nó que temporariamente controla o barramento – o *Link Active Scheduler* (LAS) [76]. Este nó pode permitir aos outros nós que enviem uma actualização do seu estado à rede, através de um comando próprio para esse efeito, endereçado a cada nó, um de cada vez. Neste caso, o nó que produz a informação responde ao comando, numa lógica de cliente-servidor. O LAS pode também entregar o testemunho a um outro nó da rede, por um tempo bem definido, para que este envie uma sequência de dados à rede. Findo o intervalo de tempo, o nó devolve o testemunho ao LAS. O LAS pode ainda definir numa lista o intervalo de tempo atribuído a cada nó, numa circulação completa de um anel de nós. Desta forma, cada nó tem oportunidade para gerir as suas comunicações no intervalo de tempo em que está na posse do testemunho; findo o seu tempo, passa o testemunho ao próximo, regressando à posse do LAS quando tiver circulado por todos os nós da rede. Para reduzir o atraso na transmissão de mensagens agendadas foi desenvolvido um mecanismo para gerir a passagem de testemunho [77]. O papel de LAS não tem de estar atribuído a um nó específico, podendo ser entregue a outro nó da rede, através de um comando próprio. Esta situação ocorre automaticamente quando ocorre uma falha na gestão do acesso ao meio. Em [78] são apresentadas algumas falhas típicas em redes FF, e discutidos alguns mecanismos de recuperação destas, que tornam o protocolo mais robusto.

A camada de aplicação do FF é projectada com objectos funcionais para potenciar diferentes perfis de operação. Cada dispositivo é programado com um dicionário de recursos – *Application Process Object* (APO) e com um conjunto de serviços de comunicação – *Application Services Entities* (ASE), criando assim aplicativos diferentes para diferentes cenários de instrumentação. Os dispositivos FF têm dois bancos de memória para poderem ser actualizados centralmente, e arrancarem remotamente com o novo *firmware*. São exemplos de perfis específicos: os terminais de mão, para calibração e reparametrização de instrumentos; ou os instrumentos de operação intrinsecamente segura, para aplicação em ambientes potencialmente explosivos. Na memória do dispositivo está ainda a sua folha

electrónica de informação – *device descriptor* (DD), garantindo assim a interoperabilidade com qualquer sistema de informação.

O “Foundation's Remote Operations Management” (ROM) é um ambiente de supervisão da informação – o SCADA da Foundation. Para além dos dispositivos FF, e através de RTUs próprias com o HSE, consegue gerir a informação proveniente de dispositivos HART e outros sistemas de monitorização e controlo de diferentes fabricantes.

### 2.1.7. Redes de Campo e “Ethernet” – Discussão

As redes de campo surgiram, em cada fabricante de instrumentos industriais, para permitir à indústria, particularmente a de processo, um melhor e mais alargado serviço de monitorização e controlo, com custos reduzidos face aos sinais analógicos. Em nome de uma futura interoperabilidade, os protocolos mais influentes tornaram-se instituições, cada uma delas participada por muitos fabricantes multinacionais, mas independentes dos mesmos.

A monitorização contínua da condição de activos ou processos não exige, na maioria dos casos, a entrega imediata de mensagens. Já na transmissão de eventos de alarme, mas sobretudo nas ordens transmitidas a actuadores, é fundamental que estas redes garantam a entrega de mensagens dentro do prazo limitado e bem definido. O acesso ao meio por auscultação da portadora garante a não colisão de mensagens, não exige a complexidade do sincronismo e consegue responder de forma eficaz à necessidade de tempo-real, usando mecanismos expeditos de gestão de prioridades. Mas o acesso ao meio por atribuição de tempo de antena é sempre escolhido para as aplicações mais críticas, particularmente quando ocorre a necessidade da maior exploração da largura de banda disponível, porque só este método garante o cumprimento da latência máxima pré-acordada, permitida à rede no acto da comunicação.

Com a crescente evolução dos sistemas de monitorização e controlo, isto é, com cada vez mais dispositivos sensores e actuadores em processos industriais – mais informação, os protocolos de redes de campo foram experimentando a sua implementação sobre tecnologias de maior largura de banda, particularmente as redes “Ethernet” [79]. Estas redes tornaram-se universais devido à maior largura de banda, comunicação bidireccional simultânea (*full duplex*) e à sua economia de escala (em escritórios e habitações) que a tornou de baixo custo. Para o controlo de processos industriais, estas redes apresentam algumas limitações – a insuficiente imunidade ao ruído, conectores pouco robustos, e sobretudo as colisões frequentes entre mensagens e a ausência de garantias de tempo-real. O esforço realizado para criar estes mecanismos foi especificado pelo IEC como “Real-Time Ethernet” (RTE) [80], mas deste desenvolvimento resultaram inúmeros perfis de RTE baseados, cada um deles na implementação dos protocolos de tempo-real sobre Ethernet, e sem compatibilidade entre os mesmos [81]. Em [82] são comparados 3 perfis de RTE. As limitações específicas do “Ethernet” original são exploradas em [83], onde se apresentam também novos mecanismos para as solucionar. Em [84] é proposto um protocolo que substitui as camadas TCP/IP para melhorar o desempenho da RTE.

## 2.2. Redes de instrumentos sem fios

Se as redes de campo encontram dificuldades em competir com sinais analógicos, particularmente na fiabilidade e garantia de tempo-real, introduzir redes sem fios sobre redes de campo, ou simplesmente criar redes de monitorização e controlo industrial sobre canais de radiofrequência, são desafios ainda maiores [85]. As vantagens são claras: a redução de custos de instalação; a redução dos tempos de instalação e manutenção; a maior oportunidade de colocar inteligência em locais inóspitos à passagem de cabos (partes em movimento, partes electricamente isoladas, entre outras); e a possibilidade de mover os instrumentos de umas áreas para outras. A desvantagem está no enorme compromisso que é necessário gerir, dimensionando correctamente as funcionalidades-chave e a autonomia de um nó, assegurando a fiabilidade e segurança, conseguindo então tornar viáveis estas redes – hoje frágeis em ambientes tão exigentes. Em [86] são discutidas as fragilidades dos canais rádio, e apresentadas técnicas fundamentais de gestão de redes sem fios, criadas no âmbito das normas IEEE 802.11 [87] (especificação de referência às redes sem fios de banda larga) e IEEE 802.15.4 [88] (especificação de referência às redes locais de baixa potência e baixos débitos de informação).

O acesso ao meio é um processo da maior importância e do qual decorre a capacidade de exploração da largura de banda. Aplicações de monitorização de condições e sinalização de estados fora de parâmetros exploram parcelas pouco significativas da largura de banda de uma rede, razão pela qual o CSMA é amplamente utilizado. Pelo contrário, aplicações de diagnóstico mais complexo, a realizar em PC ou máquinas equivalentes, podem necessitar de um volume de dados da rede de sensores cuja exploração da largura de banda não seja comportada pelo CSMA. Alguns novos desenvolvimentos sobre o CSMA propõem controlar a aleatoriedade dos tempos de guarda e atribuir maior prioridade aos nós que transmitem mais vezes, de modo a otimizar o desempenho das redes que operam com CSMA [89].

Com o objectivo de maximizar a exploração da largura de banda de redes sobre o IEEE 802.15.4, a “Dust Networks” [90] (hoje “Linear Technologies”) criou um protocolo baseado em acesso multiplexado no tempo e no uso aleatório de diferentes canais rádio – o TSMP [91] (*Time Synchronization Mesh Protocol*). Este protocolo define como “célula” uma oportunidade no espaço-tempo (o par canal de frequência, intervalo de tempo) para se realizar uma transmissão, implicando a sincronização dos nós da rede. A necessidade de muitos dados em redes de baixa potência, bem como a solução TSMP, foram posteriormente validadas pela comunidade científica, dando origem à adenda IEEE 802.15.4e:2012 [92] sob o nome de *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH) [93].

### 2.2.1. Factores Fundamentais

Nesta secção são discutidos 4 factores que definem uma rede de instrumentos sem fios: a autonomia dos dispositivos, a fiabilidade dos mesmos e da rede, a segurança nas comunicações e a topologia da rede.

### 2.2.1.1. Autonomia

A par da garantia de resposta imediata, a autonomia é a outra razão que na grande maioria das aplicações limita as redes sem fios a redes de sensores, ou a redes híbridas – redes onde o dispositivo comunica através de uma antena, mas é alimentado por um par de fios, através de uma fonte do sector. A forte limitação de operação de um dispositivo, afecta à exclusiva alimentação por baterias, pode ser minimizada através do compromisso entre a implementação de uma electrónica de muito baixo consumo, da construção de um *firmware* eficiente e da escolha de baterias eficientes; ou pode mesmo ser anulada através da implementação de soluções de captura de energia do meio envolvente, e do armazenamento rápido e eficiente em supercondensadores, contando sempre com projectos de electrónica e de *firmware* otimizados para o muito baixo consumo.

A autonomia assume também um papel de fronteira entre o controlo e a monitorização, entre os conceitos de tempo-real e de tempo útil, entre o acesso ao meio por atribuição de tempo síncrono ou por auscultação da portadora. O primeiro exige que um nó esteja activo na rede por um tempo suficiente para acompanhar as passagens de testemunho, com consequências directas na autonomia energética do próprio nó; o segundo permite que o nó possa ter o rádio desligado durante intervalos de tempo francamente maiores que aqueles em que está ligado, aumentando em anos a autonomia do nó, e muitas vezes determinando assim a viabilização da implementação da rede sem fios em meios industriais.

Em [94] são apresentados os grandes desafios das redes de instrumentos inteligentes sem fios, e os principais requisitos que uma boa solução terá de contemplar. Ainda assim, o artigo está muito focado na lógica cliente-servidor, onde um nó central solicita um servidor sem fios, lógica que oferece o melhor desempenho para uma exploração maior da largura de banda possível, mas que não permite a mais eficiente gestão de recursos energéticos – gestão essa que exige do dispositivo (sensor) a autonomia para medir em contínuo e comunicar quando o próprio entende, uma vez que é dotado de inteligência.

### 2.2.1.2. Fiabilidade

Os ambientes industriais caracterizam-se por ser densamente povoados por máquinas e estruturas metálicas, bem como outros activos e estruturas de menor reflectividade. Todos estes obstáculos vão reflectir, bloquear ou atenuar os sinais transmitidos. Outras variáveis que afectam o sinal são a relação de distância entre antenas e a distância das mesmas à Terra (elemento reflector), a humidade (atenuante da intensidade de sinal) ou as interferências com outros sistemas de rádio que possam coexistir na mesma banda de frequência [95].

As reflexões de sinais provocam a sobreposição dos mesmos na antena do receptor. A interferência por sobreposição de sinais reflectidos em obstáculos aleatórios é, com muito maior probabilidade, destrutiva, provocando assim uma maior atenuação do sinal na recepção além da inerente à distância de transmissão. A par da atenuação, o sinal pode ainda sofrer alterações de fase e originar bits trocados na construção da mensagem, efeitos que cumulativos criam atraso na recepção ou perda de mensagens.

Para garantir a integridade de uma mensagem, os transceptores terão também de implementar técnicas que acrescentem robustez à transmissão da mesma, permitindo ao receptor a interpretação correcta desta, mesmo que o sinal recebido não seja perfeito. Uma vez interpretada a mensagem, o nó pode ainda realizar processos de validação da mesma, e caso esta não seja válida o emissor repete a mensagem, à semelhança do que já acontece nas redes de campo.

A modulação de sinal pode ser entendida como um processo de encriptação espectral. A forma mais simples é a codificação dos bits “0” e “1” em diferentes frequências (FSK [56]; GFSK [96] – *Gaussian FSK*). Com estas técnicas, o receptor decompõe o sinal recebido nas duas frequências pré-definidas e obtém o pacote binário de informação. No sentido de aumentar a largura de banda, sem reduzir o tempo de guarda entre mensagens, algumas técnicas fazem agregar bits em símbolos e procedem à transmissão destes em mais frequências. O 4GFSK [97] cria 4 símbolos de bits ( $2^2$ ) afectando uma frequência diferente a cada símbolo. O receptor desmodula então o sinal nas 4 frequências para obter os pares de bits e construir dessa forma o pacote de dados. Técnicas mais robustas implementam símbolos por fase. Em 2.1.5 foi referido o C8PSK [58] (*Coherent 8 Phase Shift Keying*), técnica que usa símbolos de 3 bits sobre uma frequência, conseguindo assim obter uma taxa de transmissão 8 vezes superior ao simples FSK.

O espalhamento espectral [98] [99] permite às redes a melhor gestão do uso de um meio físico partilhado por outras redes ou fontes de sinal. As redes baseadas no *standard* IEEE 802.15.4 [88] (ver 2.2.2), procedem à desmultiplicação de um símbolo de 4 bits numa cadeia de 32 chips – também lógicos binários. A cada um dos 16 símbolos ( $2^4$ ) corresponde uma cadeia denominada por sequências PN (*quasi orthogonal Pseudo-random Noise sequences*). Com esta codificação, os rádios fazem usar uma maior largura de banda, praticando uma taxa de transmissão de um chip superior à taxa de transmissão de um bit, na razão da desmultiplicação, mantendo a densidade de potência espectral – técnica de espalhamento espectral designada por DSSS (*direct-sequence spread spectrum*) [100]. No processo de envio de cada sequência, os 32 chips são separados em pares e ímpares e transmitidos sequencialmente com uma diferença de fase de  $\pi/2$  – os pares em fase e os ímpares desviados de um quadrante – modulação denominada por *Offset-Quadrature Phase Shift Keying* (O-QPSK) [101]. O receptor descodifica o sinal através do conhecimento prévio das sequências PN da sua rede, sendo capaz de despistar alguns chips trocados por reflexões ou ruído que ocupem o canal no mesmo instante, garantindo desta forma a robustez da comunicação.

O DSSS permite então outra forma de acesso ao meio, não mencionada até este ponto, o múltiplo acesso por códigos de espalhamento – CDMA (*code division multiple access*) [102]. Ao contrário do CSMA e do TDMA onde o resultado é a atribuição da oportunidade de transmissão, o CDMA serve o propósito de coexistência de mensagens no mesmo canal de transmissão – técnica usada nas redes públicas móveis. Através do uso de códigos ortogonais e sincronismo da rede, os pares emissor-receptor podem partilhar o canal em simultâneo, conseguindo cada receptor descodificar a sua mensagem.



Redes de maior largura de banda, como as baseadas em IEEE 802.11, podem optar por usar o meio com DSSS ou por divisão do canal de comunicação em bandas ortogonais de frequência muito estreita – OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) [103]. No OFDM, os símbolos são transportados em simultâneo por diferentes sub-canais, codificando um símbolo por fase. Esta técnica possibilita uma maior largura de banda sem aumentar a taxa de transmissão dos símbolos, e desta forma, sem reduzir a robustez da comunicação. A combinação do DSSS com o OFDM é desaconselhada na versão de 2012 do *standard* [87].

O FHSS [104] [105] (*frequency hopping spread spectrum*) é uma técnica de espalhamento espectral que consiste em enviar blocos de informação em canais diferentes, de forma sequencial na informação e aleatória na selecção do próximo canal (com código de sequência partilhado entre o emissor e o receptor), conseguindo assim reduzir as interferências por coexistência na banda RF bem como os efeitos negativos das reflexões, diminuindo assim o congestionamento da rede e minimizando a perda de pacotes. Esta técnica implica sincronismo entre os nós da rede e pode ser implementada de diferentes formas: orientada a intervalos de tempo (curtos) – em que os diferentes pacotes de dados de uma transferência de informação são transmitidos em canais diferentes – ou orientada a transferências de informação – mantendo o canal de transmissão por um período mais longo, permitindo que um conjunto de informação de tamanho pré-definido seja transmitido integralmente num só canal. A técnica possibilita ainda a realização da análise de desempenho de comunicações em cada canal, a partir da qual alguns podem ser desativados por falta de fiabilidade sobre os mesmos – *blacklisting*.

### 2.2.1.3. Segurança

Em consonância com os novos desafios de fiabilidade que o meio partilhado trouxe às redes de comunicação, as redes sem fios são também mais vulneráveis a possíveis ataques maliciosos. Um nó malicioso ao alcance rádio de uma rede sem fios pode escutar o meio e registar dados importantes que sejam transmitidos em formato não encriptado, ou mesmo descriptar mensagens e obter o conteúdo das mesmas – escuta sem consentimento. Esta técnica, conhecida por *eavesdropping*, conduz à quebra de confidencialidade. O nó malicioso pode ainda alcançar as chaves de encriptação para poder transmitir à rede mensagens falsas – comumente designado por “injecção de mensagens”. Os ataques mais comuns às redes de sensores e actuadores sem fios são bem descritos e explicados em [106] e [107].

A segurança das comunicações assenta essencialmente em três pilares: a confidencialidade da mensagem – conseguida através de algoritmos de encriptação da mesma e garantindo que só o nó receptor tem a capacidade de interpretar os conteúdos confidenciais que a integram; a integridade do seu conteúdo – garantia de que o conteúdo de cada mensagem não foi corrompido (alterado, parcialmente apagado ou acrescentado); e a autenticação do emissor – garantia de que a mensagem recebida vem da origem autêntica e não de uma origem falsa.

A integridade das mensagens e a autenticação dos transmissores é fundamental para conseguir a garantia do não-repúdio, ou seja, de poder responsabilizar os nós transmissores pela informação contida nas suas mensagens, quando estas são avaliadas como genuínas. Os

mecanismos de espalhamento espectral (referidos em 2.2.1.2) conseguem dar boas garantias de imunidade a possíveis ataques à integridade dos conteúdos. Já a autenticidade pode ser verificada através de assinaturas digitais ou de chaves de encriptação de mensagens.

A segurança de uma rede sem fios tem de ser considerada a todos os níveis da rede. Para além dos ataques já mencionados, as redes sem fios podem ser alvo de problemas no reencaminhamento de mensagens, por via de nós que se recusem a retransmitir ou que gerem falsas confirmações de receção, bem como de falso congestionamento do meio de transmissão e consequente quebra de serviço (manobra criada através da injeção de mensagens aleatórias com o único intuito de ocupar o meio). Em [95] foi demonstrada a quebra de serviço de uma rede IEEE 802.15.4 usando um gerador de sinais microondas.

A necessidade da encriptação de mensagens torna-se assim maior do que até então (redes de campo), ao mesmo tempo que os recursos, particularmente os energéticos, obrigam à minimização do processamento interno do instrumento sem fios, promovendo algoritmos de encriptação mais simples (e portanto menos seguros) e abrindo um campo de investigação novo – a criação de algoritmos de encriptação mais robustos para redes de baixo consumo [108].

Os métodos de encriptação dividem-se essencialmente em dois grupos, encriptação simétrica (ou criptografia de chave secreta) e assimétrica (ou criptografia de chave pública). A lógica da encriptação simétrica está no uso de uma chave privada para realizar os processos encriptação e a desencriptação. Esta chave (ou par de chaves simétricas) é conhecida pelo par emissor-receptor e pode ser obtida através de um centro de confiança – o coordenador de segurança da rede. Os algoritmos de encriptação simétrica são mais rápidos de executar mas também mais fáceis de decifrar, motivo pelo qual diferentes métodos fazem renovar as chaves com alguma periodicidade. A renovação de chaves, ainda assim, é um processo complexo e que exige bons recursos de processamento [109].

O AES (*advanced encryption standard*) [110] [111] é um dos métodos de encriptação simétrica mais conhecidos e recomendados em diferentes redes sem fios, em particular nas redes baseadas no *standard* IEEE 802.15.4 [88]. A encriptação de uma mensagem é realizada através da manipulação de matrizes compostas pelos primeiros bits da mensagem (128, 192 ou 256), e a desencriptação consegue-se pela manipulação inversa. Em [110] são apresentados 7 modos de operação diferentes do AES, que garantem de forma diferente a confidencialidade e a integridade da mensagem, e é defendido um método robusto para a renovação periódica da chave. Em [112] é descrito um método de verificação de mensagens, baseado em AES combinando códigos de autenticação de mensagem e assinatura digital.

A encriptação assimétrica usa duas chaves, uma pública e uma privada, ambas relacionadas por números aleatórios os quais estão na origem de ambas as chaves. A comunicação é realizada da seguinte forma segura: o transmissor autentica-se (estabelece uma sessão) com a sua chave privada, e encripta mensagens com a chave pública do receptor; este por sua vez verifica a autenticidade do emissor através da chave pública daquele, e desencripta as mensagens recebidas com a sua chave privada.

O RSA [113] (sigla composta pelas iniciais dos autores Rivest, Shamir e Adleman) é um método de criptografia assimétrica, com um algoritmo baseado em operações logarítmicas com números primos grandes, tornando assim bastante morosa e complexa a violação do mesmo. Porque envolve cálculos de maior complexidade, a sua implementação em microcontroladores de recursos limitados como os que constituem as redes sem fios de baixo consumo é menos usada em [114] e [115]. Em [116] é apresentado um método estatístico para a realização aproximada do RSA, envolvendo uma menor complexidade de processamento, por forma a possibilitar a sua utilização em microcontroladores. Em [114] e [117] são estudadas diferentes formas de factorizar o produto de números primos grandes, num controlador FPGA de 200MHz e num computador molecular, respectivamente.

O ECC (*elliptical curve cryptography*) [118] tem uma lógica semelhante ao RSA, mas utiliza equações de curvas elípticas mais morosas de decifrar, permitindo assim atingir o mesmo nível de segurança daquele com chaves bastante mais pequenas [119]. O ECC é então um método assimétrico que exige menos recursos de computação que o RSA, o que o torna mais interessante, em particular para as redes de baixo consumo. O ECC é utilizado em redes de sensores sem fios, de forma híbrida com o AES, procurando a maior robustez do mecanismo de segurança, sem tornar pesado o seu processamento [120] [121].

No IBE (*identity-based encryption*) [122] a chave pública de cada nó está directamente relacionada com o seu ID na rede, e a chave privada para a descriptação é obtida, em cada sessão, a partir um servidor de chaves [123], também designado por PKG (*private key generator*) [124]. Este método faz dispensar a necessidade de memória para muitas chaves públicas – designada por PKI (de *public key infrastructure*) – que os métodos anteriores exigem a cada nó.

#### 2.2.1.4. Arquitectura

A rede de comunicação de instrumentos industriais tem de ser robusta, sob pena de pôr em causa o normal funcionamento de um processo, bem como a segurança das pessoas presentes nesse perímetro. A capacidade de reorganização da rede sem fios é por isso vital importância neste quadro de desafios. Quando um nó de uma rede perde a conectividade com a mesma, seja por interferências electromagnéticas, por bloqueio da linha-de-vista, ou por falta de autonomia, a rede terá de se reorganizar de modo a não permitir a desagregação de nós (ou de ilhas de nós) do sistema geral de informação. Para tal, as redes *standard* apresentadas nesta secção, apresentam para os nós permanentemente activos, a capacidade de poder comunicar com qualquer nó – topologia ponto-a-ponto – e de reajustar as suas tabelas de reencaminhamento de mensagens – topologia de rede emalhada. Desta forma, as comunicações veiculadas por um qualquer nó podem a determinado momento seguir outro percurso do emissor ao destinatário. Esta situação pode ocorrer quando um nó repetidor se desliga da rede, ou mesmo quando a intensidade de sinal entre um emissor e um repetidor diminui face a um percurso alternativo. A gestão dos percursos das mensagens é realizada pelo elemento gestor (também designado por coordenador) de rede, responsabilidade que na maioria das redes sem fios é assumida pelo *gateway* que serve a rede sem fios local e a rede de banda larga, esqueleto do sistema de informação.

As redes sem fios podem ser criadas de uma forma mais simples e menos dinâmica, através de tabelas de reencaminhamento não reconfiguráveis – topologia de rede em árvore. A vantagem desta topologia prende-se com o menor cálculo afecto ao nó repetidor e o conseqüente menor consumo de energia. Ainda assim, quando um nó repetidor se perde, seja por bloqueio do *firmware*, seja por falta de autonomia energética, todos os dispositivos da rede veiculados por este nó perdem a conectividade com o sistema de informação. Este risco pode ser mitigado com a duplicação de nós repetidores, criando assim a necessária redundância. Redes mais simples podem ser construídas sem nós repetidores, onde portanto cada nó comunica directamente com o controlador da rede – topologia de rede em estrela.

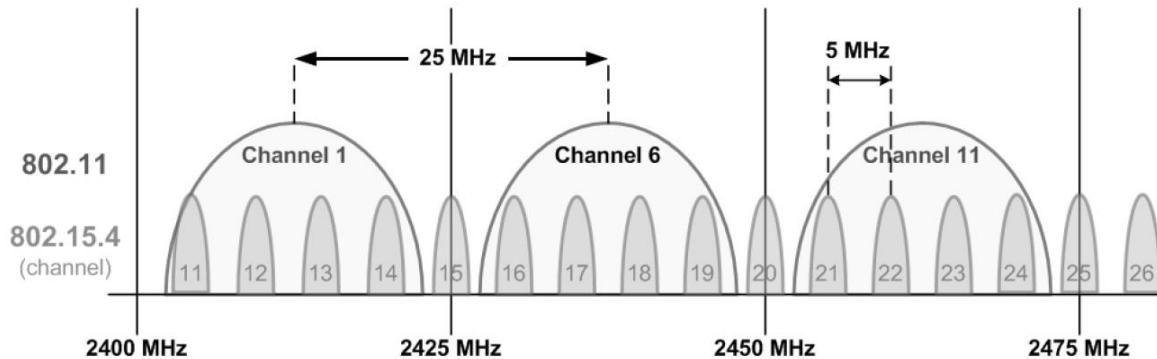
### 2.2.2. A plataforma IEEE 802.15.4

Publicado a primeira vez em 2003 e amplamente revisto em 2006, o *standard* IEEE 802.15.4 [88] especifica as 2 camadas da base do modelo OSI [125] – PHY e MAC – com o objectivo de ser a norma para redes de dispositivos sem fios – sensores e controladores. O *standard* especifica as modulações rádio e as técnicas de uso espectral para as bandas ISM 868/915MHz e 2,4GHz (ver 2.2.1.2); as regras de acesso ao meio e as topologias de rede; bem como recomenda o uso de chaves simétricas AES-128 como mecanismo de segurança. São definidos 27 canais rádio: 16 de 250kbps na banda ISM 2,400-2,483 GHz, 10 de 40kbps na banda ISM 902-928MHz e um de 20 kbps na banda ISM 868,0-868,6MHz. Opcionalmente, os canais sub-GHz podem operar a 100kbps ou a 250kbps [126]. Em 2009 foram consideradas novas camadas físicas de suporte às bandas de frequência ISM para a China e para o Japão, dando origem em 2011 à mais recente revisão do *standard* [127].

A banda ISM 2,4GHz é a mais usada pelos *standards* de redes sem fios, de curto alcance e de muito baixo consumo, doravante denominadas por WPAN (de *Wireless Personal Area Network*), não só por ter mais canais (possibilitando a implementação de mecanismos de maior robustez – ver 2.2.1.2), mas essencialmente porque é de uso livre em todo o mundo. Uma vez adoptada como “banda *standard*” para várias tecnologias WPAN, a coexistência de tecnologias no mesmo espaço físico (figura 1) obriga ao uso de técnicas de avaliação contínua e selecção dinâmica do canal RF.

O acesso ao meio é especificado em dois modos: sinalizado (*beaconed*) e não sinalizado (*non-beaconed*). Em ambos os casos o primeiro passo é a avaliação da energia do canal de comunicação – processo designado por CCA (dos termos *Clear Channel Assessment*). No modo não sinalizado, todos os membros da rede concorrem ao meio por CSMA/CA (*Collision Avoidance*), ou seja, quando um membro tenta aceder ao meio por CSMA e verifica a ocupação da portadora, aguarda um tempo aleatório – *backoff period* – até realizar nova tentativa de acesso. Dois dispositivos que tentem aceder ao meio ao mesmo tempo esperam tempos (estatisticamente) diferentes para voltar a tentar aceder ao canal, evitando a colisão. No modo sinalizado, o coordenador da rede define ciclos de transmissão (designados por *superframes*) compostos por 16 oportunidades de tempo (*slots*). O primeiro tempo é ocupado pela sinalização de início de ciclo (o *beacon*), onde é comunicada também a duração das oportunidades. O coordenador pode ainda definir (no *beacon*)

tempos de oportunidade dedicada a determinado serviço ou dispositivo mais prioritário (*guaranteed time slot* - GTS). Nos tempos não dedicados, o acesso é realizado de forma concorrente (*contention access period* - CAP) por CSMA/CA.



**Figura 1: Canais dos *standards* IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, na banda ISM 2,4GHz. Fonte: [128].**

Para garantir a entrega de mensagens, o protocolo implementa um mecanismo de resposta imediata de confirmação da recepção da mesma – o *Acknowledgement* (explicado em 2.1.3). As mensagens de confirmação de recepção ou de sinalização de ciclo são transmitidas sem verificação da portadora. Dentro das características do *standard* estão as capacidades da rede se auto-organizar e de se readaptar. Os dispositivos são especificados como: a) de funcionalidades plenas (FFD de *full function device*); e b) de funcionalidades reduzidas (RFD de *reduced function device*). Os FFD podem comunicar com todos os membros da rede enquanto os RFD só o fazem com os FFD. O dispositivo que cria a rede – obrigatoriamente um FFD – designa-se por coordenador. Este dispositivo controla também a participação de outros dispositivos na rede. Os próximos FFD a ligarem-se à rede têm a capacidade de reencaminhar mensagens de uns nós para outros, permitindo assim a comunicação entre dois nós fora do alcance um do outro. Estes dispositivos – repetidores – mantêm listas de reencaminhamento, geridas entre os FFD, que definem o melhor caminho de cada mensagem dentro da rede, otimizando também o tempo de transmissão desta. Na ausência de um coordenador no canal de operação de um dispositivo, um FFD configurado como Repetidor pode autoconfigurar-se como coordenador da rede.

Os protocolos industriais mais relevantes, construídos sobre este *standard*, gerem as listas de reencaminhamento de forma dinâmica, isto é, quando um nó repetidor perde conectividade com um membro da sua lista de reencaminhamento, a rede readapta-se para garantir as necessárias vias de comunicação entre emissores e receptores – rede emalhada.

Este *standard* teve alterações em 2012, com destaque para a já referida introdução do TSCH [92] – adenda 802.15.4e; e para a introdução de uma nova camada física de suporte à identificação por rádio frequência (RFID, dos termos em inglês *radio frequency identification*) activo e à localização, na banda ISM 433MHz [129] – adenda 802.15.4f. Por forma a dar suporte aos novos desenvolvimentos no domínio das redes inteligentes de

medida de consumos (descritas em 2.2.3) foi ainda publicada a adenda 802.15.4g [130] [131]. Em 2013, uma nova adenda ao *standard* focada nas redes de monitorização crítica e de baixo consumo – 802.15.4k [132] [133], fez introduzir a possibilidade de um evento crítico ter acesso prioritário ao meio – PCA (dos termos em inglês *priority channel access*) – dentro de uma rede com acesso não sinalizado.

### 2.2.3. ZigBee

O ZigBee [134] é uma das mais relevantes tecnologias de comunicação construídas sobre o IEEE 802.15.4. Na sua pilha protocolar – ver figura 2 – são especificadas as camadas de Rede, Segurança e Aplicação de um protocolo de redes sem fios, de curto alcance e de muito baixo consumo, projectado para mercados de grande consumo, como a domótica ou a medição de consumos, sendo portanto um dos protocolos com maior disseminação, no domínio das WPAN.

Os dispositivos associam-se à rede existente por ligação directa ao coordenador ou a um repetidor mais próximo de si, e cada nó repetidor guarda em si a sua tabela de reencaminhamento de acordo com a associação à rede. As rotas ficam então estabelecidas e permanecem as mesmas até necessidade contrária. Só em caso de quebra de conectividade detectada (por presença de obstáculos, falta de energia ou bloqueio do nó repetidor, etc.) é que a rede procura novos caminhos, optando por estabelecer novas ligações em função da maior probabilidade da entrega de pacotes, procedendo de imediato à gravação das novas rotas. Esta gestão do reencaminhamento designa-se por *Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing*.

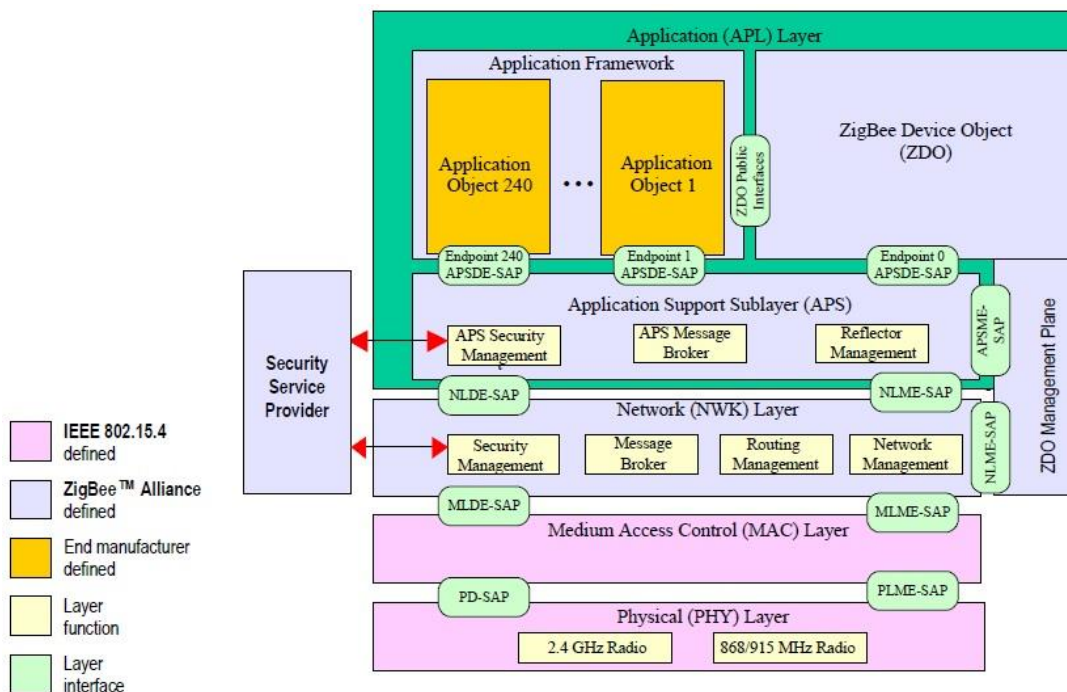


Figura 2: Pilha protocolar do ZigBee. Fonte: [134].

O ZigBee faz uso dos mecanismos de autenticação e encriptação por chaves simétricas AES-128 suportados pelo IEEE 802.15.4, e estende a segurança às camadas de rede e de aplicação. As comunicações podem ser efectuadas com maior ou menor nível de segurança, em função do seu carácter e da chave que a protege. A tecnologia promove três tipos de chave: a do coordenador, a de rede e a de aplicação (*master key*, *network key* e *link key*, respectivamente). A chave de rede é partilhada por todos os membros da rede e portanto confere menor segurança. A chave de aplicação é privada a dois dispositivos que comunicam em sessão privada, e é atribuída pelo centro de confiança (o coordenador ou um membro por este designado). A chave do coordenador é necessária para a associação à rede.

Desenvolvida pela ZigBee Alliance [135], a tecnologia apresenta-se de forma modular com especificações de diferente complexidade, sobre as quais se desenvolvem diferentes perfis de aplicação, conseguindo assim a interoperabilidade entre diferentes fabricantes, para determinado mercado. Cada par especificação-perfil – ver figura 3 – assume mecanismos próprios de segurança das comunicações, comportamentos de rede, e entendimento protocolar. Os diferentes perfis garantem ainda espaço para um fabricante poder incluir funções afectas a produtos de nicho, na maioria dos casos não acessíveis por produtos de outros fabricantes a operar no mesmo perfil.

O *ZigBee Smart Energy* [136] – perfil ZigBee para a gestão dos consumos de energia – perspectiva servir habitações e fornecedores de energia, operando dispositivos de medida de consumos parciais dentro de casas e comunicação a uma plataforma de acesso exclusivo ao consumidor, bem como de medida geral de cada habitação e comunicação da mesma ao fornecedor. Trata-se de um dos perfis mais desenvolvidos e implementados [137] [138] dada a importância que a eficiência energética ganhou na última década. Os critérios de segurança da rede sem fios ganham uma outra dimensão dada a partilha da infraestrutura de rede com o fornecedor do serviço de energia. O *Smart Energy* permite o uso de vários mecanismos de segurança, simétricos e públicos, entre os quais o AES-128 e o ECC – opções que se encontram bem discutidas em [109].

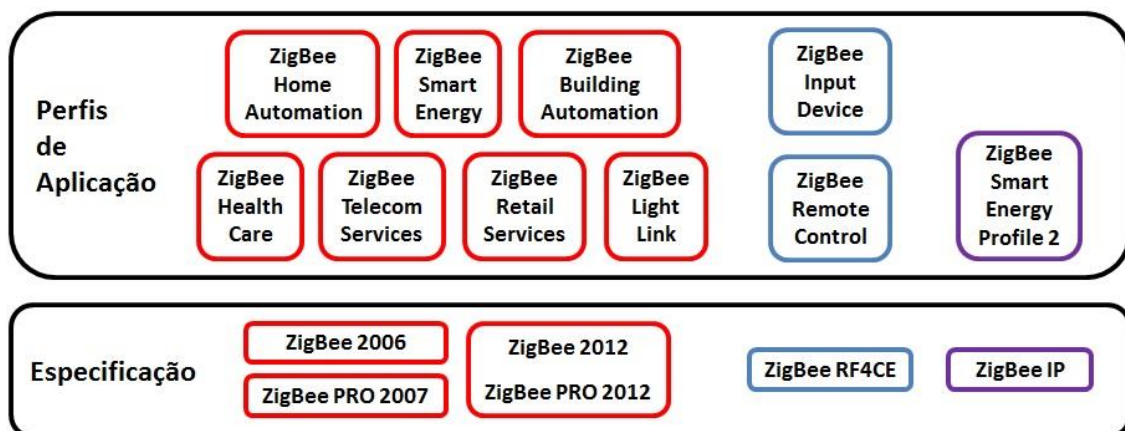


Figura 3: Módulos estruturantes da pilha protocolar do ZigBee.

As especificações ZigBee mais desenvolvidas (apresentadas a vermelho na figura 3) suportam a grande maioria dos perfis de aplicação. Estas especificações compreendem duas tecnologias – a ZigBee e a ZigBee PRO [139], que embora compatíveis entre si, apresentam algumas diferenças de capacidade. A ZigBee PRO é uma pilha protocolar mais robusta e mais coerente para redes complexas. Entre outras características, esta rede conta com um gestor de canal de operação ao qual cada nó reporta experiências de interferência e tabelas de sensibilidade na recepção (por par transmissor). Em função desta informação, o gestor de canal pode proceder à alteração do canal de operação, aumentando o desempenho da rede. Outra característica importante das redes ZigBee PRO é o reencaminhamento assimétrico (figura 4). Numa rede ZigBee, uma mensagem entre dois dispositivos percorre o mesmo trajecto em ambos os sentidos. Numa rede ZigBee PRO, a transmissão e a recepção entre dois dispositivos podem ser estabelecidas em caminhos diferentes, aumentando assim a robustez e a fiabilidade da rede. A tecnologia ZigBee PRO permite ainda distinguir os repetidores alimentados dos restantes, e em função desta informação otimizar as acções de reencaminhamento de mensagens [140].

Alguns perfis de aplicação só funcionam sobre Zigbee PRO, como o *ZigBee Building Automation* (ZBA) [141] projectado para o controlo remoto ou automático de dispositivos em edifícios grandes como blocos de escritórios ou de apartamentos. Os perfis ZSE [136] ou *ZigBee Telecom Applications* (ZTA) [142], para a gestão de energia ou aplicações de telecomunicações, respectivamente, operam com ambas as pilhas protocolares mas recomendam que uma delas esteja em franca maioria para maior consistência da rede.

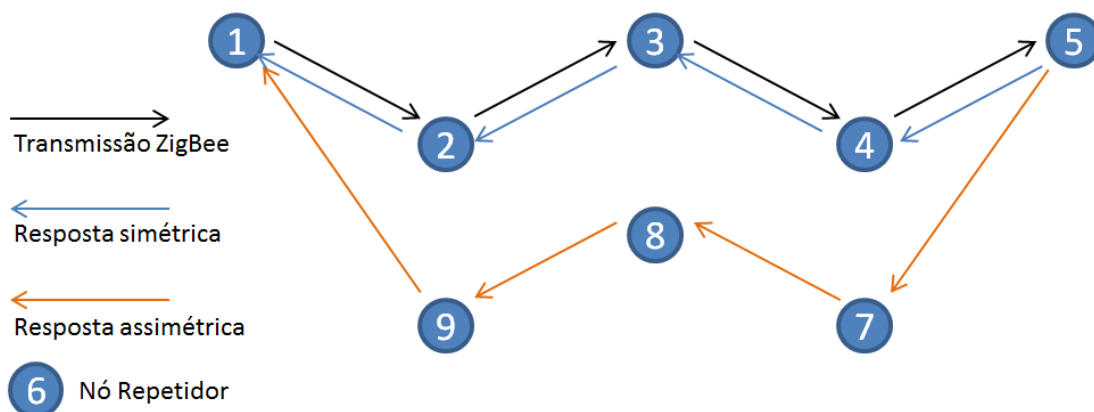


Figura 4: Reencaminhamento de mensagens no ZigBee.

Na especificação ZigBee 2012, a tecnologia ZigBee PRO inclui ainda uma nova opção para a operação com muito baixo consumo – *Green Power*. Esta funcionalidade – realizada através de uma sub-pilha protocolar que opera em paralelo à principal – potencia a utilização de dispositivos RFD alimentados com recurso à captura de energia do meio envolvente, dispensando baterias. Através de uma trama mais pequena (a partir de 21 bytes) e de um acesso ao meio mais célere, um instrumento *Green Power* consegue comunicar para a rede ZigBee consumindo até 100 vezes menos energia que um outro



dispositivo RFD. Os pontos repetidores entre o instrumento e o seu destinatário, bem como este último, entendem os dois protocolos – o ZigBee PRO e o ZigBee PRO Green Power.

#### 2.2.4. Tecnologias com sincronismo

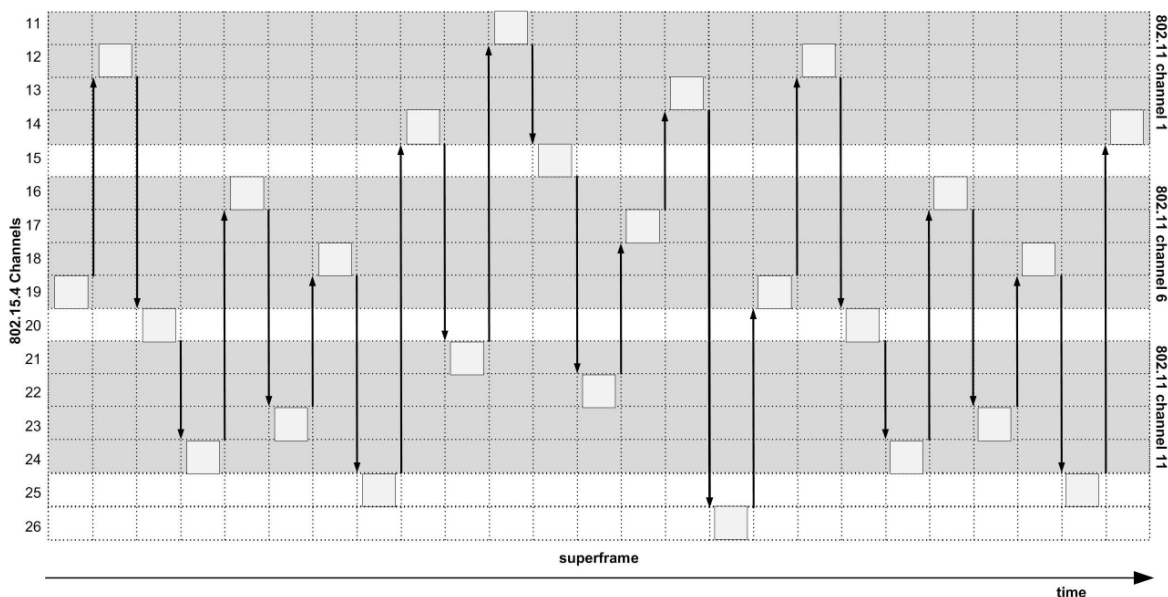
O ambiente industrial exige às redes de informação uma enorme fiabilidade, da qual depende a melhor gestão da produção, da segurança de pessoas e infra-estruturas, e da manutenção dos activos industriais. No início da secção 2.2 foram abordadas as diferenças conceptuais e vulnerabilidades daí decorrentes afectas às redes sem fios face às redes de campo. Foram também apresentadas as técnicas de base para ultrapassar as mesmas. Quando implementadas em indústrias de processo, as redes sem fios encontram novos desafios nomeadamente a necessidade de um maior volume de informação e a obrigatoriedade de garantir a entrega da mesma no prazo pré-determinado. Ao contrário dos ambientes doméstico ou de monitorização industrial, onde o número de comunicações na WPAN é baixo, num cenário industrial dotado de controlo haverá mais nós e com muito maior taxa de comunicação, pelo que se esperam maiores constrangimentos de tráfego, exigindo por isso uma gestão mais fina do acesso ao meio e das rotas de reencaminhamento de mensagens.

A monitorização da condição de activos, por via das redes inteligentes de sensores sem fios, não enfrentará grandes dificuldades de aceitação nas indústrias de processo, dado que as comunicações ao servidor ocorrerão na ordem de uma acção de verificação diária à qual se somam os alarmes de condição anómala. Já as comunicações de comando, relativas ao controlo do processo produtivo (como por exemplo a alteração de estado de uma válvula) podem acontecer várias vezes por minuto, provocando assim um maior fluxo de mensagens na rede e exigindo garantias de tempo-real. Tal como nas redes de campo, a sincronização de uma rede com muitos nós e a atribuição de janelas de tempo dedicadas à comunicação M2M (entre um sensor do processo e o correspondente actuador) são vitais para garantir o cumprimento de um atraso máximo pré-definido. A oportunidade das redes sem fios em automação industrial só existe com esta fiabilidade – garantia de entrega de mensagem íntegra – e com esta robustez – garantia de entrega dentro do prazo. Se nas redes de campo por cabo, o CSMA pode constituir um constrangimento significativo ao débito [143], nas redes WPAN, onde o reencaminhamento de mensagens será necessário, e muitas vezes com um número de saltos da ordem da dezena, o acesso síncrono ao meio será tantas vezes a melhor opção, acrescentando a rede a necessária previsibilidade [144]. Em [145] e [146] são analisadas as limitações de débito e de atraso relativas ao acesso por CSMA/CA em redes WPAN. A par da optimização do uso dos canais de comunicação, acresce a necessidade da rede monitorizar a condição das suas rotas de informação, e de estar pronta para reencaminhar mensagens por rotas alternativas e para pontos de acesso alternativos. A este quadro de requisitos, o ambiente industrial obriga ainda os dispositivos (sensor ou actuador) a estarem pré-configurados para trabalhar em modo seguro - *offline*. Numa rede WPAN industrial, mormente em controlo, qualquer actuador que perca a conectividade à rede, e conseqüentemente à central de comando, terá obrigatoriamente que detectar esse evento e autoconfigurar-se para operação segura auto-suficiente [147] [148]. Os modos de operação em falha de um actuador, bem como o registo de medidas na memória interna de

um sensor, constituem peças que determinam a classificação SIL [39] [40] de um instrumento de campo.

Os principais protocolos industriais podem encontrar-se discutidos e comparados em [149], [150] e [151]. Nos trabalhos [94], [152] e [147] são apresentados em detalhe alguns destes desafios e apresentadas algumas razões que fazem afastar o ZigBee tradicional da possibilidade de fazer parte destes cenários de aplicação. Em particular, o trabalho [152] refere a dependência da temperatura nos cristais (osciladores) e o impacto que esta variação pode ter no sincronismo da rede. No trabalho [153] é apresentado um mecanismo de sincronização aplicado a redes ZigBee, implementado na camada física, obtendo maior precisão dos relógios de cada nó, mas também um maior consumo de energia face ao mecanismo de referência.

Nesta secção serão discutidas as duas tecnologias com maior presença em ambiente industrial – o WirelessHART [154] e o ISA100.11a [155]. Ambas as tecnologias são construídas sobre o IEEE 802.15.4-2006 na banda dos 2,4GHz (portanto sobre canais DSSS), mas implementam o acesso ao meio por TDMA – sincronizado – combinado com FHSS, ou seja, alterando o canal de operação em cada janela temporal (ver figura 5). O mecanismo de avaliação da energia do canal – o CCA – mantém-se opcional, tal como o mecanismo que desabilita os canais com maior ruído – *blacklisting* [147].



**Figura 5: Representação da alteração do canal de operação em janelas temporais bem definidas. Emissor e receptor partilham o código de sequência de canais de operação. Fonte: [128].**

São portanto tecnologias mais preparadas para garantir resposta em tempo-real e um maior débito de informação, mesmo quando em coexistência com outras tecnologias na mesma banda de frequência, conferindo então a necessária fiabilidade à gestão industrial.

Tal como o ZigBee, são ambas capacitadas de autoconfiguração e rearranjo automático da rede.

#### 2.2.4.1. ISA 100.11a:2008

O ISA100.11a permite como alternativa o acesso por CSMA, ou o acesso híbrido – durante um período funciona o acesso síncrono com FHSS, e noutro o acesso por CSMA num canal pré-definido. Este comportamento é o mais adequado às redes compostas por um número bem definido de actuadores e com um número grande de sensores dedicados à monitorização da condição, permitindo que as operações de controlo se transmitam com segurança e em tempo-real nos períodos TDMA/FHSS, e dando a oportunidade aos sensores de comunicar no período CSMA. O ISA100.11a estabelece neste âmbito 6 classes de prioridade por ordem de criticidade. Existem assim duas classes de mensagens de monitorização (menos prioritárias): mensagem de registo periódico – classe 5; e mensagem de alarme – classe 4. As 3 classes seguintes são ocupadas pelas mensagens de controlo: com validação manual – classe 3; de validação automática – classe 2; e de disposições regulamentares (controlo de poluentes, por exemplo) – classe 1. As mensagens de controlo de segurança são as mais prioritárias na rede, e ocupam a classe 0.

As redes ISA 100.11a são as mais completas WPAN na banda ISM 2,4GHz, na medida em que contemplam o uso dos protocolos IPv6 na camada de rede e UDP na camada de transporte, bem como o encapsulamento da camada de aplicação de alguns dos mais presentes protocolos de comunicação industriais amplamente estabelecidos – os *legacy protocols* – identificados em 2.1. Desta forma garantem ainda a interoperabilidade com os mais reconhecidos sistemas de supervisão e controlo industrial – os *legacy systems* – através de um ponto comum – o *gateway*.

Na figura 6 está ilustrado um exemplo de implementação de uma rede ISA 100.11a. O *standard* caracteriza-se por ser o mais genérico e abrangente dos standards de baixo consumo e curto alcance nos 2,4GHz. Para os dispositivos de campo encontram-se consideradas algumas operações na rede, tais como a realização de reencaminhamento e de permissão de conectividade à rede, entre outras – *role profiles*. Estas funcionalidades podem-se encontrar activas em todos ou grande parte dos membros da rede, permitindo a sua maior agilidade. Por motivos de segurança ou de poupança de energia, alguns membros terão estas funcionalidades inactivas. À semelhança de outros protocolos, este *standard* considera também a existência de perfis de aplicação, conseguindo desta forma harmonizar as configurações e operações dentro de uma rede com determinado fim. A configuração de redes ISA100.11a:2008 para operação nos protocolos referidos de 2.1.2 a 2.1.6 também é potenciada através dos perfis de aplicação para o efeito [156].

Para a realização da interoperabilidade com outros sistemas, o *standard* considera dois agentes de interface: o *backbone router* e o *gateway*. O primeiro constitui a interface física entre a rede ISA100.11a:2008 e a infra-estrutura de rede da planta industrial, onde se procede ao encapsulamento da mensagem no *payload* de uma trama de maior dimensão – preferencialmente redes de banda larga – para transporte da informação. O segundo constitui a interface protocolar entre a rede ISA100.11a:2008 e a infra-estrutura de rede da planta industrial, ou até mesmo ao sistema de supervisão da planta. Estes dois agentes

podem ou não coexistir na mesma máquina. A interoperabilidade entre os dispositivos ISA100.11a é verificada em organismo próprio – The ISA100 Wireless Compliance Institute [157], por meio de testes de certificação conducentes à garantia de compatibilidade.

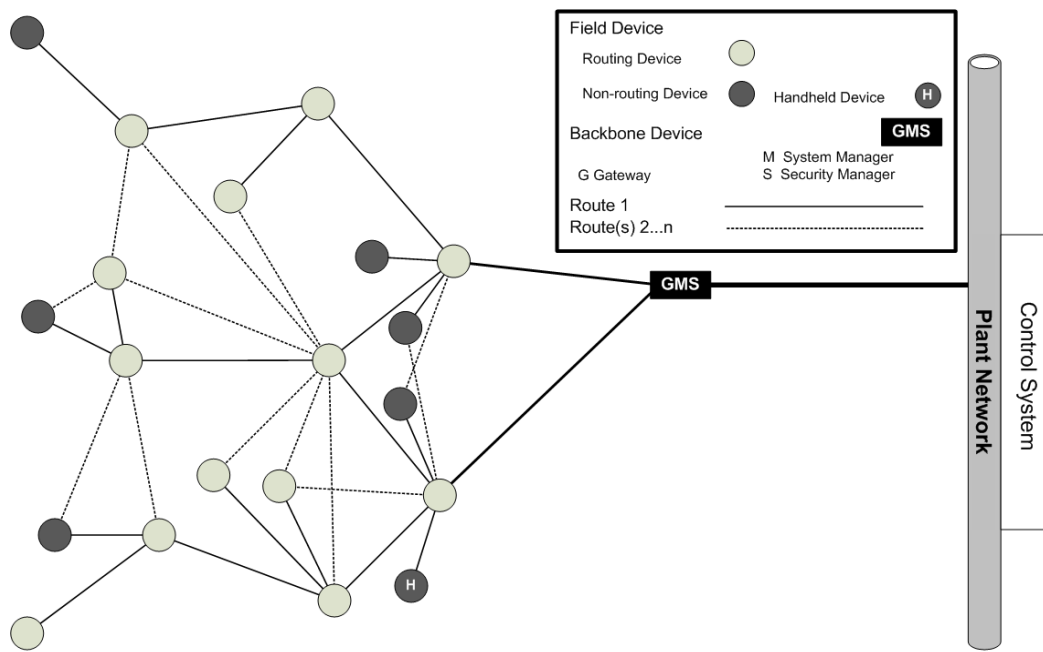


Figura 6: Exemplo de arquitectura de uma rede ISA 100.11a. Fonte: [158].

A comunicação entre dois dispositivos é realizada nos trâmites definidos num contrato para o efeito. Este contracto é “celebrado” entre os 2 dispositivos e o gestor do sistema. Este gestor tem como funções realizar a manutenção do contrato, as alterações a este e a cessação do mesmo. São também funções do gestor do sistema controlar as operações e configurações da rede, monitorizar e reportar o desempenho da rede, bem como verificar o cumprimento das regras de comunicação entre todos os dispositivos da rede podendo em função desta verificação activar ou desactivar perfis de operação ou dispositivos. Em estreita colaboração com o gestor de sistema opera o gestor de segurança, estabelecendo e renovando as chaves de rede e as de sessão entre dois dispositivos. A rede ISA100.11a:2008 pode ser operada com chaves simétricas (AES-128) ou com criptografia de chave pública usando métodos baseados em curvas elípticas (ECC). As aplicações “gestor de sistema” e “gestor de segurança” requerem maiores recursos de processamento e por isso está prevista a implementação das mesmas em máquinas da infra-estrutura de rede da planta industrial.

#### 2.2.4.2. WirelessHART

O WirelessHART foi criado para estender as redes HART (ver 2.1.5), já existentes nas plantas industriais, aos novos dispositivos sem fios. Sobre a rede sem fios, nas tramas do

IEEE 802.15.4:2006, fluem comandos HART interpretáveis por qualquer dispositivo HART ou WirelessHART [159]. As redes são compostas por sensores e actuadores, bem como por dispositivos repetidores – todos eles FFD (ver 2.2.2) – e por um *gateway* que faz a ponte entre as aplicações do processo e os dispositivos de campo, através da infra-estrutura de comunicação industrial. O *gateway* pode ter um ou vários pontos de acesso (equivalentes aos *backbone routers* do ISA100.11a), possibilitando no segundo caso uma maior redundância de rotas aos fluxos de mensagens. Ao *gateway* estão associados os elementos gestor da rede – coordenador do tráfego na rede (tempo de acesso ao meio), da gestão das rotas de reencaminhamento, da associação à rede e de sessão com outros dispositivos; – e o gestor de segurança – responsável por gerir e renovar periodicamente as chaves de segurança (de associação à rede, do uso da rede, e de sessão com outro dispositivo da rede), bem como a lista de dispositivos autorizados na rede.

O *gateway* WirelessHART pode operar com um ou mais pontos de acesso (interfaces rádio), permitindo, no segundo caso, maior redundância de rotas [160] ou ainda usar diferentes canais rádio em simultâneo, aumentando assim a largura de banda [148]. As redes contam com sensores e actuadores sem fios, mas também com módulos de adaptação para habilitar (até 8) instrumentos HART a operar na rede sem fios. De operação semelhante ao adaptador, existe também a consola portátil, que opera como cliente secundário da rede HART, comunicando com instrumentos HART (servidores) para efeitos de manutenção e reconfiguração dos mesmos, e com o controlo central através da rede sem fios. Na rede sem fios podem ainda existir repetidores – interfaces rádio sem qualquer função no processo industrial. Tal como os seus pares HART, todos os dispositivos WirelessHART carecem de certificação pela HCF.

A convergência do WirelessHART no ISA100 foi amplamente discutida, dando lugar à criação do ISA100.12 – WirelessHART Convergence Subcommittee. Em 2013, este esforço terminou sem acordo entre as partes [161].

### 2.2.5. Redes na banda ISM 433MHz

O uso de bandas ISM na região do Sub-GHz permite, para a mesma potência de emissão, obter um maior alcance das comunicações e maior robustez perante obstáculos ou interferências electromagnéticas, face ao conseguido no 2,4GHz. Este assunto encontra-se bem apresentado e discutido em [162], onde se dá particular destaque à banda ISM dos 433MHz. Em 2.2.2 foram referidas as vantagens do uso da banda ISM nos 2,4GHz, que em muito contribuíram para o franco desenvolvimento de *standards* sobre a referida tecnologia, e com isso assistimos hoje a uma forte presença destas redes sem fios em múltiplos cenários de aplicação, muitas vezes até provocando o congestionamento das mesmas [163]. É também com esta massificação dos 2,4GHz que as redes sub-GHz ganham novas oportunidades de implementação, na perspectiva do uso de canais dedicados a um determinado serviço que exija maior fiabilidade e segurança. Em particular, a banda ISM nos 433MHz, tem a vantagem de estar disponível para uso não licenciado em todo o mundo, embora regulamentada de forma diferente região a região.

A característica diferenciadora das redes na banda dos 433MHz está no maior alcance, e portanto na possibilidade de criar redes dispersas de baixo consumo sem a necessidade de nós repetidores. Em [164] foram calculados a partir de um modelo teórico, os alcances de módulos-rádio IEEE 802.15.4 nas bandas 433MHz e 2,4GHz, à potência de transmissão de 0dBm, e com uma taxa de transmissão de 250kbps. Nos 433MHz, os alcances obtidos foram 280m e cerca de 1Km, para a uma altura do chão de 70 e 210 cm, respectivamente. Nos 2,4GHz, o alcance foi de 130m para ambas as alturas. Outros factores que afectam a propagação são apresentados e amplamente discutidos em [162].

No âmbito do presente trabalho, foram realizados testes no terreno (descritos na secção 3), onde se obteve um alcance de 400m com sensores construídos para a operação nos 433MHz, e 50m para sensores a operar nos 2,4GHz. Ambos os testes foram realizados ao ar livre, à potência de 10dBm e a cerca de 1m de altura do chão. A rede 433MHz foi configurada a uma taxa de transmissão de 38,4 kbps, enquanto a rede nos 2,4GHz operou no teste a 250kbps.

A maior limitação da banda ISM dos 433MHz está na largura de banda – 1,74MHz. Não tanto pelo número de canais e a largura de banda dos mesmos, mas sim porque a distância entre canais será sempre bastante curta, restringindo o uso de mecanismos de robustez das comunicações. Ainda que seja possível criar vários canais nesta banda, como se apresenta nos *standards* em 2.2.5.1 e em 0, qualquer técnica de tratamento por espalhamento espectral provocará interferências entre alguns canais, impossibilitando o uso da mesma. A ausência destes mecanismos torna esta comunicação mais susceptível de ser corrompida por outras comunicações ou interferências na mesma banda de frequência [162]. No longo alcance não se coloca a questão da largura de banda, uma vez que esta cai para cerca de metade em cada reencaminhamento, e a rede 433MHz necessita de menos repetidores.

Uma outra potencial desvantagem está no maior tamanho da antena, proporcional ao comprimento de onda. A típica antena de sensores sem fios – o monopolo de  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda – terá então 17,28 cm de comprimento, enquanto a equivalente para os 2,4GHz terá 3,06 cm. A solução passa muitas vezes pelo uso de antenas helicoidais que minimizam este impacto.

O melhor desempenho na propagação electromagnética permite ainda a uma rede local operar com menor consumo de energia para a mesma distância entre nós, abrindo assim mais oportunidades às redes sub-GHz. É frequente encontrar na indústria, principalmente nas de processo – em grandes instalações – a necessidade de realizar redes sem fios de baixo consumo com áreas superiores a um hectare. Tais desafios são mormente acompanhados do requisito de um mínimo de alguns anos de autonomia – que correspondem aos tempos médios entre paragens gerais para manutenção. É muitas vezes esta a fronteira que as redes sem fios encontram pela frente, e na qual são travadas para ceder oportunidade às redes de campo. Será também nos limites de operacionalidade das redes baseadas em microondas, que as redes sub-GHz terão as suas oportunidades.

A energia consumida pelo rádio depende do número de vezes que o rádio liga para transmitir um pacote, da duração do pacote (número de bits a transmitir) e ainda do tipo de acesso ao meio partilhado – o canal RF [164]. O autor demonstra que a energia consumida

pelo receptor é constante para a mesma modulação e taxa de transmissão, dependendo apenas da duração da informação. Já a energia do transmissor depende da adaptação de potência do rádio, realizada cada vez que se liga, e da respectiva sensibilidade do receptor. Com menor taxa de transmissão, a densidade de energia por bit aumenta, promovendo a maior sensibilidade do receptor e conseqüentemente o alcance das comunicações. Por outro lado, o consumo de energia por bit transmitido aumenta também, diminuindo a autonomia do nó, tornando-o menos eficiente. A optimização da eficiência energética do nó sem fios resulta então do compromisso de uma maior taxa de transmissão, garantindo a necessária taxa de entrega de pacotes para a distância projectada entre os nós da rede.

Em [164] foi obtida através de um modelo numérico, a energia consumida numa comunicação a 100m. O autor refere que o nó IEEE 802.15.4f (433MHz) a transmitir a 250kbps apresenta um consumo energético de 0,55nJ/bit – cerca de 72 vezes inferior à necessidade de um nó IEEE 802.15.4 (2,4GHz) a operar com a mesma taxa de transmissão – 40nJ/bit. O mesmo alcance é conseguido com menor energia devido à maior robustez da portadora face a obstáculos, por via da baixa frequência de operação. No entanto, configurando uma taxa de transmissão de 31,25kbps no nó IEEE 802.15.4f, aumentando ainda mais o alcance da comunicação, o consumo energético aproxima-se dos mesmos 40nJ/bit.

Nas subsecções seguintes são apresentadas duas tecnologias de redes sem fios, bastante recentes e por isso pouco adoptadas, que exploram a estreita banda dos 433MHz, o DASH7 Mode 2 [165] [166] e o IEEE 802.15.4f [129]. Ambas as tecnologias partem de um conjunto de 15 canais de 108KHz, mas fazem uma gestão diferente do uso dos mesmos. Ambos os *standards* consideram duas bandas vazias (no início e no fim da banda ISM) para evitar interferências com sistemas rádio a operar em bandas adjacentes.

#### 2.2.5.1. DASH7 Alliance Protocol

O Dash7 é uma tecnologia de comunicação sem fios, assíncrona, projectada para a aplicações de muito baixa potência e longo alcance, de comunicações curtas e esparsas, operando exclusivamente na banda ISM dos 433MHz, e baseada na norma ISO 18000-7 [167]. As aplicações alvo do Dash7 são as redes de sensores sem fios, localização e controlo de acessos. Trata-se de uma tecnologia recente, criada em 2009, e ainda em desenvolvimento.

A tecnologia, que se encontra bem apresentada em [168] e discutida em [169], define 4 tipos de dispositivos membros de uma rede: o *blinker*; o *endpoint*; o *gateway*; e o *subcontroller*. O primeiro funciona como sinalizador – apenas transmite dados sem realizar qualquer acção de monitorização do acesso ao meio; o segundo comporta-se como um dispositivo de funções reduzidas (ver 2.2.2), podendo transmitir e receber informação, e ser acordado por *wake-up radio*; ao *gateway* compete estabelecer a ligação a outras redes, estando sempre à escuta excepto aquando de uma transmissão; o último dispositivo da lista pode assumir qualquer função, incluindo controlar a rede, adormecer ou reencaminhar mensagens. À excepção do primeiro, todos os nós implementam no acesso ao meio o CSMA/CA (ver 2.1.3).

A tecnologia contempla dois modos de funcionamento e duas categorias de mensagens. A rede pode ser configurada no modo cliente-servidor, sendo que o *gateway* e os restantes controladores da rede podem inquirir os sensores ou *tags* de identificação (*endpoints*) e estes só transmitem como resposta ao pedido; ou pode ser configurada de modo livre, onde qualquer dispositivo comunica para outro quando verifica essa necessidade. A rede comporta mensagens de dados (até 256 bytes) e mensagens de serviço à rede (6 bytes). A camada de aplicação pode ser observada com maior detalhe em [170]. A Universidade de Antuérpia está a desenvolver uma pilha protocolar de acordo com a norma do Dash7 para operação nos rádios das Texas Instruments da família CC430 – o OSS-7 [171].

Na camada física são definidos 4 conjuntos de combinações dos 15 canais de 108KHz listados na tabela 1. Por omissão, todos os canais usam como técnica de modulação o BFSK, mas a tecnologia permite como alternativa, o uso do GFSK. Esta última permitirá aumentar a largura de banda do canal usado, perdendo a rede em alcance por via da redução na sensibilidade no receptor.

**Tabela 1: Características da camada física do Dash7.**

Conjunto	Canais	Largura do canal	Modulação	Taxa de transmissão
<b>Base</b>	00	432 KHz	1.8-BFSK	55,55 kbps
<b>Normal</b>	10, 12, 14, 16, 18, 1A, 1C, 1E	216 KHz	1.8-BFSK	55,55 kbps
<b>Hi-Rate</b>	21, 25, 29, 2B	432 KHz	0.5-BFSK	200 kbps
<b>Blink</b>	32, 3C	648 KHz	0.5-BFSK	200 kbps

#### 2.2.5.2. IEEE 802.15.4f

Na perspectiva de acompanhar os novos desenvolvimentos sobre a banda de frequência dos 433MHz, e de poder contribuir para melhorar as futuras redes sem fios nesta tecnologia, o IEEE 802.15.4 fez introduzir no *standard* a nova camada física nos 433MHz e alguns novos termos, entre os quais a identificação por radio frequência (RFID) e a de sistema de localização em tempo real (RTLS, *real time locating system*), bem como os dispositivos de funções reduzidas exclusivamente receptor (RFD-RX) e o par exclusivamente transmissor (RFD-TX) [129].

O *standard* estabelece uma combinação de canais diferente do Dash7, e aplica como modulação o FSK de desvio mínimo (MSK), conseguindo assim que todos os canais, em cada categoria, sejam ortogonais entre si, obtendo então uma melhor eficiência no uso do espectro. A tabela 2 sumariza estas características.

**Tabela 2: Características da camada física do IEEE 802.15.4f.**

Conjunto	Canais	Largura do canal	Modulação	Taxa de transmissão
<b>31,25</b>	0-14 (15 canais)	108 KHz	MSK	31,25 kbps
<b>100</b>	1, 4, 7, 10, 13	324 KHz	MSK	100 kbps
<b>250</b>	2, 7, 12	540 KHz	MSK	250 kbps



Esta adenda à especificação é pouco completa ainda, e inclui outras bandas de ISM para além da região espectral dos 433MHz. À data da redacção desta secção não é conhecida nenhuma implementação da mesma. A próxima edição desta especificação [127] vai trazer com certeza novos desenvolvimentos para as redes de baixo consumo com maior alcance.

### 2.2.6. SimpliciTI

O SimpliciTI [172] é um protocolo de comunicações para redes sem fios de baixo consumo, criado e gerido pela Texas Instruments, e constitui uma ferramenta de carácter genérico para o desenvolvimento de redes sem fios de baixo consumo. O protocolo é aplicável em diferentes bandas de frequência, entre as quais as bandas 433MHz, 868/915/950MHz, e 2,4GHz, e garante muitas das operações já mencionadas neste capítulo, como a gestão da organização da rede e a gestão da segurança. As unidades podem ser configuradas como *gateway*, repetidor ou terminal, permitindo a criação de redes com topologias ponto-a-ponto, estrela, ou árvore. A segurança da rede é gerida por encriptação simétrica. O acesso ao meio pode ser realizado de forma síncrona e com variação do canal de operação (FHSS) ou por observação da portadora (CSMA). No segundo método, a tecnologia implementa um protocolo CSMA não persistente [173]. Para redes com poucos nós, é um método que apresenta baixo número de colisões e uma grande eficiência, uma vez que procede ao envio imediato das mensagens na ausência de outras comunicações na portadora. Em contraponto, para redes com muitos nós, pode provocar um largo atraso nas comunicações, devido à natureza aleatória do seu período de espera até à próxima tentativa de acesso ao meio [143].

O SimpliciTI permite também a criação de redes mais simples e de operação mais rápida, possibilitando a abstracção de alguns dos mecanismos de gestão da rede. A autenticação e o endereçamento são exemplos de processos que podem ser simplificados, com o fim de permitir comunicações de tipologia RFID activo. Estas redes podem ser construídas numa topologia estrela, com repetidores e *gateways* receptores de mensagens avulsas de unidades inteligentes sem fios. Desta forma, unidades inteligentes e com autonomia própria (móveis ou estáticas) podem realizar o seu processo de monitorização e minimizar o seu consumo de energia aquando da decisão da comunicação, uma vez que a rede permite a interpretação de mensagens avulsas transmitidas sem qualquer indicação ou pré-aviso. Na secção 3.1.2 é demonstrada a vantagem energética desta simplificação da rede. O uso da camada física é também muito flexível. Esta tecnologia permite seleccionar diferentes modulações e taxas de transmissão, em função das quais se dimensionam os canais rádio. Na tabela 3 estão descritos alguns exemplos de valores de largura de banda para diferentes taxas de transmissão e esquemas de modulação, para 4 conjuntos à medida.

**Tabela 3: Características da camada física explorada pelo SimpliciTI.**

Conjunto	Largura do canal	Modulação	Taxa de transmissão
<b>38.4g</b>	102 KHz	GFSK	38,4 kbps
<b>100g</b>	325 KHz	GFSK	100 kbps
<b>250g</b>	542 KHz	GFSK	250 kbps
<b>121m</b>	460 KHz	MSK	121 kbps

### 2.2.7. RFID e WPAN - Discussão

A identificação electrónica de activos e de pessoas é maioritariamente realizada de forma automática através de comunicações sem fios de muito curto alcance – RFID [174]. O armazenamento e processo logístico foi desde cedo o sector mais consumidor deste conjunto de tecnologias, que posteriormente foi evoluindo e dando resposta a novas aplicações [175]. As tradicionais chaves têm vindo a ser substituídas por sistemas automáticos de controlo de acessos através do uso de dispositivos RFID. Desde o acesso a uma zona restrita a um grupo de operadores, à passagem de um livro por uma saída de uma biblioteca, o que está em causa é a identificação da pessoa ou do activo e a detecção da sua passagem, bem como o registo da data e hora do evento. Adicionalmente, os sistemas podem ainda desencadear acções em tempo-real, como disparar um alarme sonoro, abrir um acesso posterior, ou dispensar um documento.

Os sistemas RFID consistem num par de dispositivos leitor e identificador, sendo o leitor alocado a um ponto de acesso. Como base da tecnologia, o leitor é o elemento energeticamente activo, sendo que o dispositivo identificador é normalmente passivo. O leitor mantém um campo electromagnético criado à sua volta, que permite a um elemento RFID passivo, quando em proximidade do leitor mas sem a necessidade de contacto, ser energizado e enviar uma mensagem ao leitor com o seu código de identificação. Esta capacidade de ser energizado, e assim dispensar ter energia própria, permite a construção de dispositivos identificadores com tamanho muito reduzido e viabiliza a sua construção em massa pelo seu custo reduzido.

A evolução da RFID trouxe-nos um vasto conjunto de tecnologias, a operar em várias bandas de frequência, com diferentes protocolos de comunicação e maiores alcances na comunicação. Existem hoje sistemas a operar nos 125kHz com alcances inferiores a 10 cm, e sistemas a operar nos 868MHz/915MHz com alcances na ordem dos 15m [176], desde que equipados com antenas próprias para o efeito. O estudo apresentado em [177] revela um alcance de 4m para um par na banda ISM dos 2,4GHz e 11m para um par na banda ISM 868MHz.

O **EPC Global Class I Gen 2** [178] [179] é um dos *standards* mais usados em gestão de activos. A tecnologia opera nas bandas UHF 868MHz/915MHz e oferece um enorme leque de *tags* passivas adaptadas a diferentes necessidades e com diferentes alcances (das etiquetas autocolantes aos monoblocos de aparafusar em chapa metálica), possibilitando que os leitores fixos e móveis possam identificar todos os activos de uma empresa. A *eneida*<sup>®</sup> [8] usa esta tecnologia para identificar uma carruagem de um comboio em cima de uma balança. Neste sistema, o PLC que controla a balança comunica com o leitor RFID, podendo assim enviar automaticamente para o sistema, a informação do peso da carruagem e a identificação da mesma.

A operar na banda dos 13,56MHz estão outras tecnologias RFID, de alcance até um metro, usadas maioritariamente na identificação de pessoas através da apresentação de um cartão [180]. Estas tecnologias, denominadas por comunicações de campo próximo – **NFC** (dos termos em inglês *Near Field Communication*) [181] [182], mantêm maior aplicabilidade em soluções de controlo de acesso, mas agora abrangendo o acesso a sistemas de informação.

Aplicações mais recentes do NFC passam pela possibilidade de efectuar pagamentos com um cartão sem o introduzir no terminal móvel [183], bem como a leitura de cartões por dispositivos móveis de última geração para ter acesso a determinada informação [184].

O NFC permite ainda a comunicação entre um par de dispositivos alimentados, configurando assim uma rede com dois nós, de topologia ponto-a-ponto. Esta característica torna a tecnologia interessante para aplicações industriais, promovendo a implementação de módulos NFC activos em sensores inteligentes, e o uso desta interface para realizar o envio de informação [185]. Esta forma de comunicação sem fios, limitada a dois nós e a um alcance de cerca de um metro, constitui uma boa alternativa às redes sem fios quando dois sensores se encontram muito próximos. Em cenários de aplicação com muitos nós, as comunicações estão sujeitas a mais colisões. O uso de um segundo canal distinto em frequência permite minimizar este efeito. As falhas de comunicação na WPAN podem ainda resultar da possível saturação do receptor muito próximo (quando o transmissor da WPAN está a transmitir com elevada potência). Também neste cenário o NFC pode ser aplicado, virtualizando dois sensores inteligentes num dispositivo da WPAN.

#### 2.2.8. WPAN e Internet - Discussão

As redes sem fios de baixa potência facilitaram a ubiquidade da monitorização da condição dos activos industriais, e encontram-se a crescer no sentido de potenciar uma presença próxima em sistemas de controlo. Em paralelo com este desenvolvimento, crescem a uma escala bem superior os terminais móveis de acesso à Internet – tecnologias de grande consumo. A Internet promove e permite o encontro destas duas realidades, viabilizando um novo conceito dos sistemas inteligentes – com a entrega da informação mais relevante ao destinatário com maior capacidade de actuação sobre a mesma, em tempo útil e não dependente da localização de cada um. Este encontro dá-se primeiro através das infra-estruturas de banda larga, que servem em ambiente industrial para transportar grandes volumes de dados entre computadores, e uma vez existentes potenciam o agregar de pequenas redes sem fios de curto alcance, com a entrega da informação a uma base de dados. Com a maior inteligência dos sensores sem fios e a crescente aprendizagem dos sistemas de monitorização, tenderá a ser menos necessário o armazenamento bruto de dados e o seu transporte para um servidor central. Nesta segunda fase, o encontro entre os mais modernos sensores inteligentes sem fios, e os mais modernos terminais móveis pessoais, far-se-á pelo comum acesso à Internet (protocolo IP), sendo o próprio sensor servidor dos seus dados em histórico, hospedeiro do algoritmo de análise da condição, e cliente de um actuador, seja este um instrumento de campo ou um terminal móvel pessoal.

É fundamental esclarecer que estas duas tecnologias têm contextos e objectivos distintos, e por isso também arquitecturas bem diferentes. Os instrumentos industriais existem para serem autónomos, não apenas em energia mas essencialmente em operação, e isto implica uma construção focada na maior robustez do dispositivo, minimizando a sua complexidade. Por outro lado os terminais móveis estão a evoluir para o acesso mais rápido a um maior leque de serviços – incluindo os serviços de telemetria e telegestão de processos

(domésticos ou industriais), dirigindo esforços para a maior largura de banda. A implementação do protocolo IP em sensores e actuadores sem fios, promovida e “normalizada” pelo IETF [186] – comunidade para interoperabilidade entre sistemas na Internet – depende então de muitas adaptações entre redes de banda larga e redes de banda estreita. O IETF desenvolveu assim processos de adaptação do IPv6 ao IEEE 802.15.4, de compressão de cabeçalhos e de reformatação de pacotes [187] [188], e de reencaminhamento de mensagens [189] [190], dando origem à especificação 6LoWPAN [191]. Com base nestes pressupostos nasceram novas tecnologias de redes sem fios, procurando novas soluções para os grandes desafios que enfrenta a implementação de um protocolo de âmbito global sobre uma rede sem fios projectada para ser simples, entre eles a gestão de energia [192], a gestão da memória [193], e a gestão de rotas entre repetidores [194].

Algumas tecnologias de rede de instrumentos sem fios, das mais presentes no mercado industrial, deram os seus passos para a interoperabilidade com o 6LoWPAN. A ZigBee Alliance criou a especificação ZigBee IP [195] – o veículo desta marca para o conceito de IoT (*Internet of things*) – sobre a qual está implementado o *standard* ZigBee SEP 2.0 [196]. Este perfil de aplicação é uma alternativa ao ZigBee SEP1.0 [136], mas com um novo conjunto de ferramentas de controlo e de serviços que promovem a conectividade entre o consumidor e o fornecedor de energia. Este perfil pode ser implementado sobre qualquer tecnologia de transporte (camada 4 do ISO/OSI [125]) compatível com os protocolos IP do IETF, como o ZigBee IP. O Dash7, no seu *standard* Mode 2 [166], considera o uso opcional do protocolo IPv6, permitindo cabeçalhos de 16 Bytes no campo “outros cabeçalhos” da sua trama (ver tabela 4), embora nesta data não esteja disseminada nenhuma implementação deste tipo.

**Tabela 4: formato da trama do Dash7 Mode 2 [197].**

Comprimento (Bytes)	Potência Tx (½dBm)	Filtro de sub-rede	Controlo da trama	Outros cabeçalhos	Dados ( <i>payload</i> )	Fecho (criptog.)	CRC
1 Byte	1 Byte	1 Byte	1 Byte	0-52 Bytes	0-249 Bytes	0-40 Bytes	2 Bytes
0-255	-40 a 23.5	-	-	(opcional)	-	(opcional)	-

A autonomia de um sensor sem fios é o principal factor limitador da segunda fase do encontro global dos mundos industrial e pessoal. Um nó com tamanha inteligência e disponibilidade terá menor necessidade de transmitir informação, mas por outro lado irá ter um consumo constante superior aos limites actuais dos dispositivos sem fios. Com a maturação actual das tecnologias de informação, o maior desafio desvia-se para a gestão de energia, distribuindo-se em 3 vectores principais: mecanismos mais eficientes de captura energética, maior capacidade de armazenamento de energia em menor volume, e a redução do consumo de energia em processos de cálculo e análise de dados.

No caminho dos dispositivos industriais, as soluções encontram-se hoje num estádio onde os sensores sem fios são autónomos para a monitorização inteligente – a aquisição contínua de múltiplas variáveis e a comparação instantânea com o estado de normal funcionamento, podendo alterar para um processo de maior complexidade (e também de maior consumo energético) aquando da identificação de um estado anormal. O ainda

necessário armazenamento periódico de dados fica entregue a uma unidade central alimentada ao sector, que fará a análise de tendências das variáveis do seu grupo de sensores bem como a comunicação da informação relevante ao utilizador. A partir da aprendizagem realizada pela unidade central e/ou pelo utilizador, está criada a oportunidade para a reparametrização automática do estado de normal funcionamento.

A integração das redes sem fios nas redes de campo ou de banda larga é comumente realizada através de *gateways* próprias [198], tradutoras de protocolos, e com funções opcionais que vão muito para além da simples adaptação de tramas, desde o processamento e armazenamento temporário de informação à introdução de diferentes mecanismos de segurança respeitando assim os *standards* de uma e de outra rede.

### 2.3. Plataformas de interoperabilidade

Os novos dispositivos sem fios (sensores, actuadores e repetidores) já provaram a sua importância no caminho para a maior inteligência dos sistemas de gestão dos processos industriais. Os sensores sem fios permitem obter a informação necessária à melhor caracterização dos processos e da condição dos activos, nos pontos mais indicados para o efeito e sem complicações de instalação. É agora a autonomia dos mesmos que vai exigir a mais forte evolução tecnológica. Os repetidores encontrarão como pontos mais críticos a segurança das comunicações de comando e a fiabilidade própria rede sem fios, das quais depende a aplicabilidade destes sistemas à actuação.

Por outro lado, os “*legacy systems*” (ver 2.2.4.1) representam investimentos avultados para a indústria e já demonstraram grande fiabilidade na gestão de processos – produção, manutenção, segurança, e nas restantes áreas. É portanto imperativo que os novos sistemas sem fios comecem por complementar os sistemas existentes, com recurso a protocolos comuns ou a plataformas que estabeleçam as pontes entre os diferentes sistemas, promovendo a sua interoperabilidade. Os exemplos mais claros de compatibilidade são o HART (2.1.5) e o wirelessHART (2.2.4.2), ou o Foundation Fieldbus (2.1.6) e o ISA100.11a (2.2.4.1). No caso do ZigBee, vários fabricantes construíram as suas próprias *gateways* para as redes de campo, como a eneida® que desenvolveu as suas para CANbus e Modbus [198].

A interoperabilidade não é um assunto exclusivo dos sistemas sem fios. Os sistemas industriais de maior legado também necessitam destas novas plataformas para interagirem entre si [199]. O OPC (*Open Connectivity*) [200] [201] é talvez o melhor exemplo de um *standard* criado para este efeito, e numa perspectiva de sistema global. É um protocolo e um conjunto de ferramentas para a criação de interfaces semânticas – “conectores” – entre aplicações e linguagens de diferentes fabricantes estabelecendo uma plataforma comum de entendimento, que relaciona dispositivos de campo e sistemas de informação de alto nível, como bases de dados e SCADA, promovendo o acesso único e seguro a toda a informação. O conceito de conectividade materializa-se com a criação de servidores OPC para diferentes tecnologias de campo, que podem correr em PC ou *gateways* [202], e clientes OPC embebidos nos sistemas de alto nível. Nesta arquitectura, uma aplicação que esteja

habilitada com cliente OPC pode então relacionar-se com todos os dados da plataforma comum. As redes de sensores – sem fios ou por bus – cujo *gateway* esteja habilitado com um servidor OPC está imediatamente ligada à aplicação anterior [203]. Muitas aplicações de alto nível têm também os seus próprios servidores OPC, possibilitando a troca de informação entre si. Fundada pelos maiores fabricantes de equipamentos industriais, o OPC garante as necessárias ferramentas de suporte à interoperabilidade, o acesso remoto à informação em tempo-real, bem como os necessários mecanismos de segurança, encriptação de dados e protecção contra a intrusão nos sistemas. No endereço *web* da MatrikonOPC [204] podem ser encontradas inúmeras interfaces, na sua maioria servidores OPC, mas não só, que permitem realizar a virtualização das tecnologias envolvidas num sistema global de gestão.

O FDT (*field device tool*) [205] é outro *standard* criado para a maior interoperabilidade entre sistemas de diferentes fabricantes, focado na configuração de dispositivos de campo, mas que permite também observar os dados que se encontram a ser coleccionados. Gerida pelo FDT Group [206], a tecnologia opera como plataforma de entendimento comum entre os dispositivos de campo, e as aplicações de configuração de instrumentos. O PACTware [207] é um bom exemplo de uma plataforma de configuração de instrumentos – sensores e actuadores – independente do fabricante dos mesmos, criada em FDT. Para que um dispositivo seja reconhecido na plataforma é necessário carregar o seu “dicionário” FDT de funções e linguagem – o DTM (*device type manager*) [208].

Para além dos *standards*, também os serviços *web* ganharam popularidade como ferramenta para a interoperabilidade, constituindo o maior contributo para o crescimento da vaga tecnológica designada por “Internet das coisas” (ver 1.2). Estes serviços permitem então consultar um determinado parâmetro de um determinado activo, de qualquer entidade que possua um endereço IP e um serviço próprio para o efeito, virtualizando assim o tipo e a complexidade da fonte da informação. Esta fonte pode ser um sensor inteligente, ou um dispositivo mais complexo como um PLC, bem como uma aplicação de computador. Os serviços *web* permitem ainda diminuir a necessidade em volume de comunicações, uma vez que promovem o processamento local de dados e o serviço de informar sobre o resultado final. A “Internet das coisas” (em inglês: *Internet of things* – IoT) é então uma infra-estrutura de serviços entre entidades com endereço IP e é dessa forma uma ferramenta importante para a interoperabilidade [209].

## 2.4. Discussão e Enquadramento

Neste trabalho são avaliadas diferentes arquitecturas de sistemas remotos de medida e controlo, bem como as formas de construção dos próprios dispositivos envolvidos. Com base na presente avaliação, o caminho a realizar passa por projectar instrumentos e pontos de rede eficazes – com inteligência para realizar tudo o realmente importa para acrescentar valor à gestão dos processos e das instalações industriais – mas que promovam, individualmente e num conjunto em rede, a eficiência dos sistemas, por forma a minimizar os custos de aquisição, instalação e manutenção dos mesmos. Para tal, a estratégia dos

trabalhos realizados passa por materializar redes de instrumentos sem fios, inteligentes e de muito baixo consumo, permitindo assim a necessária ubiquidade. A interoperabilidade é promovida, neste nível, por via das comunicações M2M (ver 1.3) sem IP, por forma a melhor gerir os recursos locais [210]. Num segundo nível do sistema são materializadas redes de banda larga com IP, que comunicam com as redes sem fios de baixo alcance através dos dispositivos de acesso próprios para o efeito – os *gateway*. Sobre as redes IP operam os necessários serviços que permitem a gestão automática das operações por aplicações próprias para o efeito, bem como a consulta por parte de um agente humano (em tempo-real ou ao histórico). Em ambos os casos, os agentes têm apenas de garantir o acesso à *web*.

### 3. ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE SISTEMAS – FACTORES TECNOLÓGICOS

A arquitectura dos sistemas desenvolvidos no âmbito do presente trabalho é constituída por redes sem fios de curto alcance e de baixo consumo, integradas em infra-estruturas de rede de banda larga onde se encontram os consumidores de informação.

Para justificar esta opção é necessário referir alguns aspectos intrínsecos aos perímetros industriais, começando por distinguir os âmbitos da sensorização e da actuação, e daí projectar as implicações na arquitectura de um sistema completo. A actuação industrial estará, na maioria dos processos industriais, associada a acções mecânicas ou electromagnéticas de potência muito superior à disponível em redes sem fios de baixo consumo, o que diminui a probabilidade de implementação de redes sem fios nesta área. Excepções existem, e um exemplo, entre outros, é a actuação luminosa ou sonora, de curta duração, a sinalizar um evento de perigo, roubo ou vandalismo de um activo industrial remoto.

Com tendência diametralmente oposta está a sensorização de variáveis com grande impacto na gestão dos processos e das áreas industriais. Para melhor caracterizar um processo, a ubiquidade da sensorização tenderá a aumentar, promovendo a instalação de dispositivos em locais mais inóspitos e de acesso mais difícil, mas também mais interessantes pela informação aí recolhida. Este é um caminho que só pode ser feito com electrónica de alto desempenho, dispositivos miniaturizados, e tendencialmente limitado às tecnologias sem fios. Neste ponto importa ainda referir que as indústrias de processo efectuem paragens gerais para manutenção numa base plurianual, e com base neste planeamento inviabilizam a implementação de redes de sensores sem fios com necessidades de substituição de consumíveis em períodos inferiores aos destas paragens. O consumível mais crítico num dispositivo sem fios é o seu componente de armazenamento de energia, pelo que as características destas células e a exploração do dispositivo sem fios são pontos absolutamente fundamentais a discutir na origem de um qualquer projecto neste domínio de aplicação. Para a necessária gestão da autonomia do dispositivo é ainda imprescindível a optimização da programação deste. Nos casos em que os sensores vão



estar dependentes da captura energética do meio envolvente será então prudente evitar o recurso a sistemas operativos e a comunicações sobre IP.

Neste trabalho propõe-se assim uma arquitectura de sistema em que os sensores são inteligentes para caracterizar um processo, realizando a monitorização periódica de um ou vários parâmetros vitais, e processam os dados obtidos para comunicar apenas informação relevante (alterações de estado, tendências, ou prova de vida), conseguindo dessa forma gerir a sua pequena autonomia energética. Esta informação é imediatamente veiculada da rede sem fios de baixo consumo para a rede de maior largura de banda, e armazenada em base de dados. Os processos de armazenamento e consulta da informação são realizados sobre IP, com recurso a serviços *web* que tornem ambos os processos interoperáveis com diferentes tecnologias de acesso à informação. Desta forma a informação pode ser consultada por páginas *web*, diferentes na forma e no conteúdo em função do interlocutor, todas criadas de forma simples a partir do mesmo conjunto de serviços *web*. A consulta e análise desta informação podem ainda ser realizadas através de interfaces hospedadas em PC (em máquinas da rede física da base de dados ou com acesso via Internet), ou por aplicações móveis (necessariamente mais “leves”) fáceis de construir e de estabelecer conectividade com a informação armazenada. A realização de análises será mais rápida se puder ser realizada em máquinas próprias para o efeito que não aquelas onde correm as interfaces humanas.

Com esta arquitectura é assim possível caracterizar a condição de activos industriais [211] [212] e de pessoas [95] [213], e aceder à informação em qualquer instante e de qualquer local com conectividade IP [214]. A optimização dos processos de gestão passa em primeiro lugar por não ocupar recursos com matérias que podem ser analisadas por dispositivos na origem dos dados.

### 3.1. Construção de sensores

Um sensor inteligente é um dispositivo capaz de monitorizar uma ou mais variáveis em contínuo, processar dados e validar informação, comparar valores instantâneos de caracterização de um processo com os valores limite (pré-programados) admissíveis para a correcta operação do activo monitorizado, e desencadear a construção de mensagens-tipo, afectas a cada limite ultrapassado: mensagens de alarme correspondentes a limiares de operação; ou mensagens de autodiagnóstico correspondentes a limiares temporais.

Em ambiente industrial, a vantagem dos sensores inteligentes sobre as pontas de prova está precisamente na capacidade de poder de medir com um único dispositivo miniaturizado um conjunto lato de variáveis do processo e realizar o seu próprio diagnóstico, podendo assim caracterizar com maior detalhe o comportamento do activo e do processo onde o sensor se encontra implementado. A sua concepção tornou-se viável com a evolução tecnológica nos circuitos integrados [215] [216] e nos módulos de sensorização – MEMS [217] [218] (dos termos em inglês *micro electro-mechanical system*) – com a crescente capacidade de processamento e de memória, a maior eficiência no processamento, e a redução do tamanho do chip.

A selecção da interface de comunicação (ver 2.1 e 2.2) é um resultado de uma avaliação que envolve, entre outros, os seguintes planos: a dimensão do espaço de implementação da rede de sensores; a cobertura desse espaço por pontos de alimentação do sector; a acessibilidade dos activos onde os sensores vão ser instalados; e até o período e o volume das comunicações. As redes sem fios são mais atractivas nos cenários onde o custo de instalação de cabo tem maior peso na solução global, e são a única solução quando a passagem de cabo compromete a integridade do equipamento a monitorizar. O plano da alimentação tem de ser visto de forma integrada com o período e o volume das comunicações, uma vez que o consumo de energia de um sensor é substancialmente maior quando este transmite. Em 3.1.2 são avaliados os consumos de duas tecnologias sem fios, bem como a autonomia expectável de baterias de referência. Um sensor inteligente é um dispositivo que realiza a monitorização em contínuo (com uma periodicidade superior à taxa de variação do parâmetro), e a transmissão da informação apenas quando é necessário (autodiagnóstico, alertas e alarmes), conseguindo assim ser eficaz no seu serviço e eficiente na sua autonomia. Um sensor suficientemente inteligente tem viabilidade para ser um sensor sem fios.

Os sensores inteligentes sem fios são, por definição, dispositivos com autonomia energética e mobilidade. É objectivo do presente trabalho realizar sensores discretos – pequenos e leves; adaptados ao activo a monitorizar – com projecto de construção mecânica customizado; e com circuitos de electrónica em conformidade com as normas de segurança para ambientes potencialmente explosivos [219] [220]. Em função da classificação do ambiente de implementação, a exigência na protecção contra sobrecargas e sobretensões, bem como os limites de capacitância nos circuitos e no invólucro serão diferentes.

### 3.1.1. Avaliação de alcance e intensidade de sinal

Com base na discussão realizada em 2.2. foram realizados alguns ensaios de alcance, e posteriormente de intensidade de sinal recebida, comparando as camadas físicas do ISM 433MHz e ISM 2,4GHz (IEEE 802.15.4). Para ambas as tecnologias foram desenhadas e testadas placas de circuito impresso (PCB) para 4 antenas monopolares diferentes e 2 circuitos – *balun* – um circuito integrado e um circuito discreto. Estes circuitos fazem a adaptação de impedâncias com conversão do par diferencial em linha de  $50\Omega$  (não balanceada). Os circuitos *balun* para os 433MHz encontram-se explicados em [221], e para os 2,4GHz em [222].

Todas as PCB foram construídas com circuitos integrados da Texas Instruments: CC2530 (para o 2,4GHz) e CC430 (para os 433MHz). Na figura 7 e figura 8 estão ilustradas as PCB para 433MHz e 2,4GHz, respectivamente. Na tabela 5 e tabela 6 encontram-se as características de cada amostra. Todas as antenas são de  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda, à excepção das placas 21 e 25, e do respectivo leitor, cuja antena é de  $\frac{1}{2}$  comprimento de onda. Os testes foram realizados ao ar livre, em estrada sem trânsito. Todas as unidades com antena *whip* foram testadas em caixa metálica de modo a proporcionar um plano de terra sobre a antena [223].

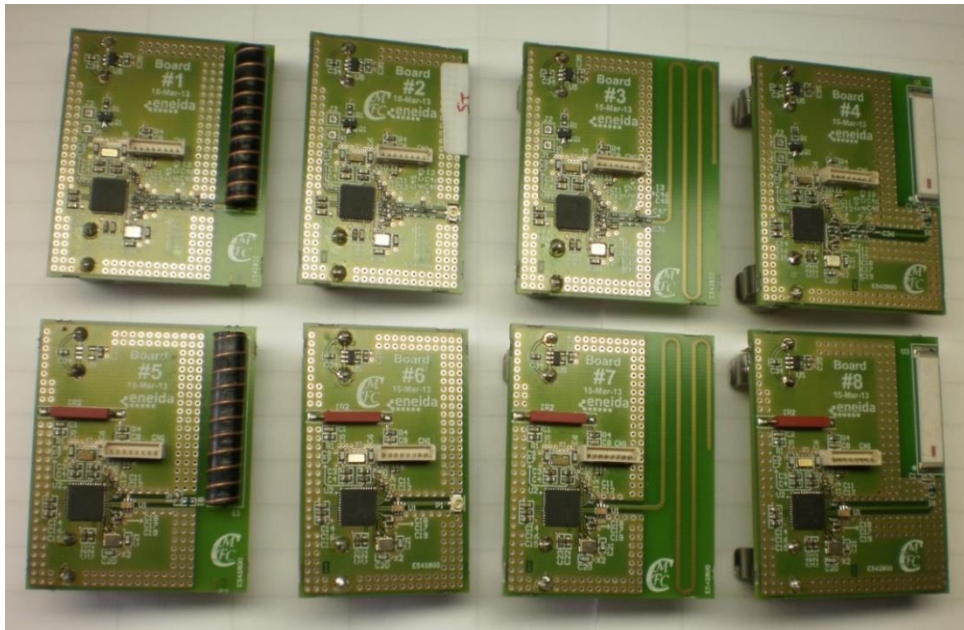


Figura 7: Placas de avaliação dos circuitos RF na banda dos 433MHz.

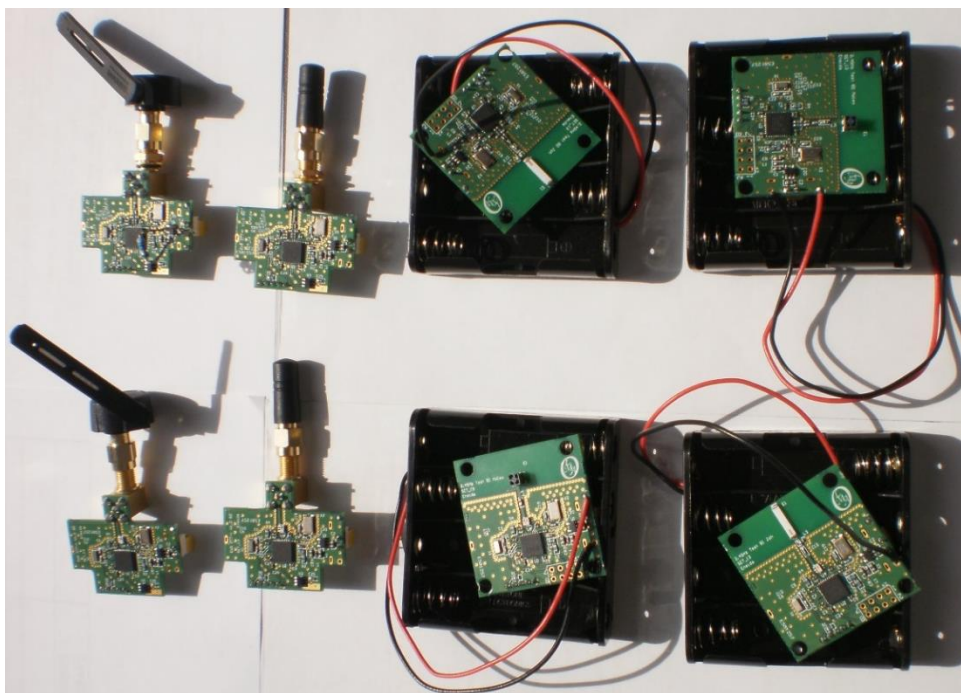


Figura 8: Placas de avaliação dos circuitos RF na banda dos 2,4GHz.

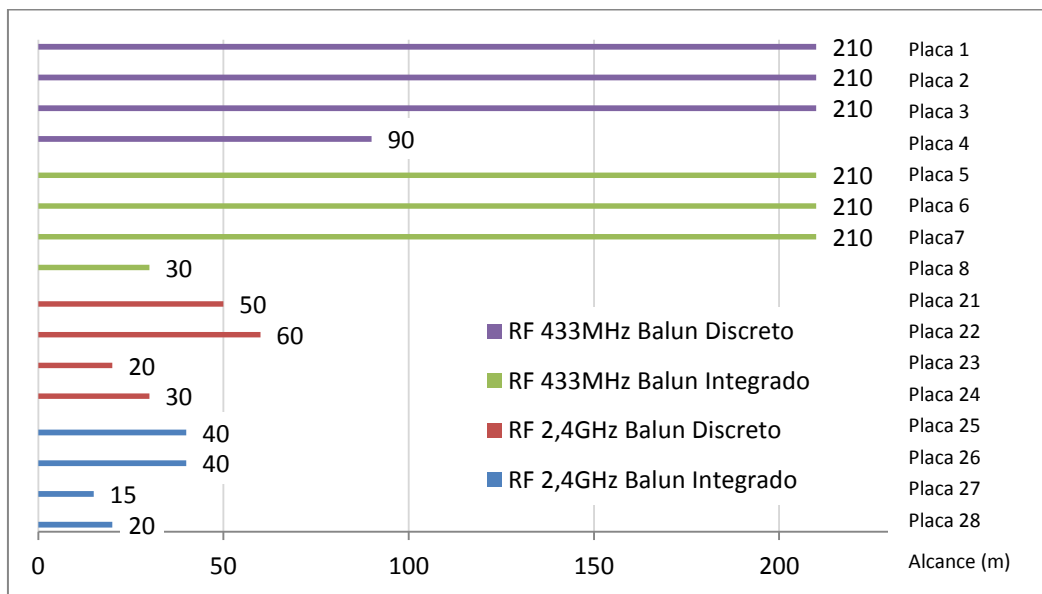
Tabela 5: Tipologia das placas de circuito impresso para os 433MHz.

Combinações de antena e de filtro RF	Antena helicoidal [224]	Antena whip [225]	Antena PCB [226]	Antena chip [227]
Balun Discreto	Placa #1	Placa #2	Placa #3	Placa #4
Balun Integrado	Placa #5	Placa #6	Placa #6	Placa #8

**Tabela 6: Tipologia das placas de circuito impresso para os 2,4GHz.**

Combinações de antena e de filtro RF	Antena whip [228]	Antena whip [229]	Antena helicoidal [230]	Antena chip [231]
Balun Discreto	Placa #21	Placa #22	Placa #23	Placa #24
Balun Integrado	Placa #25	Placa #26	Placa #26	Placa #28

Foi realizado um primeiro teste para avaliação preliminar dos alcances. Neste teste foram colocadas marcas a cada 30m, até a uma distância de 210m, em cada uma das quais foi ligado um PCB de cada vez durante 30 segundos, com um ciclo de transmissão de uma mensagem por segundo. Os módulos 433MHz foram configurados a uma taxa de transmissão de 38,4 kbps, enquanto os módulos 2,4GHz transmitem a 250 kbps, ambos a emitir a uma potência de 10dBm. A avaliação foi realizada a cerca de 1,2m do chão. Os resultados, ilustrados na figura 9, mostram uma clara diferença nos alcances de uma e outra tecnologia, indicando logo aplicações distintas para as redes sem fios numa e noutra banda. Fica claro pelos resultados que as tecnologias mais desenvolvidas, na banda ISM 2,4GHz, têm aplicabilidade em redes de grelha fina (até cerca de 50m). Por outro lado, para realizar a cobertura de uma área maior e de uma forma menos onerosa, a banda ISM nos 433MHz é mais eficiente.



**Figura 9: Alcance máximo para a detecção de mensagens por parte do PCB de teste e do dispositivo receptor.**

Com base nos resultados preliminares, e com o objectivo de servir aplicações no âmbito do segundo cenário referido, foi realizada uma segunda avaliação, mais fina, das PCB que atingiram os 210m no teste preliminar, todos na banda de frequência ISM 433MHz. O teste foi realizado com as mesmas configurações dos módulos RF, mas agora em marcas de 25m, até aos 400m. Para cada módulo foi avaliado o RSSI da mensagem enviada pela PCB de teste

medido pelo receptor (índice 'r'), e o RSSI do eco desta mensagem medido pelo PCB de teste (índice 't'). Foi ainda avaliada a taxa de entrega de mensagens.

Os resultados, ilustrados em figura 10-figura 15, permitem-nos perceber que as antenas helicoidal – interior a uma caixa plástica, com plano de terra criado no PCB – e *whip* – exterior a uma caixa de alumínio – obtêm resultados próximos, melhores do que a antena de PCB – interior a uma caixa plástica, com plano de terra criado no PCB. O *balun* discreto volta a ter melhor desempenho que o integrado, embora não seja significativa esta diferença. Em processo de produção, o custo reduzido da utilização do circuito integrado pode compensar a diminuta diferença no desempenho das unidades.

A taxa de entrega de mensagens permite-nos garantir que as comunicações são robustas até aos 200m, com as 3 antenas, sendo que o melhor desempenho (até à primeira queda) está para antena exterior com 250m com *balun* discreto. As unidades com *balun* integrado garantem todas a necessária robustez aos 175m e quebram todas aos 200m.

#### 3.1.1.1. Avaliação da influência do epóxi na propagação RF

Os cenários industriais de implementação dos sensores sem fios implicam muitas vezes sujeitar os instrumentos a maior vibração, impactos mecânicos e humidade, obrigando a garantir a estanquicidade e a robustez mecânica da electrónica, bem como suprimir pontos frágeis como as antenas exteriores. Um dos agentes que garante esta robustez e também serve a necessidade da estanquicidade é a resina epóxi. Ainda que esta resina não tenha componentes metálicos, uma vez curada, esta resina torna-se um monobloco duro, constituindo um obstáculo à propagação de radiofrequência dos dispositivos construídos com antenas interiores. O impacto desta utilização foi avaliado com duas unidades PCB 1 e PCB 5, encapsuladas numa caixa de material ABS, para uma distância de 50m, através da medida do RSSI. O receptor é o mesmo dos testes anteriores, assim como a potência de emissão das PCB de teste (10dBm). Os resultados, apresentados na tabela 7, mostram para esta distância uma diferença média de cerca de 15dBm, concluindo assim que o impacto existe e pode ser significativo para distâncias maiores.

**Tabela 7: Influência do epóxi na propagação RF.**

Medida de RSSI (dBm)	Placa #1	Placa #5
Com epóxi	-84.33±1,46	-86.13±1,40
Sem epóxi	-72,56±1,11	-73,62±1,30

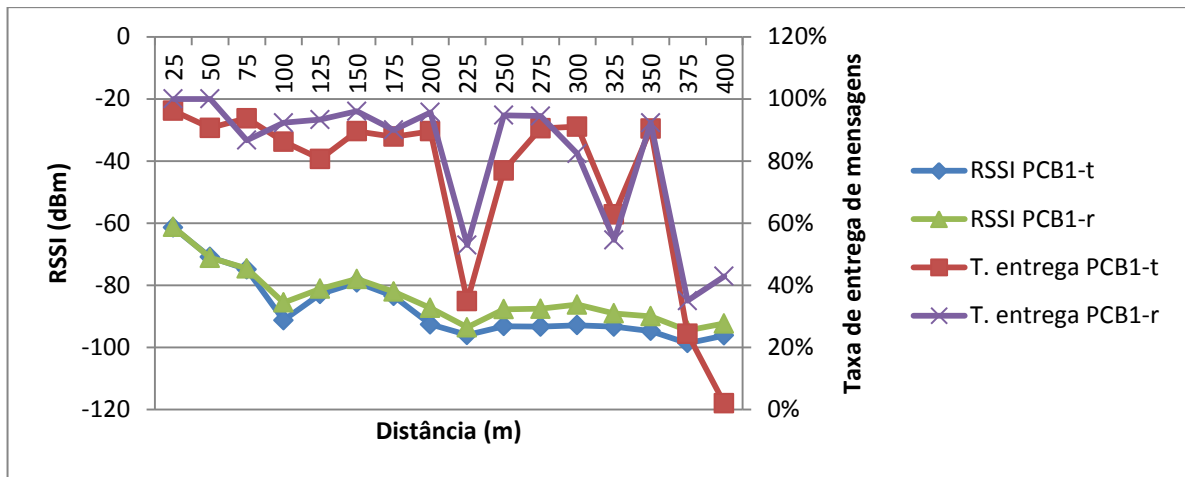


Figura 10: PCB 1 - Circuito de *balun* discreto e antena helicoidal.

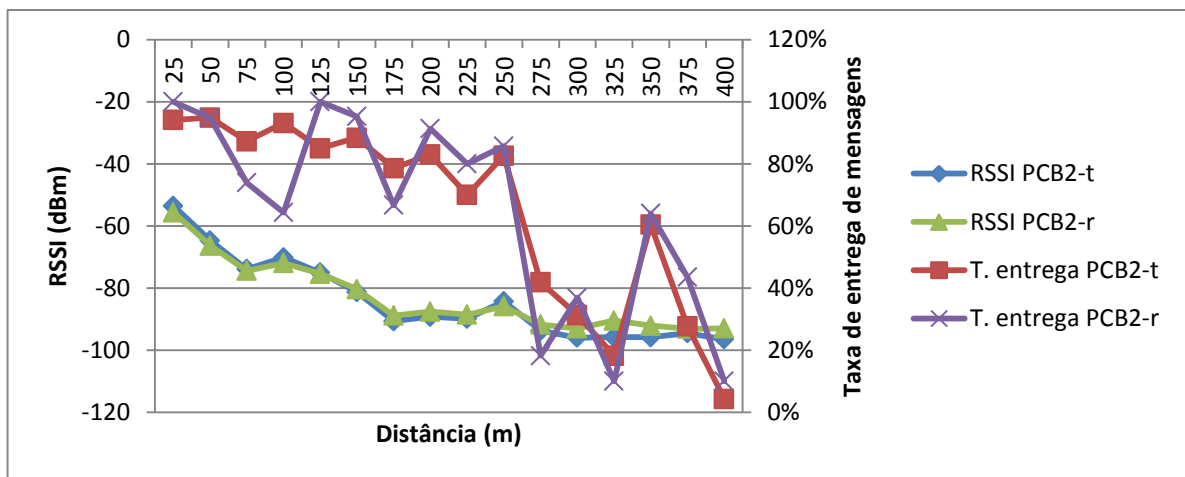


Figura 11: PCB 2 - Circuito de *balun* discreto e antena *whip* exterior.

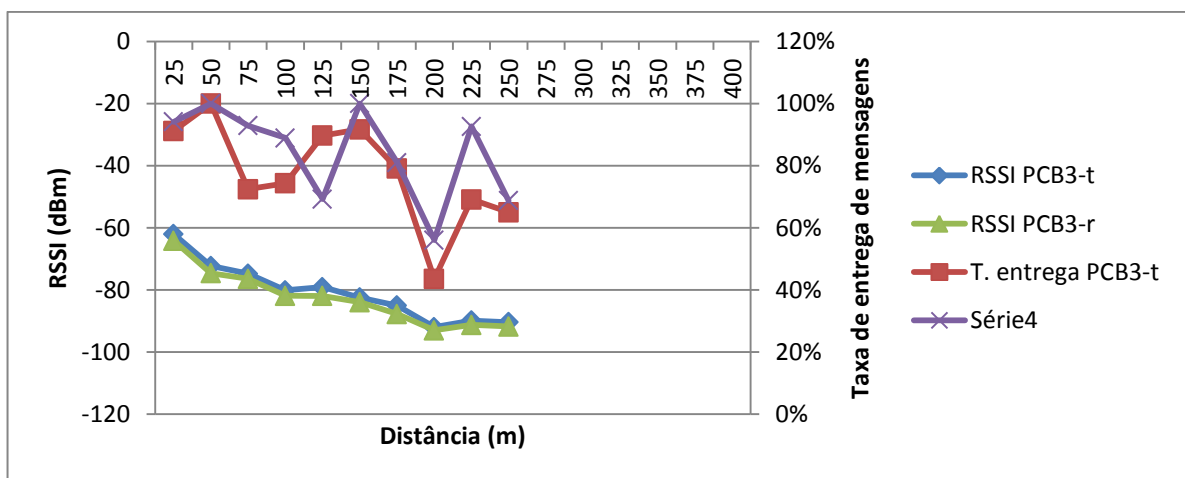


Figura 12: PCB 3 - Circuito de *balun* discreto e antena PCB.

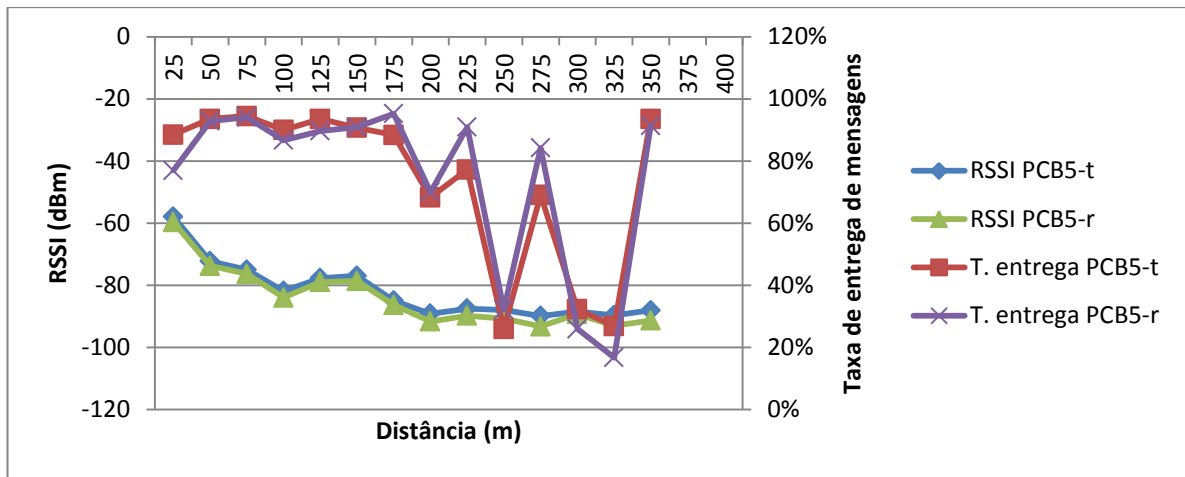


Figura 13: PCB 5 – Circuito de *balun* integrado e antena helicoidal.

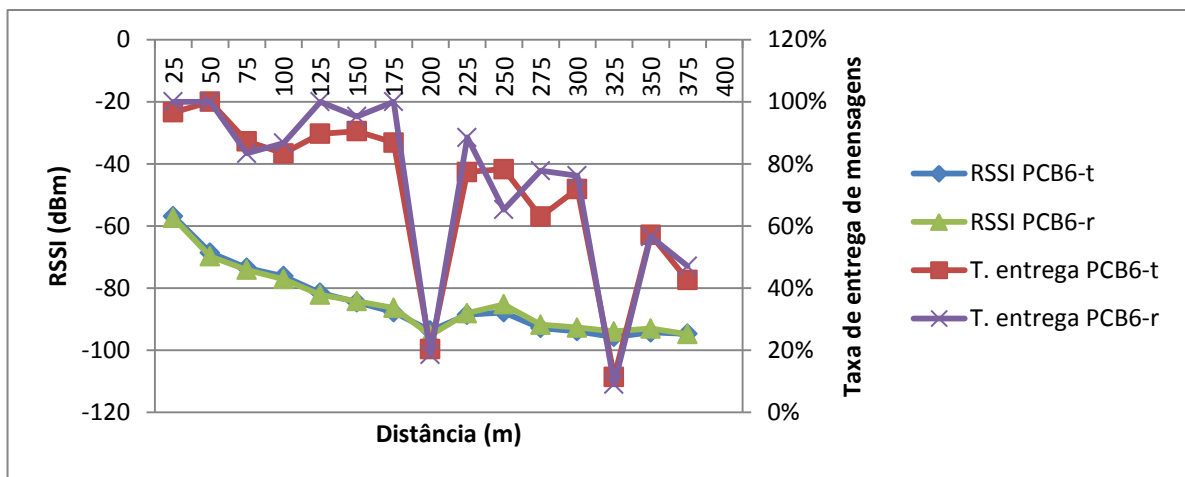


Figura 14: PCB 6 – Circuito de *balun* integrado e antena *whip* exterior.

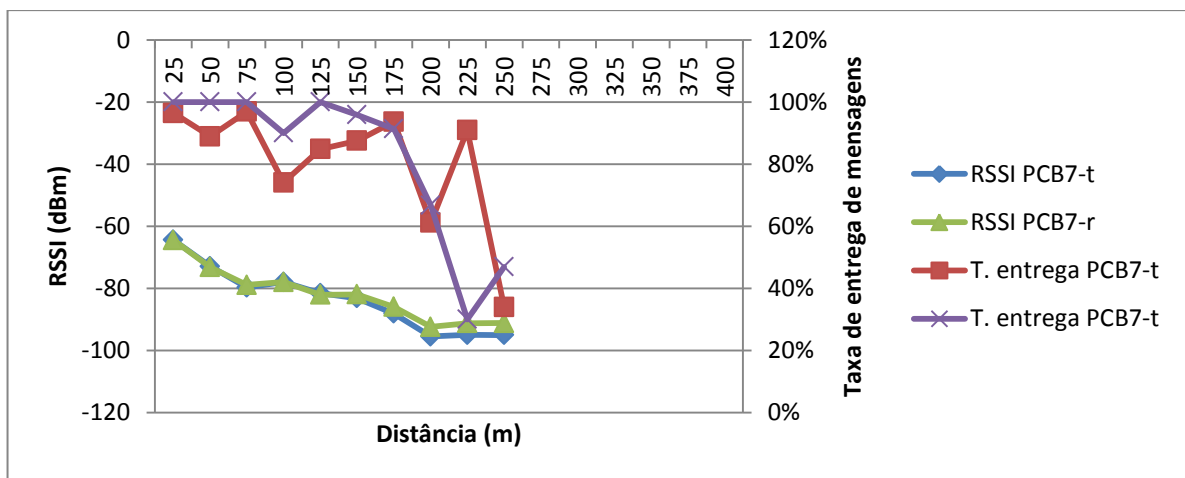


Figura 15: PCB 7 – Circuito de *balun* integrado e antena *chip*.



### 3.1.1.2. Avaliação de módulos wirelessHART

A tecnologia HART está fortemente presente nas indústrias de processo, e este facto promove a disseminação do wirelessHART nestes sectores. Esta tecnologia sem fios tem sido portanto alvo de muita dedicação para garantir a fiabilidade e robustez exigidas por estes sectores [232]. Neste trabalho, e em colaboração com a **GE** [233], foi realizado um teste de alcance e capacidade de rearranjo da rede, composta por unidades fornecidas pela GE: um posicionador inteligente **SVI II AP** [234], dois adaptadores wirelessHART **VECTOR V1100** [235], e um *gateway* da marca **Pepperl+Fuchs** [236].

Os ensaios, realizados nas instalações da eneida® em Coimbra, tinham como objectivo aferir distâncias máximas entre os nós e tempos de ligação à rede, com os adaptadores configurados para emitir a 10dBm. Os resultados, apresentados no relatório [237], mostraram que a ligação de um adaptador ao *gateway* leva em média 2 minutos a ser estabelecida. Para aferir o alcance foi criada a rede ilustrada na figura 16. Foram instalados um posicionador com adaptador sem fios na sala WSG (à esquerda na figura 17), um segundo adaptador na sala SSG (ao centro na mesma figura) e o *gateway* instalado num veículo na rua (à direita na figura 17), ligado a um PC portátil. A rede só foi estabelecida após se mover o adaptador da sala SSG para o ponto ilustrado a laranja (figura 17), sendo que o segundo adaptador levou 8 minutos a ligar-se à rede.



Figura 16: Esquema da rede wirelessHART.

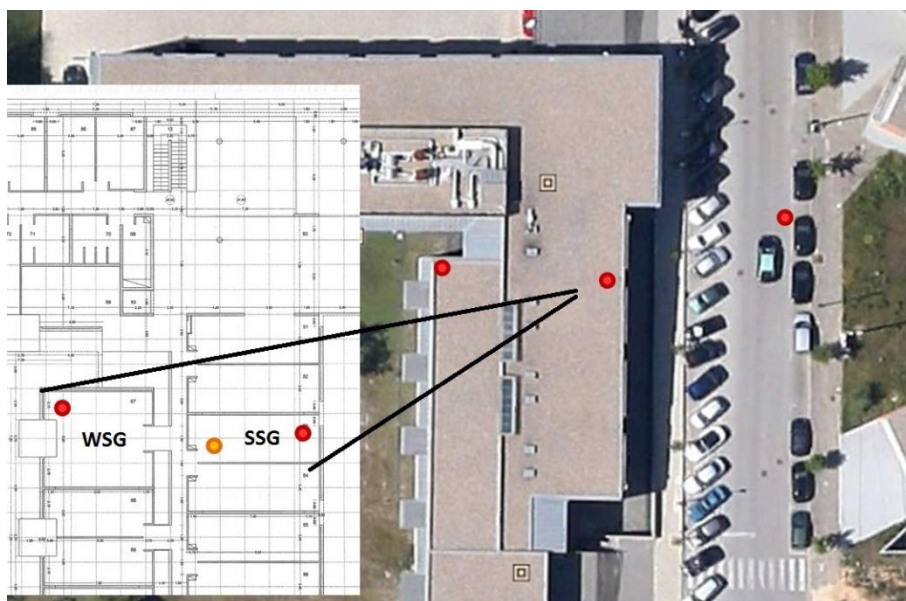


Figura 17: Local do ensaio à rede wirelessHART.



Os resultados obtidos não foram os esperados para a tecnologia em teste. A configuração da rede com um ponto repetidor foi possível com uma distância de 12m para o posicionador, e de 27m para a *gateway*, e uma vez procurando a linha de vista possível entre eles, através das portas entre as salas e janela da sala SSG.

A antena do dispositivo adaptador é a tampa plástica do invólucro metálico onde se encontra encapsulado. No âmbito deste trabalho não houve oportunidade para realizar testes com outros dispositivos wirelessHART, no entanto, e olhando para os testes realizados já apresentados na secção 3.1.1, é expectável que um antena *whip* exterior ao dispositivo permita obter maiores alcances.

### 3.1.2. Avaliação de consumos e autonomia

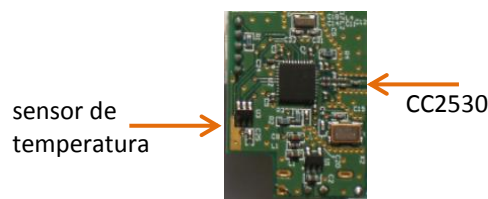
No início deste capítulo foi referida a necessidade de um dispositivo sem fios ter uma autonomia correspondente ao tempo entre paragens gerais de manutenção. Este aspecto tem ainda maior impacto quando se trata de um sensor instalado em local inacessível ou num activo que exija a sua consignação para ter acesso ao sensor [212]. As tecnologias de captura de energia do meio envolvente constituem uma boa resposta a esta condição. O projecto de construção de um sensor é assim função dos seus requisitos de autonomia e quadro de operações. Sobre estes requisitos ter-se-á então de especificar um modo de funcionamento que cumpra as operações e que minimize o consumo eléctrico, por forma a dimensionar correctamente o seu armazenamento de energia.

Nos processos industriais, as células de armazenamento de energia podem encontrar-se expostas a grandes variações de temperatura. Quando alimentam sensores inteligentes sem fios estão também sujeitas a picos de exploração decorrentes do uso do módulo de radiofrequência. O tempo de vida das baterias depende muito da amplitude destes dois parâmetros. As baterias recarregáveis comuns estão sujeitas a uma condição adicional – o processo de carregamento está limitado a uma temperatura inferior ao limiar de operação. Esta característica reduz a oportunidade destas células nos meios industriais, onde as redes sem fios podem estar sujeitas à exposição solar. Em alternativa, os supercondensadores são células robustas perante as variações de exploração e de temperatura, e conseguem realizar o processo de carga próximo do limite superior da temperatura de operação [238], o que em condições extremas os coloca em melhor posição (face às baterias) para responder o requisito autonomia. Os supercondensadores, em comparação com baterias de iões de lítio, têm menor densidade de energia por volume, e são dispositivos mais onerosos (à data), mas permitem também uma maior exploração da carga existente (quase completa), e maior número de ciclos de carga (cerca de 5 vezes). Com estas características, e em instalações com franca disponibilidade de energia do meio envolvente, os supercondensadores permitem uma maior autonomia.

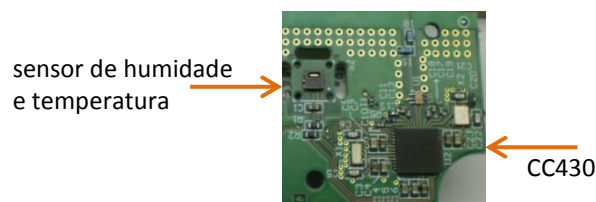
Em ambientes potencialmente explosivos, em particular para os dispositivos certificados como intrinsecamente seguros [219], as células de armazenamento de carga e os seus contactos estão obrigados a uma cobertura que garanta a não ocorrência de descargas eléctricas para o interior do invólucro. Esta regra diminui a oportunidade da substituição da célula de carga. Quando coberta com resina epóxi (já referida na avaliação do alcance de

sinal rádio em 3.1.1) – recomendado pelas entidades acreditadas – a substituição da célula não é possível. A selecção da tecnologia de fornecimento de energia para os dispositivos certificados deve então ser aquela que lhe confere a maior autonomia.

A autonomia de um dispositivo sem fios é função da disponibilidade de energia e dos consumos das operações de processamento e comunicação. No âmbito do presente trabalho foram comparados os consumos dos processos fundamentais de um sensor sem fios para as duas tecnologias de comunicação avaliadas em 3.1.1. Para esta avaliação foram usados dois protótipos de sensores inteligentes: um com operação na banda ISM 2,4GHz e outro na banda ISM 433MHz, ilustrados nas figuras figura 18 e figura 19.



**Figura 18: Protótipo de sensor de temperatura (2,4GHz).**



**Figura 19: Protótipo de sensor de humidade e temperatura (433MHz).**

Os dois protótipos são de construção muito semelhante. O primeiro é baseado num microprocessador CC2530 [239] e o segundo no CC430 [240], ambos da marca Texas Instruments. Ambos estão habilitados com um sensor digital ligado ao microprocessador, o primeiro de temperatura [241] e o segundo de temperatura e humidade [242]. O sensor que opera na banda ISM 2,4GHz foi programado com a pilha protocolar Z-Stack™ Energy [243] – conforme a norma ZigBee Smart Energy (2.2.3) – sobre a qual se definiram os processos de leitura da temperatura e de transmissão de mensagens para o receptor. Já o sensor que opera na banda ISM 433MHz foi programado com um protocolo mais simples – o SimpliciTI™ [172]. Ambos os sensores foram configurados para obter e transmitir uma medida por minuto, a 10dBm e a 25m da unidade de recepção.

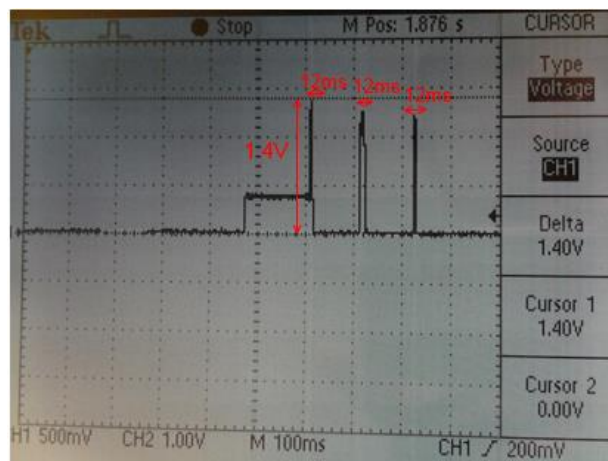
Na tabela 8 apresentam-se os valores de corrente obtidos no osciloscópio para o processamento, transmissão de mensagem, recepção do eco, e o consumo em modo adormecido. Os consumos em modo adormecido e em modo de aquisição e processamento são próximos num e noutro sensor (quando a trabalhar à mesma frequência). Ainda que o segundo obtenha dois parâmetros e o primeiro apenas um, é o tempo de construção de mensagem, nomeadamente a criação da sequência PN (ver 2.2.1.2) que constitui a diferença

do intervalo de tempo de processamento. As diferenças de consumo na recepção e na transmissão justificam-se também nas diferentes tecnologias de camada física e de rede. O sensor que opera na banda ISM 2,4GHz tem desde logo menor alcance, o que significa que vai receber a mensagem com menor intensidade de sinal, implicando um ligeiro maior consumo (o tempo de recepção foi fixado em 100ms para ambos os sensores, tempo após o qual a unidade adormece). A diferença maior, em energia e em tempo, está na reconstrução do sinal espalhado. Na transmissão existem dois factores que constituem a diferença apresentada: o uso do DSSS (ver 2.2.1.2) que implica maior distribuição e uso de energia; e o processo de adesão à rede que obriga a um maior número de comunicações, neste caso 3 (como ilustrado na figura 20). Para ambos, o tempo de transmissão não depende tanto do tamanho da mensagem, mas sim no acesso ao meio por CSMA.

Com estes perfis de operação, o protótipo ZigBee consome **67µA** por ciclo de trabalho. Já o protótipo nos 433MHz consome **28µA**. Considerando a alimentação do sensor através de uma bateria com capacidade de 2100mAh [244], e a exploração desta até 25% da sua capacidade, os sensores têm uma autonomia de 30 e 72 meses, respectivamente.

**Tabela 8: Consumos medidos com recurso a um osciloscópio.**

Consumos	Processamento (medido)	Processamento (especificado)	Recepção (medido)	Transmissão (medido)	Adormecido (medido)
<b>Protótipo 2,4GHz</b>	8,3mA x 132ms (32MHz)	3,40mA (16MHz)	27,1mA x 50ms (-82dBm)	31,9mA x 12ms x 3 (10dBm)	7µA
<b>Protótipo 433MHz</b>	1,45mA x 54ms (8MHz)	3,45mA (16MHz)	17,4mA x 50ms (-57dBm)	31,5mA x 9ms (10dBm)	7µA



**Figura 20: Processo de aquisição de temperatura, adesão à rede e transmissão de mensagem do protótipo que opera nos 2,4GHz [8].**

### 3.1.3. Avaliação em temperatura

O protótipo 433MHz (referido em 3.1.2) foi montado com antena externa (e extensão de antena), a bateria referida, e foi alvo de um teste de comportamento em temperatura, de 2 dias, num forno gentilmente cedido pelo Laboratório de Materiais do IPN [245]. O forno foi parametrizado com intervalos de temperatura de 10°C e 5°C entre 50°C e 85°C, em intervalos de uma hora, sequenciais, passando a noite a 50°C, como se indica na tabela 9.

**Tabela 9: Teste de temperatura.**

T (°C)	50°C	60°C	70°C	80°C	85°C
$\Delta t$ (h)	9h30-10h30	10h30-11h30	11h30-12h30	12h30-13h30	13h30-14h30
	17h30-9h30	16h30-17h30	15h30-16h30	14h30-15h30	

O teste revelou que o sensor mede correctamente a temperatura (dentro do erro indicado na folha de especificações [242], e ainda que a electrónica e a bateria podem operar a esta temperatura, ainda que por períodos de teste tenham sido curtos.

No seguimento deste teste foi solicitado à marca SAFT, através do formulário próprio da marca, uma avaliação de uma bateria para o regime de operação apresentado na tabela 10, numa circunstância de país e activo a monitorizar especificado na tabela 11. Trata-se assim de simular o comportamento da bateria para um sensor genérico a medir um parâmetro a cada quarto de hora e a comunicar o seu autodiagnóstico duas vezes por dia, aguardando por nova reparametrização quando se liga à rede sem fios, e instalado num activo de um processo industrial num país do médio oriente.

**Tabela 10: Especificação de um regime de operação.**

Fase	Corrente	Duração	Período
<b>Modo adormecido</b>	10 $\mu$ A	Permanente	
<b>Pulso 1</b>	5mA	200ms	15min
<b>Pulso 2</b>	30mA	500ms	12h

**Tabela 11: Especificação da temperatura do equipamento durante um ano.**

T (°C)	0°C	20°C	45°C	60°C	85°C
$\Delta t$ (%)	5%	20%	60%	10%	5%

A resposta da SAFT, no relatório [246], sugere o uso da bateria LS 17330 [244] e de um condensador de suporte aos picos de 30mA, no valor de 22mF. O autor somou 5 $\mu$ A ao consumo permanente para compensar as perdas de carga para este condensador. O autor considerou ainda 2 meses de armazenamento da bateria a 25°C (sem consumo), e duas semanas de operação no dispositivo não instalado (a 30°C, com um consumo de 10 $\mu$ A).

No relatório é estimada uma autonomia média de 3,9 anos (3,5 no mínimo, com 3 $\sigma$ ). O autor conclui que as temperaturas elevadas (acima dos 40°C), e em tão longa duração, têm um efeito muito negativo sobre a bateria. O autor refere ainda que a tecnologia – Li-SOCl<sub>2</sub> – não é a mais indicada para solução e que não existe melhor oferta na SAFT. A Tadiran [247] tem uma oferta alargada a gama militar com temperaturas nominais até 125°C.

### 3.2. Construção de redes

As redes de informação industriais servem os dispositivos de monitorização, os agentes de análise e decisão, e os dispositivos de actuação. Entre os anteriores existem ainda os agentes repetidores de informação. Neste quadro, e com base na circunstância de cada processo, o projecto de redes será construído com as tecnologias mais adequadas.

A monitorização de parâmetros pode ser realizada de forma mais inteligente e autónoma, como descrito na secção anterior, ou de forma mais transparente e dependente de outras unidades. Em particular, o dispositivo que concentra a aquisição de diferentes variáveis e que apenas converte dados em mensagens, transmitindo-as de forma transparente (sem análise de dados), é um agente sem autonomia na decisão, e portanto obrigado a comunicar com maior frequência, perdendo assim a possibilidade de ser autónomo em energia. Este tipo de dispositivo ganha maior oportunidade quando o critério de decisão é dúbio ou inexistente, promovendo a construção de algoritmos mais complexos em máquinas de cálculo com maior capacidade de processamento. Como já foi referido no início deste capítulo, os dispositivos de actuação, com maior ou menor inteligência, disponibilizam níveis de energia fora do quadro de especificações dos dispositivos sem fios. É este o quadro de oportunidade das redes de campo.

A modernização dos processos industriais torna mais franco o volume de informação, e força a distribuir dos agentes de análise e decisão por ser a forma mais eficiente de gerir essa mesma informação. É este o quadro de oportunidade das redes sem fios. Redes de campo e redes sem fios coexistem assim nos processos industriais e estão interligadas por dispositivos *gateway* (ver figura 6 em 2.2.4.1) – membros de duas sub-redes de tecnologia diferente [198]. As redes sem fios de baixo consumo têm também alcance limitado (como foi descrito em 3.1.1) pelo que a sua construção pode depender de dispositivos repetidores. Os repetidores e *gateways*, são então unidades que garantem o serviço de comunicação aos dispositivos inteligentes sem fios, e asseguram ainda a necessária segurança no acesso à rede e a fiabilidade das comunicações no canal rádio. Por prestarem um serviço, a alimentação destas unidades está, comumente, assegurada pela rede eléctrica.

Para além do alcance, as redes sem fios de baixo consumo vêem o sua largura de banda diminuir com as retransmissões de mensagens, dado que esta retransmissão constitui uma

nova mensagem a ocupar. Para evitar congestionar a rede sem fios, especialmente quando o número de mensagens é elevado, a rede deve ser construída com mais do que um *gateway* de modo que cada um tenha a possibilidade de gerir um grupo de nós. Na secção seguinte é apresentado um estudo numérico do desempenho de uma rede ISM 433MHz.

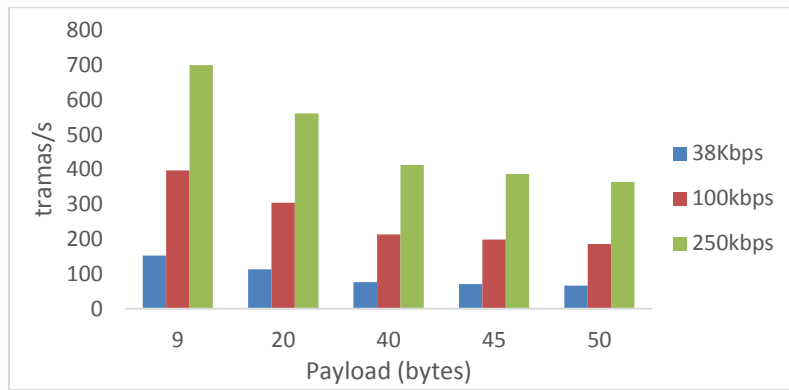
### 3.2.1. Avaliação do canal RF

O desempenho das redes a operar na banda ISM 2,4GHz e baseadas em IEEE 802.15.4, tem sido largamente simulado e avaliado sob diferentes parâmetros, como o atraso e a perda de pacotes [248], bem como comparado com medidas reais [249]. No trabalho [250] é avaliado o desempenho de uma rede em duas arquitecturas de operação distintas – canal fixo e variação síncrona do canal de operação. Com o objectivo de conhecer as limitações das redes sem fios de baixo consumo com maior alcance, e no âmbito do projecto de localização de pessoas (ver capítulo 5), foi realizado um estudo [251] do desempenho de uma rede a operar na banda ISM 433MHz, baseada no protocolo SimpliTI [172]. O estudo teórico foi realizado para diferentes taxas de transmissão; tamanhos da componente de aplicação da mensagem (*payload*); e número de nós da rede; e número de tentativas de acesso ao meio por parte de uma percentagem dos nós.

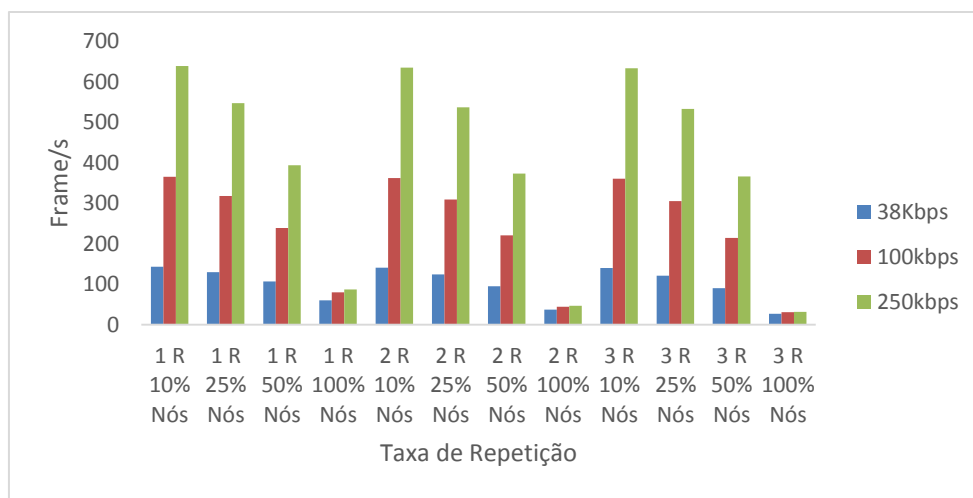
O simulador desenvolvido em [251] tem em conta os vários parâmetros do mecanismo de acesso ao meio do SimpliTI. Os resultados da avaliação estão apresentados nas figuras figura 21, figura 22 e figura 23. Na figura 21 contabiliza-se o número máximo de mensagens que é possível entregar com sucesso, em função do tamanho da trama e da taxa de transmissão, e assumindo que o nó consegue transmitir a mensagem na sua primeira tentativa. O primeiro grupo de avaliação tem um *payload* de 9 bytes correspondente ao protocolo de aplicação proprietário da eneida®. Como é espectável, a capacidade da rede diminui para um o maior número de nós, e aumenta com a maior largura de banda.

Na figura 22 são extrapolados os números máximos de mensagens considerando 1, 2 e 3 tentativas de retransmissão (1R, 2R e 3R, respectivamente), para percentagens diferentes dos nós da rede e diferentes taxas de transmissão, considerando o *payload* do protocolo de aplicação da eneida®. O gráfico mostra uma maior dependência do número de nós que retransmite, sendo pouco significativo o número de tentativas executado no acesso ao meio.

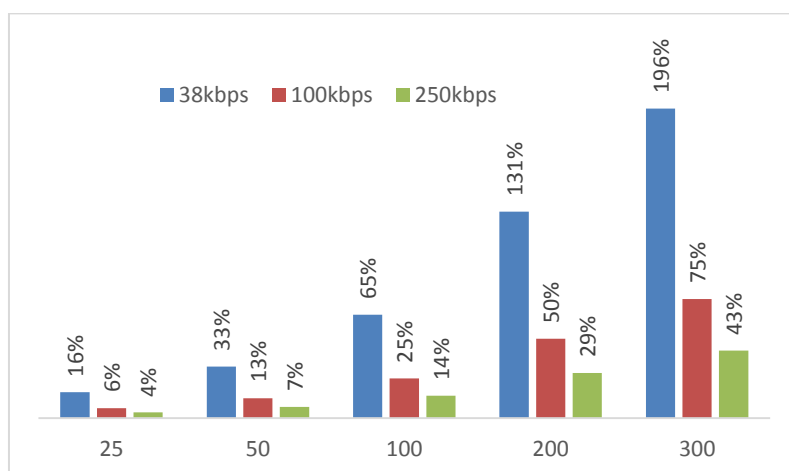
Na figura 23 estão representadas as taxas de utilização da rede em função do número de nós da rede, considerando a transmissão de uma mensagem por segundo, para o protocolo de aplicação da eneida®. No trabalho [143] são avaliados os débitos de redes baseadas em CSMA, onde se apresentam resultados de simulação para métodos não persistentes que apontam para uma eficiência na ordem dos 30% da utilização do canal para muitos nós, baixando para cerca de 20% para mensagens mais pequenas. No sentido de evitar colisões, e ainda que não se tenha avaliado a probabilidade de colisão, o gráfico permite indicar que a taxa de 38,4kbps possibilita uma utilização segura da rede até 50 nós, sendo aconselhável o uso de 100kbps para um número de nós em torno dos 100, a partir do qual se torna mais seguro usar 250kbps.



**Figura 21: Capacidade máxima das comunicações.**



**Figura 22: Capacidade máxima das comunicações em função do número de tentativas (CSMA), para um payload de 9 bytes.**



**Figura 23: Taxa de utilização da rede com o protocolo eneida® (9 bytes de payload), em função do número de nós da rede.**

### 3.2.1. Configurações de rede

No âmbito dos trabalhos da eneida® foram desenvolvidos *gateways* para as redes IEEE 802.15.4 na banda ISM dos 2,4GHz [198] e para as redes de protocolo proprietário na banda ISM 433MHz, para as interfaces de campo CAN e Modbus. As unidades CAN servem as redes sem fios de duas formas: quando ligadas fisicamente ao barramento *core* do sistema (que possui um *gateway* com a rede de banda larga) reencaminham as mensagens da rede sem fios para o sistema; quando ligadas a barramentos secundários, que constituem ilhas de dispositivos de maior consumo de energia, servem de nó sem fios a este conjunto de equipamentos. As unidades Modbus também têm este comportamento duplo: podem ser o *gateway* de uma rede de sensores sem fios, armazenando as mensagens e respondendo a um *master* do barramento; ou podem elas ser o master de uma rede Modbus e constituírem o módulo rádio desse barramento.

Foram ainda desenvolvidas versões de *gateway* para GPRS [252]. Estas unidades servem o propósito de colocar na *web* as mensagens de uma rede sem fios de baixo consumo. O GPRS é uma tecnologia de rede móvel com maior cobertura de rede, mas constitui um estrangulamento na largura de banda do sistema remoto, pelo que a sua oportunidade de aplicação está nas redes remotas de sensores inteligentes.

Nos capítulos seguintes são apresentados os casos de aplicação desenvolvidos no âmbito do presente trabalho. Em 5.9.1 é realizada uma análise de detecção e leitura de intensidade de sinal com dispositivos em movimento.



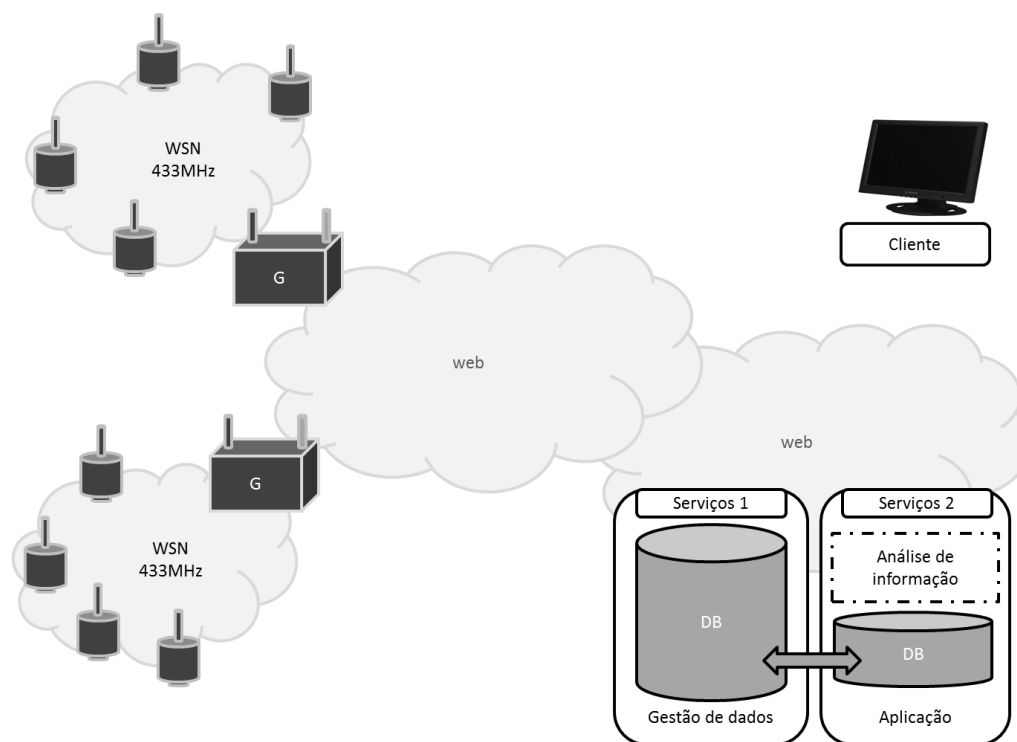
## 4. GESTÃO DE ACTIVOS INDUSTRIAIS REMOTOS

Os activos industriais são equipamentos, caracterizados por estar em esforço contínuo, e dos quais depende a produtividade de um processo ou mesmo a realização de um serviço. A boa condição do activo é portanto fundamental, e a sua monitorização contínua essencial para gerir a sua manutenção. O objectivo deste processo é claro, impedir a quebra de produtividade ou de serviço. A monitorização contínua permite assim, em função da análise de tendência da condição do activo, agendar o recurso a activos alternativos por forma a realizar as necessárias acções de manutenção aos primeiros, sem pôr em causa o objectivo enunciado.

### 4.1. Estações de serviços de interesse geral

Os serviços de interesse geral são suportados em redes de distribuição do produto-serviço, instalada por todo um país e muitas vezes interligada com as redes homólogas dos países vizinhos. Do ponto de produção, de extracção ou do reservatório, até ao cliente final, o produto-serviço é distribuído através desta rede e das suas estações que procedem às necessárias conversões dos níveis de transporte para os da distribuição (pressão ou tensão). Em função do tamanho da rede, podem existir diferentes níveis de distribuição e um elevado número de estações, pelo que é de todo eficiente que as mesmas sejam geridas remotamente através de acesso à Internet.

Nesta secção é apresentado um caso-estudo de um sistema de monitorização da condição de funcionamento de órgãos e activos em subestações da rede eléctrica, responsáveis pela interface com a rede de transporte de energia a 60KV, pela transformação desta tensão em 15KV, e pela interface com a rede de distribuição de energia a 15KV [212]. A solução envolve a sensorização inteligente – monitorização em contínuo, detecção de eventos, tratamento de informação, diagnóstico e comunicação remota da informação. Para perceber melhor a dimensão deste cenário importa dizer que Portugal tem cerca de 400 subestações com esta tipologia. De referir ainda que acima destes níveis existe a infra-estrutura de 400KV e a rede de transporte a 220KV. Abaixo dos 15KV existe a rede de 230V. Na figura 24 apresenta-se a arquitectura geral da solução.



**Figura 24: Arquitectura do sistema de monitorização de subestações.**

Este projecto envolveu a monitorização de 3 subestações, duas em Coimbra e uma em Évora, bem como a implementação de um centro de informação da rede de distribuição (CIRD) também este em Coimbra. O bloco designado na figura 24 como “Serviços 1” incorpora os serviços de recepção da informação das subestações remotas e registo na base de dados, bem como o serviço de data e hora para diagnóstico das comunicações do sistema. As mensagens aqui recebidas incluem já a data e hora da sua criação na origem, hora e data que são actualizadas via *web* em cada subestação. O bloco designado por “Serviços 2” garante o acesso à informação e aos métodos de análise disponíveis no CIRD. Estes serviços podem ser acedidos através da *web* e por meio de API próprias para este efeito. Os serviços são baseados em XML [253]. Desta forma, optimiza-se a gestão dos recursos dos equipamentos de análise e consulta remota da informação, promovendo ainda o menor consumo de energia por parte dos terminais remotos.

Na figura 25 está representada a distribuição de sensores numa das subestações de Coimbra. No grupo 1 foi instalado um barramento CAN com sensores de correntes (I) e sensores de vibração e temperatura (V), em celas dos órgãos disjuntores de circuitos de 15KV. No mesmo barramento encontram-se conectados os dispositivos *gateway* para a WPAN 433MHz e para a *web* via GPRS, que se encontram instalados no grupo 2. Representados no grupo 3 estão dois transformadores de 60KV para 15KV e respectivos disjuntores de entrada. Cada transformador foi equipado com um sensor de vibração e temperatura [254] (no seu topo) e um sensor de correntes (no seu quadro), ligados por um barramento CAN a um *gateway* que é nó transmissor sem fios deste pequeno grupo (ver figura 26). Ainda no grupo 3, os disjuntores foram equipados com um sensor de vibração e temperatura sem fios [255].



Figura 25: Esquema da rede da subestação do Alto de S. João (Coimbra).

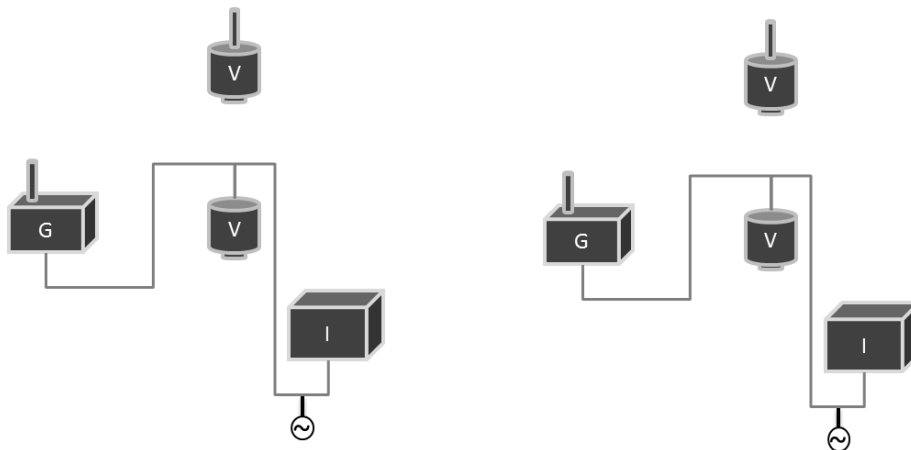


Figura 26: Sensores do grupo 3 - transformadores 60KV-15KV.

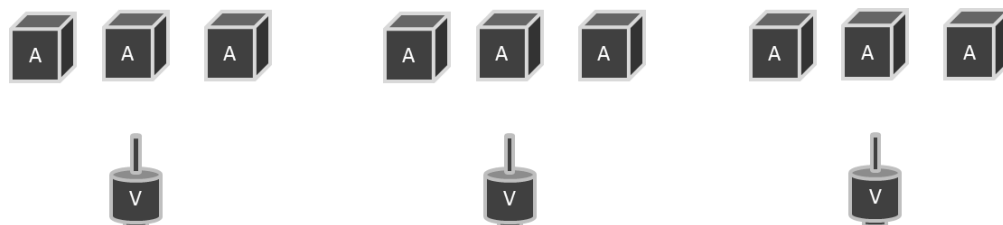


Figura 27: Sensores do grupo 4 - seccionadores de alta tensão.

No grupo 4 figuram os seccionadores dos 3 circuitos trifásicos que atravessam esta subestação. Neste grupo foram instalados 3 sensores inteligentes de vibração e temperatura, sobre os disjuntores de cada conjunto trifásico. Foram ainda instalados sensores inteligentes de alinhamento (A), um em cada seccionador, no total de 9 unidades (ver figura 27).

Sendo o objectivo deste trabalho a discussão da arquitectura geral de sistemas, foi também alvo do mesmo o projecto de construção de um sensor – de alinhamento – descrito com maior detalhe na secção seguinte.

## 4.2. Sensor de alinhamento

Os seccionadores são elementos que estabelecem ou interrompem circuito de muito alta tensão. Na figura 28 estão representados os 3 seccionadores de um circuito trifásico. No presente caso-de-estudo, a operação de abertura e de fecho de seccionadores é realizada através de um motor de passo telecomandado que opera em conjunto o bloco trifásico. A confirmação de fecho do circuito é obtida pela leitura da rotação do motor, pelo que a confirmação explícita do correcto fecho de cada circuito não é assegurada. O deficitário contacto entre os braços de um seccionador, dada a elevada corrente que o atravessa (até 200A) pode provocar o aquecimento das partes em contacto e a corrosão das mesmas, num processo em avalanche que põe em causa o serviço. Desta forma, a operação remota dos braços seccionadores implica uma deslocação de um operador ao parque de linhas para realização da inspecção visual.



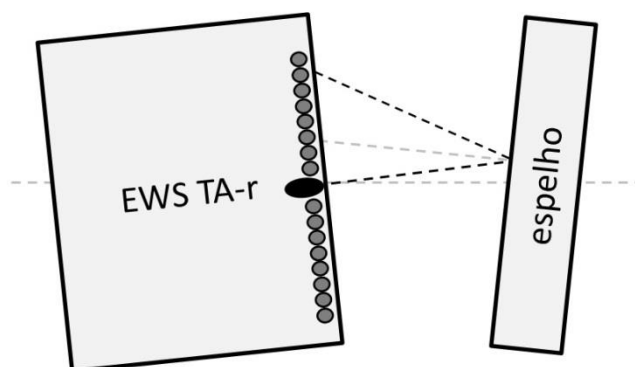
**Figura 28: Seccionadores de um circuito trifásico de 60KV.**

Com a motivação de detectar o explícito cumprimento dos comandos, e comunicar ao sistema de supervisão a condição do órgão seccionador, foi desenvolvido um novo sensor de alinhamento, sem fios, para instalação no ponto de interesse – no contacto entre os dois braços do seccionador. São assim objectivos do sensor inteligente:

- Assegurar remotamente o correcto fecho dos seccionadores;
- Detectar pontos quentes (contactos fracos);
- Medir temperatura e alinhamento local;
- Ser autónomo;
- Comunicar por radiofrequência;

Este sensor foi alvo de um pedido de patente [256], par ao qual ainda não foi proferido despacho, tendo no entanto sido realizado um relatório preliminar pelo INPI, cujo parecer é positivo, no cumprimento dos requisitos de patenteabilidade.

O sensor foi projectado para ser instalado no braço fêmea do seccionador (lado superior na figura 28), e realizar a medida do desvio óptico entre o seu díodo emissor de luz e uma superfície espelhada colocado no braço macho (lado inferior na figura 28). Na figura 29 estão ilustrados os feixes de infravermelhos entre o sensor e o espelho. Para assegurar com confiança a distância entre o sensor mais afastado (grupo 4) e o *gateway* da WPAN, foi seleccionada para este projecto a banda ISM nos 433MHz. O sensor é então constituído por um microcontrolador CC430 [240], um sensor de vibração de tecnologia MEMS [217], um sensor de temperatura digital [241] e um grupo optoelectrónico na região dos infravermelhos, constituído por um díodo emissor de luz e duas barras de foto-transístores. Para a sua alimentação foi seleccionada uma bateria de lítio da SAFT [244] com 2100mAh. Os protótipos foram construídos em duas PCB por forma a colocar o LED e os foto-transístores em contacto com a tampa transparente. O PCB anterior agrega o circuito integrado de processamento e comunicação, bem como o LED. No PCB posterior são dispostos os foto-transístores (ver figura 31).



**Figura 29: Esquema da orientação dos feixes de infravermelhos. Estão representados a cinza os foto-transístores, e a preto ao centro o LED.**

O sensor inteligente de alinhamento foi programado para as seguintes operações:

- Envio periódico do estado de temperatura e alinhamento (6h/12h/24h);
- Acorda periodicamente para monitorizar a temperatura (15min);
- Mede o alinhamento:
  - aquando do envio periódico;
  - com detecção de impacto;
  - com variação de temperatura acima do limite;

Estar normalmente em modo adormecido;

Quando a operação de monitorização é espoletada por vibração, o sensor mede o alinhamento e a temperatura, procedendo à comunicação da mensagem de evento. Quando a temperatura varia de forma mais rápida que o limite configurado, o sensor inteligente procede ao envio da mensagem com este alarme, na qual segue também o valor instantâneo do alinhamento. No caso de aplicação foi definido como limite uma variação superior a 10°C num período de 15 min. Na figura 30 está representada a aplicação cliente com os dados de observação do protótipo com ID 54.

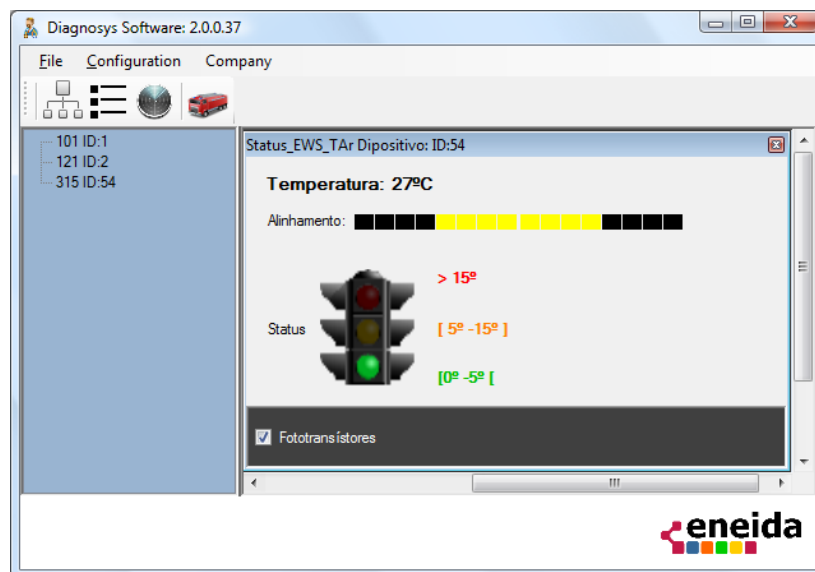


Figura 30: Interface de visualização da condição de um seccionador.

### 4.3. Ensaios no laboratório

A EDP forneceu ao projecto um conjunto de seccionadores, os quais foram montados em laboratório sobre uma barra de madeira, com furos a distar um metro, de forma a obter um correcto cenário de teste. Nos testes em laboratório foi identificado o espalhamento luminoso do LED, e o conseqüente “ruído” luminoso captado pelos foto-transistores mais afastados do centro (como se vê na figura 30). Para minimizar este efeito, o LED foi colimado usando para tal um pequeno cilindro preto a envolvê-lo.



**Figura 31: Protótipo em ensaios CE. Em cima: montagem final do protótipo. Em baixo, à esquerda: PCB anterior; à direita: PCB posterior.**

Na primeira versão com apenas uma barra de foto-transístores, percebeu-se também que não é possível garantir que o sensor solidário com o braço, rode sobre o eixo do braço num plano perpendicular a esse eixo, não garantindo dessa forma que a sua face fotocomposta fique paralela à superfície espelhada, motivo pelo qual a segunda versão do protótipo foi realizada com duas barras horizontais. Esta nova configuração trouxe mais sucesso na medida da orientação, com a captação de luz por apenas dois foto-transístores de cada lado, para a situação de fecho correcto. Na figura 31 está ilustrada esta nova versão do protótipo.

#### **4.4. Ensaios externos - compatibilidade electromagnética e estanquicidade**

O protótipo do sensor, bem como os restantes protótipos da solução, foi submetido a avaliação dos requisitos de Compatibilidade Electromagnética [257] e de acordo com os padrões harmonizados definidos na norma IEC 61131-2 [258] que especifica ensaios de emissão e imunidade. O teste de emissão é feito através do varrimento espectral entre os 30MHz e 1GHz, com o sensor em pleno funcionamento, e é medida a intensidade em frequência, excepto na banda da transmissão, os 433MHz. O relatório do ensaio [259] revelou que o sensor cumpre os limites de perturbações radiadas por uma margem de 6dB.

Nos ensaios de imunidade às descargas electrostáticas, o sensor – encapsulado num invólucro de policarbonato reforçado com fibra de vidro e com índice de protecção de classe II pela norma [260] não sofreu alterações perante a descarga de 8KV pelo ar, nem com a descarga de contacto de 4KV na superfície frontal (aprovado com critério A). O teste inclui ainda a descarga de 4KV na superfície metálica exposta – a ficha SMA de painel para aperto da antena. Como resultado, o sensor perde a transmissão durante a aplicação dos impulsos, retomando o normal funcionamento após o ensaio, o que permite a aprovação



com o critério B. Nos restantes ensaios de imunidade – aos campos electromagnéticos radiados, e ao campo magnético à frequência industrial (30A/m, 50Hz), o sensor não sofreu qualquer perturbação, sendo aprovado com o critério A.

O sensor foi ainda alvo de ensaios de estanquicidade segundo a norma [261], obtendo aprovação cumprindo os graus de protecção contra a penetração de poeiras (IP6x) e de líquidos (IPx5).

#### 4.5. Avaliação em ambiente real

Para procedermos à avaliação dos sensores e do sistema em ambiente real, foi necessário realizar uma formação de segurança para trabalhos em alta tensão. Toda a instalação de equipamentos foi realizada por técnicos da EDP e da Eneida, sempre na presença dos técnicos de segurança de ambas as empresas, e apenas na condição de equipamento consignado, ou seja, com circuito aberto a jusante e a montante. No caso particular dos sensores de alinhamento, importa referir que a instalação destes em seccionadores, implica sempre o corte da linha nas subestações a montante e a jusante, obrigando ao uso de linhas alternativas para o fornecimento de energia à cidade.



**Figura 32: Primeira instalação em seccionadores.**



**Figura 33: Segunda instalação em seccionadores.**



Na primeira oportunidade de instalação de sensores num grupo trifásico seccionador, os 3 sensores foram preparados com fita de cobre em torno da caixa, de modo a conduzir eventuais descargas e não permitir que estas afectem a electrónica (ver figura 32). Para dois grandes períodos do dia – a noite e entre as 10h00 e as 17h00 - os resultados obtidos na monitorização deste grupo foram os esperados, os mesmos bons resultados que foram antes obtidos em laboratório. Nos períodos do início da manhã e do fim da tarde, todos os foto-transístores captavam infravermelhos, pelo que o diagnóstico não era possível.

Na segunda oportunidade de aceder a um novo grupo trifásico foram instalados mais 3 sensores, desta vez preparados com uma chapa quinada a fazer sombra ao sensor, como ilustrado na figura 33. Os resultados obtidos neste segundo grupo foram francamente melhores que os primeiros, validando assim o conceito.

#### 4.6. Comunicação na rede pública

O transporte de dados na rede pública obedece à ordem ilustrada na figura 34. Da negociação entre a BTS e BSC da ligação 2 (L2) resulta a atribuição do selo de qualidade de serviço (QoS) à trama que irá viajar pela rede pública. Os níveis de QoS são definidos pelo operador. Cada contrato de serviço de dados tem um QoS atribuído ao conjunto de cartões SIM associados, e um código de ponto de acesso (APN) que define quais as GGSN estão disponíveis para aquele contrato. Ainda que o *gateway* entre as redes WPAN e a rede pública (G433M-gpwr [8]) garanta uma taxa de transferência para a rede de 42,8kbps, dois operadores móveis garantiram ao projecto que, limitam esta taxa a 3kbps (*upload* em GPRS), mesmo nas mais dedicadas GGSN.

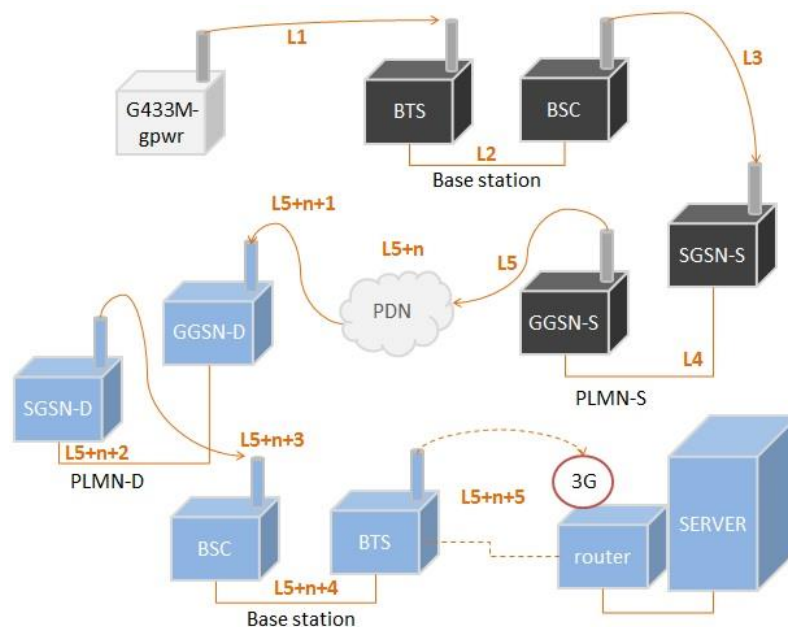


Figura 34: Veículos de comunicação na rede pública.

**Legenda:** *Base Transceiver Station (BTS); Base Station Controller (BSC); Serving GPRS Support Node (SGSN); Gateway GPRS Support Node (GGSN); Public-land Mobile Network (PLMN); Packet Data Network (PDN); Source (-S); Destination (-D).*

Os eventos criados numa subestação para efeitos de análise espectral produzem uma tabela de 65536 bits (4096 amostras de 2Bytes), à qual se soma o cabeçalho da tabela com o ID da fonte de dados (14Bytes). Esta tabela, enviada dentro dos pacotes da rede, tem um tempo de transmissão para o CIRD entre os 30 segundos e os 2 minutos.

#### 4.7. Discussão

O sensor inteligente de alinhamento revelou ser capaz de efectuar o diagnóstico pretendido:

- Medição de temperatura entre os -20°C e os +80°C (erro máx. de 1°C);
- Medição do alinhamento entre os -15° e os +15° (erro máx. de 1°).

Na primeira versão instalada em ambiente real (subestação de distribuição de energia), houve a necessidade de criar uma sombra ao processo de medida para minimizar a recepção de infravermelhos do Sol, ao nascer e ao pôr-do-sol. Outra fragilidade encontrada foi a autonomia curta (inferior a um ano para todos os 9 instalados). As razões que justificam este comportamento estão no dimensionamento do ciclo de trabalho do sensor, e da exposição solar agressiva que diminui o tempo de vida da bateria interna (ver 3.1.3). No primeiro ano de instalação do sistema foi opção do projecto programar o sensor com um ciclo de trabalho maior (monitorização a cada minuto e transmissão de dados a cada 2h), permitindo a mais célere aprendizagem dos critérios de avaliação do seccionador, bem como a avaliação do desempenho do sensor em ambiente real. Com o objectivo de aumentar a autonomia do sensor para cerca de 10 anos, o projecto do sensor evoluiu para a uma construção com captura de energia solar e armazenamento de carga em supercondensadores [262].

A rede sem fios de baixo consumo teve o desempenho esperado, respondendo bem a todos os testes. Considerando os 9 sensores de alinhamento, os 5 de vibração e temperatura, os sensores CAN que comunicam na rede sem fios através de unidades *gateway*, e o *gateway* para a *web*, somam-se 20 unidades. Mesmo configurada a 38,4kbps, e considerando 3 tentativas para transmitir, cada uma destas unidades poderá transmitir uma mensagem por segundo (ver figura 22). Importa ainda referir que os sensores de vibração e temperatura realizam diariamente uma colecção de dados (4096 em cerca de 3s) por cada eixo, para a realização dos espectros de vibração. O mesmo processo é executado pelos sensores de corrente para cada uma das 4 correntes monitorizadas. Ao processo diário pode somar-se o evento espoletado pela detecção de choque, também identificado pelo sensor de vibração, que provoca as 7 amostras do activo monitorizado (vibração nos 3 eixos e corrente em 4 circuitos). Dado o carácter de evento desta colecção de dados, e o baixo número de dispositivos nesta situação (7 sensores de vibração e 2 de correntes), a

rede sem fios não perdeu informação ao longo do seu período de funcionamento. No entanto, para redes com mais nós, é aconselhável subir a taxa de transmissão.

Aos sensores já mencionados somam-se outros tantos ligados em barramento CAN na casa da subestação (grupo 1, figura 25), a monitorizar os circuitos de saída para os diferentes postos de transformação (15KV para 230V). A unidade de ligação à *web*, de tecnologia GPRS, demonstrou ser eficiente para realizar a transmissão da informação gerada, de uma subestação para o centro de informação. A recepção de alarmes no servidor (mensagens simples) é imediata – inferior a 5s – e a recepção das tabelas, para criação dos espectros relativos ao alarme, ocorre dentro do tempo que um utilizador avisado leva a aceder ao portal de consulta de dados.

O sistema de informação tem sido usado por um pequeno grupo de avaliação do sistema. Com a possível extensão da solução a outras subestações, os serviços *web* desenvolvidos irão permitir o uso da informação por parte dos sistemas SCADA da central de despacho da EDP.

## 5. APLICAÇÕES DE SEGURANÇA E PRODUTIVIDADE INDUSTRIAL

Os ambientes industriais constituem locais de franco perigo para os operadores aí presentes. Em função do sector industrial, o operador poderá estar exposto a superfícies de elevada temperatura, contentores de elevada pressão, líquidos altamente corrosivos ou inflamáveis, bem como ao movimento pouco ágil de máquinas pesadas. Esta exposição frequente (ainda que não permanente) mantém um risco não negligenciável de acidente, que em cada um dos casos mencionados, tem uma elevada probabilidade de ser grave ou muito grave. As redes de sensores inteligentes sem fios, integradas em redes de débito elevado, permitem constituir sistemas de segurança com gestão mais fina, capaz de evitar acidentes e diminuir o tempo de resgate. Neste capítulo é apresentada a plataforma tecnológica criada para sistemas de localização de pessoas e máquinas, e as suas aplicações no resgate, evacuação e prevenção de acidentes.

Este projecto dará resposta à necessidade de uma maior exactidão na localização de pessoas e activos (menor que 2 m) em ambientes industriais agressivos, em tempo real, a nível tridimensional, recorrendo à medição da força de sinal obtido numa infra-estrutura de rede na banda dos 433MHz, mas aplicando sobre esta um método de localização diferente da triangulação, com base no reconhecimento prévio do comportamento do sinal RF em cada local. Permitirá que os equipamentos tenham uma autonomia mínima de 4 anos, e que se traduza numa melhoria significativa do valor económico do sistema (para além do seu preço muito competitivo, permitirá que o *backbone* de comunicações possa também ser utilizado para outras aplicações industriais, sem redução dos níveis de segurança, robustez e fiabilidade). Permitirá igualmente um reconhecimento imediato de situações de emergência, e sua localização.

Outra das inovações introduzidas no sistema proposto, comparativamente às soluções concorrentes, será o suporte a mecanismos de segurança e confidencialidade. De facto, dadas as exigências concorrenciais dos mercados do século XXI, e uma vez que estes sistemas de localização têm subjacentes dados de elevada sensibilidade para os objectivos estratégicos das empresas, a segurança apresenta-se como uma exigência sempre presente nos requisitos dos potenciais clientes dos sistemas de localização.

## 5.1. Localização de activos com base em redes de sensores sem fios

A dimensão característica de uma unidade industrial dificulta a detecção e a localização imediata de um acidente, e conseqüentemente a condução de uma resposta pronta ao mesmo. As redes de sensores inteligentes sem fios permitem de uma forma eficiente e ubíqua, promover a detecção e a localização, criando soluções para a gestão da segurança em toda uma unidade. Os maiores desafios para estas redes de baixo consumo estão na mobilidade, autonomia e no tempo de resposta da rede.

No âmbito deste trabalho foi realizado um sistema de localização de pessoas baseado em redes de sensores sem fios, compreendendo a certificação dos dispositivos para a operação em ambientes potencialmente explosivos. Estes ambientes são comuns em diferentes sectores industriais, mormente em processos com aplicação de produtos químicos tóxicos e altamente corrosivos. É nestes processos em particular onde é mais difícil sinalizar e localizar a ocorrência de acidentes, uma vez que as actividades mobilizam menos pessoas e podem ter lugar em pontos de fraca visibilidade do exterior. Dado o carácter dos perigos, é também nestes ambientes que a resposta pronta faz a maior diferença.

Nos trabalhos [263] [264] vem bem descrito o estado-da-arte dos sistemas de localização de pessoas. Este estudo foi aprofundado e focado em ambientes industriais no relatório [265], onde se conclui os sistemas mais económicos são os que se baseiam na medida da intensidade de sinal, conseguindo obter erros médios de localização inferiores a 5m. Os sistemas baseados na medição do tempo de voo conseguem obter precisões na localização da ordem dos cm, mas exigem equipamentos mais onerosos e dependem da linha-de-vista. Já as soluções baseadas na medição do ângulo de recepção não apresentam tanta disparidade no custo, mas não acrescentam precisão ao sistema, face à medição da intensidade de sinal omnidireccional. Tais sistemas têm maior aplicabilidade para áreas pequenas, promovendo a localização com apenas dois leitores.

Nos ambientes agressivos já descritos, um erro de 5m é suficiente para a realização do resgate, mas não pode ser verificado apenas em média. Para assegurar a resposta pronta, pretende-se um erro inferior a 5m num intervalo de confiança de 99,5%. Na apresentação [266] o autor descreve a experiência da BP [267] com alguns sistemas de localização [268] [269] [270] [271] [272] [273] em espaços abertos e potencialmente explosivos, como refinarias, onde os mesmos respondem nesses cenários com precisões da ordem dos 15m, no intervalo de confiança pretendido. No artigo [274] são também apresentados vários métodos de localização baseados na análise estatística da medida de RSSI, com erros da mesma ordem. No presente trabalho foi desenvolvida tecnologia para responder a este requisito, bem como a outros característicos das instalações industriais com ambientes perigosos – minimizar o custo de uma solução para uma área da ordem do km<sup>2</sup>; garantir a autonomia dos dispositivos móveis (doravante designados por *tags*) superior a 4 anos; garantir a gestão de muitas comunicações em redes com muitas *tags*; e garantir o um erro máximo de 5m no intervalo de confiança de 99,5%.

Para responder ao primeiro requisito foi seleccionado o princípio da estimativa da posição baseado na indicação da intensidade de sinal. De modo a garantir a autonomia das *tags*, e tendo em conta a discussão em 3.1.1, foi seleccionada ainda tecnologia 433MHz com

o SimpliTI. Para perceber a variação desta variável em função das condições atmosféricas foi realizado um teste, apresentado na secção 5.5.2. A escolha desta tecnologia de rede sem fios garante a resposta pronta da rede nos limites da operação do acesso ao meio por CSMA. Para permitir a operacionalidade da rede com muitos nós, foram considerados dois canais de comunicação RF, descritos na secção 5.5.1. A arquitectura da solução é apresentada em 5.3 e ilustrada na figura 35 e figura 36.

A tecnologia seleccionada é aquela que viabiliza a implementação de soluções de localização em ambientes industriais com áreas da dimensão enunciada. Cumprir o requisito do erro máximo proposto com esta tecnologia implicou criar e testar diferentes motores de localização. Neste trabalho foram testados 4 métodos, descritos em 5.6, sendo que um deles garante o erro máximo. O método foi submetido a pedido de patente provisório [275], cujo relatório preliminar do INPI revela que o estado da técnica não compromete o potencial de patenteabilidade da invenção.

## 5.2. Zonas potencialmente explosivas

Definem-se por zonas potencialmente explosivas aquelas que são susceptíveis de explosão quando na presença de oxigénio e de uma fonte de calor. Estas zonas são classificadas em 0, 1 e 2, para ambientes gasosos [276], e por 20, 21 e 22 para ambientes de pó [277], por ordem decrescente de perigosidade. Estes níveis são atribuídos às zonas em função da frequência com que aí ocorrem atmosferas explosivas. De uma forma geral, a zona 0 corresponde à presença de líquidos inflamáveis, a zona 1 à presença de gases libertados por líquidos inflamáveis, e a zona 2 a um raio de 2-3m da zona 1.

Para poderem operar nestes ambientes, os dispositivos têm obrigatoriamente de ser sujeitos ao acto de certificação, e obter aprovação no mesmo. Os ensaios perante as normas atestam que em condições extremas de operação, ou mesmo em caso de avaria, o dispositivo não provoca ignição. Neste trabalho foram certificados produtos no âmbito da norma para o intrinsecamente seguro [219], e para a segurança tipo 'n' [220]. A primeira define limites para a potência e temperatura em falha, e atesta que em situação alguma o dispositivo provoca faíscas. A norma estabelece 3 níveis de certificação: ia; ib e ic. O 'Ex ic' está limitado à zona 2, o ib às zonas 1 e 2, enquanto o 'Ex ia' permite o acesso às 3 zonas. A segunda é de carácter mais geral mas só permite a presença de dispositivos em zona 2.

Após os ensaios foram atribuídos à *tag* o certificado 'II 1G Ex ia IIC T4 Ga IP65' com o número ITS11 ATEX 27379, bem como o 'Ex ia IIC T4 Ga' com o número IECEx ITS 11.0041. Os certificados são equivalentes, mas o primeiro é de âmbito europeu, e o segundo de âmbito internacional. Os certificados Ex apresentados são ambos do grupo II – não minas. O valor seguinte diz respeito à categoria do equipamento segundo a directiva [278] (1, 2 ou 3) e tem correspondência às zonas permitidas de aplicação (0, 1 e 2; 1 e 2; ou 2 respectivamente). A letra G indica certificação perante gases e vapores (em alternativa a letra D para ambientes de pó).

### 5.3. Arquitectura do sistema de localização de pessoas

O sistema é composto por *tags* transportadas por pessoas, e por leitores que lêem a intensidade de sinal das mensagens transmitidas por estas. Com a funcionalidade de leitor, foram configurados dois tipos de unidade, o *gateway* CAN e o repetidor de dois canais (descritos em detalhe em 5.5. As *tags* emitem periodicamente uma mensagem, através do canal RF 1 da WPAN, com o seu código identificador e com a indicação do seu movimento relativo à sua posição aquando da ultima mensagem. Esta mensagem é lida e alterada pelo leitor, que faz introduzir o seu próprio código de identificação bem como a intensidade de sinal que mediu na recepção. A informação criada pelo leitor é então veiculada pela rede até ao servidor [213].

O encaminhamento da informação com a medida de RSSI é realizado através do barramento CAN, onde se encontra o *gateway* com a rede de banda larga. Nas zonas potencialmente explosivas, a rede de banda larga tende a ser Wi-Fi de modo a simplificar as interfaces eléctricas entre zonas perigosas e zonas seguras. Os leitores baseados em repetidores sem fios (alimentados a painel solar) veiculam as suas mensagens para o barramento CAN através do canal RF 2 da WPAN 433. O *gateway* com a rede de banda larga usa os serviços de escrita na base de dados para preencher as respectivas tabelas (ver figura 36). A aplicação de gestão do resgate ou evacuação usa os serviços de leitura para actualizar as posições das *tags*.

Através do acelerómetro interno, as *tags* estão também programadas para detectar quedas ou imobilização. A aplicação de gestão de eventos procede de imediato à transmissão da respectiva mensagem de alarme para o utilizador do sistema – operador de segurança – alarme que é entregue acompanhado da localização do portador da *tag*.

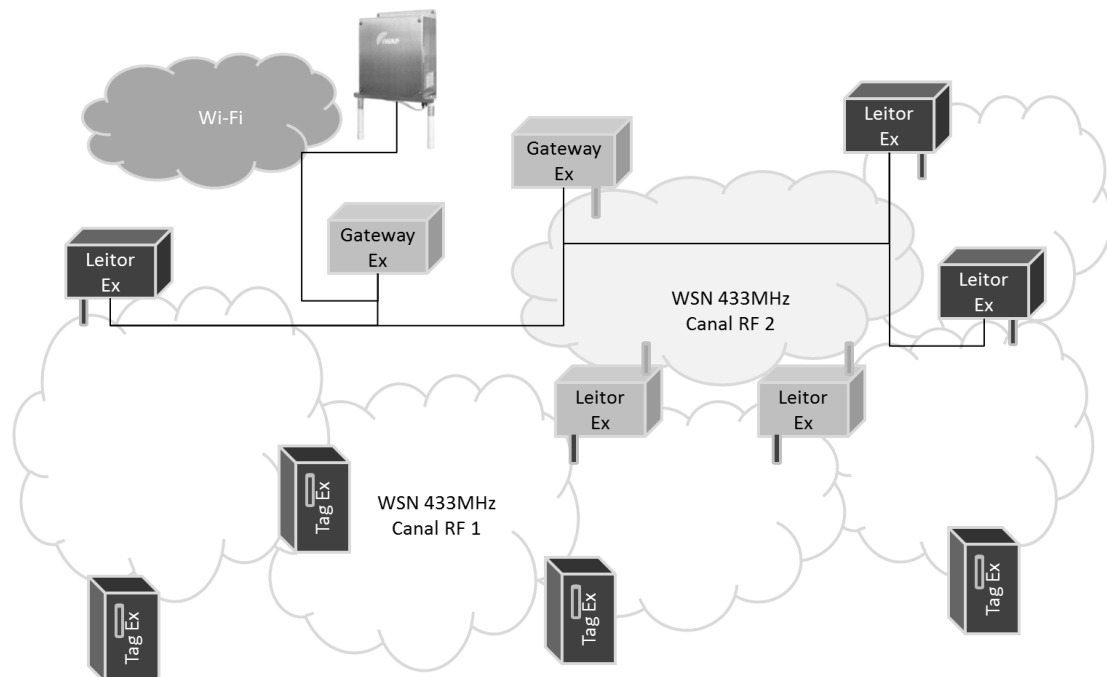


Figura 35: Arquitectura da rede sem fios.

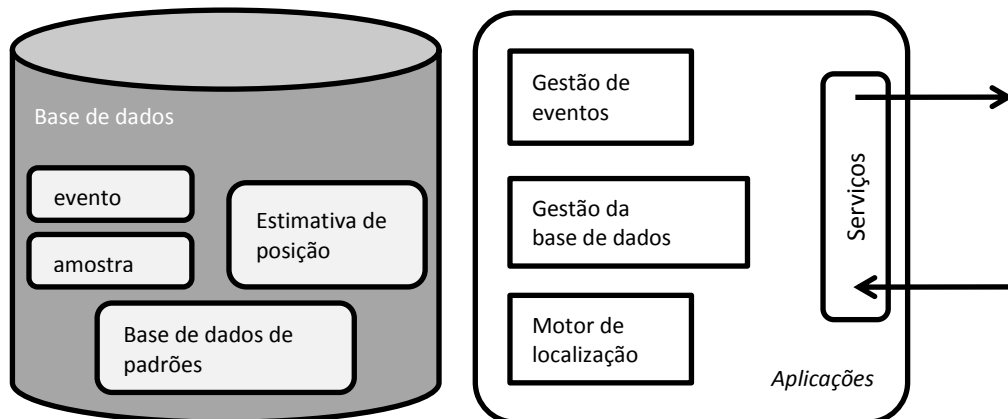


Figura 36: Motor de localização e serviços de consulta.

#### 5.4. Tags

A *tag* é um dispositivo que acompanha um operador durante as 8h de um turno. Com este fim, é imperativo que a *tag* seja um dispositivo leve e pequeno. De forma a viabilizar a localização do operador nas zonas mais perigosas, os circuitos deste dispositivo foram projectados segundo para constituírem um dispositivo intrinsecamente seguro. A primeira *tag* projectada para este sistema (ilustrada na Figura 37) foi constituída por um processador CC430 da Texas Instruments, com *balun* integrado e antena helicoidal de PCB (semelhante ao PCB 5 da figura 7). Para melhor gerir a sua autonomia, a *tag* foi equipada com um acelerómetro da STMicroelectronics, de modo a poder adormecer nas zonas de repouso (portarias) e acordar com o movimento. O dispositivo MEMS permite ainda detectar queda ou imobilização, em função dos valores limite de choque. Estes valores foram testados e aferidos em laboratório, permitindo assim a programação destas funcionalidades nos identificadores que serviram os testes em ambiente industrial.



Figura 37: Primeira versão da tag (com o acelerómetro à esquerda do microprocessador).



Para alimentar as *tags* por um período de 4 anos foi seleccionada uma bateria de Li-SOCl<sub>2</sub> de tamanho AA da marca SAFT com 2600mAh. Para efeitos da certificação 'Ex ia', foi dimensionado um fusível de 100mA entre a tensão da bateria e a tensão do microprocessador. A electrónica foi então coberta com epóxi para garantir a estanquicidade da bateria. O dispositivo electrónico foi encapsulado numa caixa de policarbonato com as dimensões de 80x40x20mm (ver figura 38).

No sentido de melhorar a precisão do motor de localização, foi criado um algoritmo de pedómetro que opera dentro da *tag*, conferindo assim a maior distribuição de inteligência pelo sistema. Esta alteração implicou alterações também no *hardware* do dispositivo identificador, nomeadamente pela introdução de um giroscópio, também este MEMS da STMicroelectronics (ver Figura 39). A estas funcionalidades soma-se um botão de pânico, situado no topo da unidade. Uma vez pressionado o alarme é transmitido ao servidor.

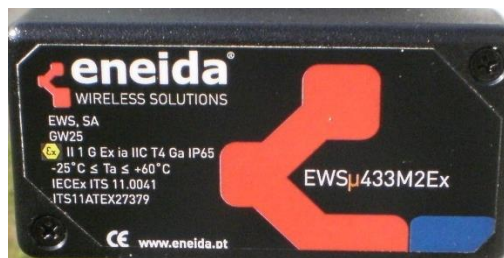


Figura 38: Ilustração da *tag* do sistema.

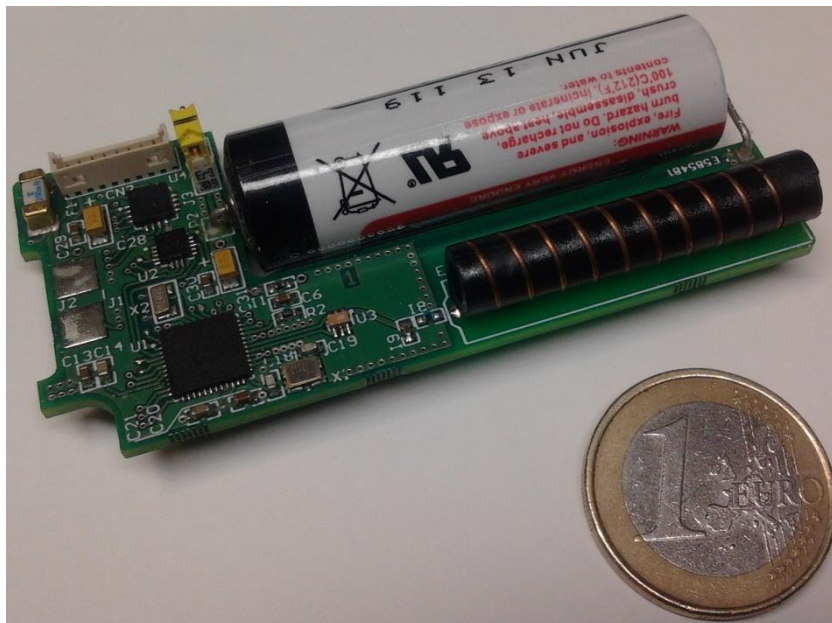


Figura 39: Segunda versão da *tag* (com o microprocessador a manter a mesma posição da *tag* anterior, o acelerómetro ao meio, e o giroscópio no topo).

#### 5.4.1. Ensaios de autonomia

A autonomia pretendida exigiu a optimização os processos internos – o *firmware*. O entendimento define um ciclo de trabalho de 15 segundos, no qual a *tag* se liga a rede para transmitir uma mensagem, e aguarda configurações dos leitores por um período de 20ms. Na tabela 12 estão os valores medidos no laboratório. Para uma operação contínua de 24H e considerando a capacidade de explorar a bateria até aos 25% da sua carga, obtemos uma autonomia de 3 anos.

A *tag* pode não estar sempre em uso. Se a grande maioria dos operadores fizerem turnos de 8 horas, estas *tags* podem ser localizadas numa portaria e podem verificar que estão imobilizadas. Foi criado um serviço na central de dados que verifica estes pressupostos e faz comunicar pelo leitor próximo da portaria, a ordem de adormecimento permanente. A partir daqui a *tag* só consome o valor residual de alerta (18 $\mu$ A), acordando quando o acelerómetro voltar a sentir movimento acima de um valor pré-definido. Neste ciclo de operação, o consumo médio durante um turno de 8 horas é de 68 $\mu$ A (5 dias por semana), voltando aos 18 $\mu$ A para as restantes 16h e para o fim-de-semana. Para este cenário obtém-se, para a mesma exploração (até 25%da carga) uma autonomia de 7 anos e meio.

**Tabela 12: Consumos da *tag* com acelerómetro.**

Consumos	Alerta de impacto (medido)	Processamento (medido)	Recepção (medido)	Transmissão (medido)	Total (calculado)
<b><i>Tag</i> 433MHz</b>	18 $\mu$ A	1,45mA x 70ms (8MHz)	17,4mA x 20ms (-50dBm)	31,5mA x8ms (10dBm)	68 $\mu$ A

#### 5.4.2. Ensaios do “intrinsecamente seguro”

A primeira versão da *tag* realizou ensaios para certificação ‘Ex ia’. Os ensaios incluem testes destrutivos de elementos como baterias e fusíveis, bem como testes de queda de 1m após 24h a -30°C, com o intuito de verificar a integridade do conjunto devidamente montado. Os ensaios mais importantes estão referidos na

figura 40.

Para averiguar a temperatura máxima possível na superfície do equipamento, a INTERTEK procedeu ao ensaio de curto-circuitar um conjunto de 10 baterias até à descarga total, e a 60°C de temperatura ambiente. O resultado, comunicado à eneida® no relatório de aprovação [279], indica que as baterias aqueceram até aos 80,23°C, obtendo aprovação para o nível T4 (<135°C). Caso tivesse sido solicitado nível T6 (<85°C), o mesmo não teria passado uma vez que ao valor do teste acresce uma tolerância exigida de 10°C.

A avaliação da potência máxima admissível na antena é calculada com base na tensão da máxima da bateria e na corrente máxima no fusível, com as tolerâncias da norma. A *tag* foi também sujeita a uma atmosfera com temperatura de 20°C e humidade de 50% durante 2 horas, após as quais foi colocada sobre uma superfície metálica. A carga foi então medida

nos parafusos da tampa obtendo um valor de 3,9pF (máximo), abaixo dos 5pF que corresponde ao limite máximo para a classificação IIC (grupo de gases mais exigente).

5.3	Maximum surface temperature		
5.3.1	Determination of maximum surface temperature	Maximum surface temperature determined in accordance with Section 5.3.3 under normal operating conditions, has been considered to not exceed the temperature class T4 at the ambient temperature of 60°C. Maximum surface temperature under fault conditions was found to be on the surface of the battery at 20.23K above the ambient temperature of 60°C.	Pass
6.6	Electromagnetic and ultrasonic energy radiating equipment	The equipment utilises a 433Mhz wireless transmitter to communicate with a base station.	Pass
6.6.1	Radio frequency sources	The equipment utilizes a 433MHz radio module, the maximum power available during normal operation has been stated by the manufacturer to be 10mW, in the event of a fault the maximum power available to the transmitter has been calculated as 1.16W. Both these values are below the maximum permissible value of 2W for Group IIC. The manufacturer has confirmed that the software cannot be modified by the end user to increase the power of the equipment.	Pass
7.4	Electrostatic charges on external non-metallic materials		
7.4.1	Applicability	The external enclosure is made entirely of non-metallic materials.	Pass
7.4.2	Avoidance of a build-up of electrostatic charge on Group I or Group II electrical equipment	The enclosure was tested in accordance with Clause 26.15 of this standard, the maximum measured capacitance was 3.9pF. These measurements are below the maximum allowed limit of 5pF for Group IIC.	Pass

Figura 40: Excerto do relatório de ensaio Ex ia.

## 5.5. Leitores

Foram utilizados dois tipos de dispositivos como leitores do sistema de localização: o *gateway* de barramento CAN para a WPAN 433MHz – já referido em 4.1 – e o repetidor com dois canais RF, alimentado por captura de energia via solar e armazenamento de carga em supercondensadores [280]. A necessidade da realização destes dois tipos de leitor resultou da análise efectuada no estudo de viabilidade de implementação de um sistema de localização, realizado para o novo complexo de “*hydrocracking*” da refinaria de Sines. A área conta com 4 hectares, várias plataformas a 11m de altura, e algumas torres com 40m de altura. O estudo foi realizado para uma distribuição de leitores próxima de uma grelha de 20x20m a duas alturas diferentes, contemplando assim 200 leitores – 80 unidades *gateway* CAN e 120 unidades ‘repetidor’. Esta divisão foi obtida em função dos critérios listados durante a visita técnica ao local, fundamentalmente os de acessibilidade, mas também a capacidade de cada rede, discutida na secção 5.5.1. O critério custo, apresentado na tabela 13, foi avaliado com detalhe para o contexto do projecto. Ainda que o custo unitário do

repetidor seja o dobro do custo do *gateway*, o custo de instalação deste último é bastante superior ao primeiro, e coloca o conjunto com o dobro do custo. Este facto deve-se às características de um quadro eléctrico para zona ATEX 2, aos cabos que respondem à especificação do cliente para aquela zona, e às especificações da sua instalação, que entre outras exigências, obriga à cobertura destes com massa anti-fogo.

Na figura 41 está representada um *gateway* na versão 'Ex nA', protegido contra sobrecargas através de um fusível interno, e contra sobretensões por um paralelo de diodos *Zener* (um elemento é suficiente para a certificação, mas dado que é alimentado pelo sector é boa prática fazer incluir redundância). Na figura 42 vem apresentado o protótipo do repetidor.



Figura 41: Gateway CAN-433MHz, certificada para ATEX zona 2.

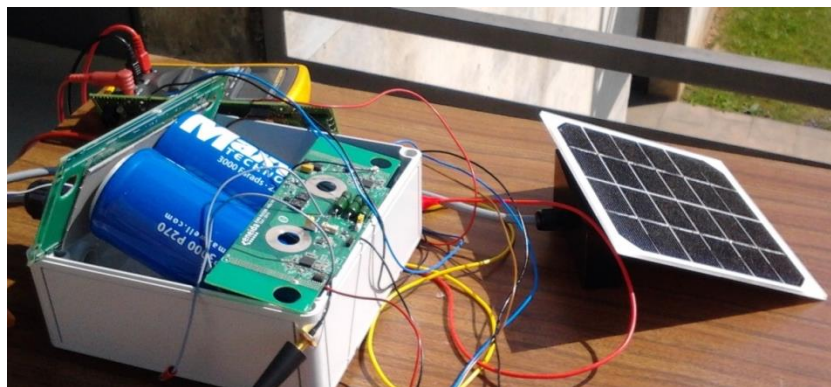


Figura 42: Repetidor 433MHz de dois canais, alimentado a painel solar.

Tabela 13: Custos dos leitores do sistema de localização.

	Repetidor	Gateway CAN
Custo de instalação	X	10.x
Custo do equipamento	5.x	2,5.x

No processo de selecção do painel solar optou-se pelo acabamento de vidro temperado. Esta opção condicionou a construção do dispositivo por via das limitações de certificação. Em alternativa podem ser usados painéis solares com acabamento em PET. A diferença entre estas duas tecnologias está no tempo de vida médio, que no primeiro é de 15 anos e no segundo de apenas 5 [281]. Para além do acabamento, os painéis solares podem ser de tecnologia monocristalina ou amorfa. Neste projecto foi seleccionada a primeira tecnologia por ser mais indicada para ambientes exteriores [282].

O repetidor não foi submetido aos ensaios de certificação (à data da redacção desta tese), mas já tem os projectos de circuitos aprovados pelo organismo acreditado. O dispositivo é composto por dois blocos separados, uma vez que o uso de supercondensadores e de painéis solares não se adequam à mesma norma. Por um lado, a capacidade instalada (2 supercondensadores de 3000F cada) ultrapassa de longe os limites máximos definidos para o 'Ex i' pelo que o conjunto rádio foi projectado para obter o mesmo certificado do *gateway*. Por outro lado, a norma tipo "n" exige a realização de um teste IK [283], ao contrário do intrinsecamente seguro.

Assim, o bloco fonte de potência – um painel solar de vidro temperado – foi habilitado com circuitos de limitação de corrente e de tensão (ilustrados na figura 43), e encontra-se preparado para obter o certificado de intrinsecamente seguro "Ex ib". O bloco que aloja o armazenamento de energia, bem como os circuitos RF, foi protegido contra sobretensões segundo a norma Ex tipo "n" (ilustrado na figura 44). Este bloco terá um certificado equivalente ao leitor CAN.

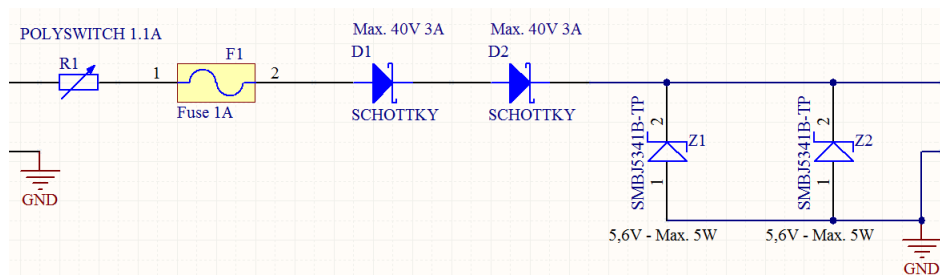


Figura 43: Circuito de protecção da saída de potência do painel solar.

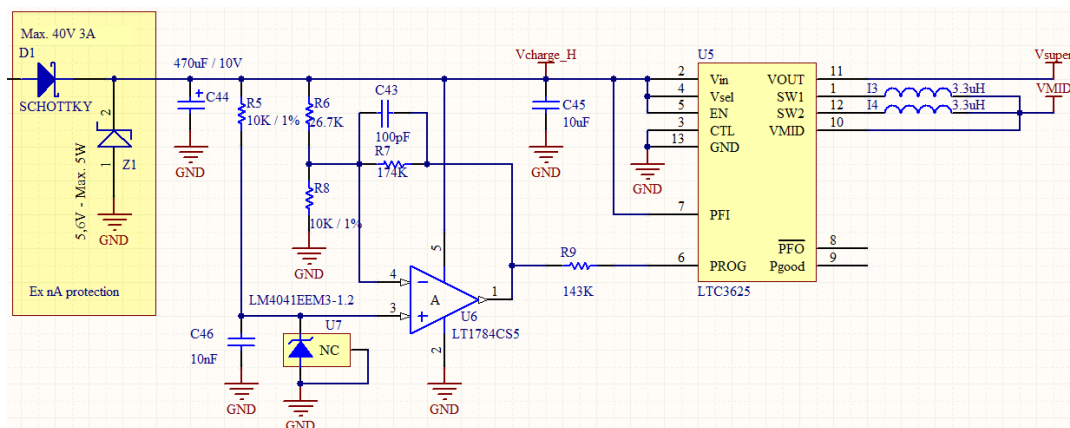


Figura 44: Circuito de carga dos supercondensadores.

### 5.5.1. Avaliação da capacidade das diferentes redes do sistema

Periodicamente, as *tags* vão comunicar para a rede uma mensagem que será lida em intensidade de sinal pelos leitores. Por cada uma destas mensagens, cada leitor irá comunicar uma leitura ao servidor. Importa portanto dimensionar a rede para que esta suporte todas as comunicações, tendo em conta ainda que o acesso ao meio nos canais RF 433MHz pode ser otimizado e permitir uma eficiência na ordem dos 30% da utilização do canal para muitos nós, baixando para cerca de 20% para mensagens mais curtas, como referido na secção 3.2.1.

Com o uso de  $n$  repetidores, a transmissão periódica de  $k$  *tags* produz nos canais RF  $k+n.k$  mensagens. Na tabela 14 são apresentados os números de mensagens que fluem em cada rede. Na primeira coluna é apresentado um cenário com 10 leitores – 4 *gateways* (LG) e 6 repetidores (LR) – e um gateway não leitor a operar no canal RF 2 (G2), no qual comunicam 25 *tags*. Neste cenário existem então 175 mensagens a fluir na rede RF em cada período. Considere-se assim 175 tentativas de transmissão diferentes, e uma vez que cada leitor procede a uma transmissão assim que recebe uma mensagem. Olhando para a figura 23 (página 60), e tendo em conta a eficiência espectável do canal, neste cenário seria obrigatório o uso de uma taxa de transmissão de 250kbps. Esta taxa de transmissão, por sua vez, faz diminuir o alcance das comunicações (ver 2.2.5 e 3.1.1), pondo em causa a operação do motor de localização. Resolver estas limitações do uso dos canais RF foi a principal motivação do uso de 2 canais RF, podendo assim ter um canal com baixa taxa de transmissão para comunicar com as *tags* a longo alcance, e outro para comunicar com a rede acima com maior taxa de transmissão.

Os dois cenários apresentados nas colunas 3 e 4 da tabela 14, dizem respeito aos cenários mais exigentes discutidos em 5.6. O primeiro está afecto a uma zona de maior perigo, considerando 25 pessoas e um período de transmissão é de 5s; o segundo para uma zona segura, com uma um período de transmissão é de 15s. Em todos os casos de análise de tráfego, considera-se que a *tag* será lida apor 10 leitores.

**Tabela 14: Número de mensagens a fluir nas redes de baixo débito.**

	25 <i>tags</i> (1msg/s) 4 LG + 6 LR + 1G2	25 <i>tags</i> (1msg/5s) 4 LG + 6 LR + 1G2	50 <i>tags</i> (1msg/15s) 4 LG + 6 LR + 1G2
Canal RF 1	25	5	<4
Canal RF 2	150	30	20
CAN	250	50	<34

O sistema, ilustrado na figura 35, incorpora ainda redes CAN e redes Wi-Fi, conectadas através de um EWS-GIP (*gateway* CAN – Ethernet). Todas estas redes estão sobejamente estudadas e garantem o volume de comunicações do sistema. Ainda assim, o CAN requer especial atenção ao comprimento dos barramentos, que neste estudo não vão além dos 100m entre o leitor mais distante e o EWS GIP.

### 5.5.2. Avaliação da medida de RSSI em função da humidade

Os métodos de localização desenvolvidos têm como base a medida do RSSI por parte do leitor. Interessa então verificar qual o efeito de algumas variáveis no comportamento do RSSI, de modo a procurar a implementação dos filtros necessários ao processo de medida. Foi proposto que o sistema de localização fosse acompanhado por sensores de humidade e temperatura, de modo a avaliar a variação do RSSI em função destas condições, e que o método pudesse corrigir a estimativa da posição final em função das características ambientais. Neste âmbito foram realizados vários testes de 48H entre um receptor e um sensor de humidade e temperatura. Os ensaios foram realizados com o sensor a transmitir 10 mensagens por hora, espaçadas de um minuto e a 10 dBm. O gráfico da figura 45 mostra um ensaio com a os valores médios de cada hora. Foram realizados testes em dias quentes e com aguaceiros, na primavera, e em dias mais frios de forte nevoeiro, no outono, em locais perto do mar e outros na cidade de Coimbra, e com distâncias diferentes – gamas diferentes de RSSI. Em todos os testes realizados, a variação máxima de RSSI foi de 6dBm, sendo que os picos mínimos de RSSI ocorrem aquando dos picos máximos de humidade.

O ponto de orvalho – temperatura à qual se dá a condensação do vapor de água existente no ar – foi também avaliado. A análise desta variável, que é função da temperatura e da humidade, permitiu a melhor avaliação do comportamento do RSSI face às condições atmosféricas. No gráfico da figura 45 é possível verificar que o pico mínimo de RSSI ocorre para um pico máximo de humidade coincidente com o intervalo de tempo em que o ponto de orvalho atinge o valor da temperatura ambiente. Após a análise aos resultados concluímos que a variação da humidade tem efeito na medida de RSSI, embora não seja directa a previsão desse mesmo efeito.

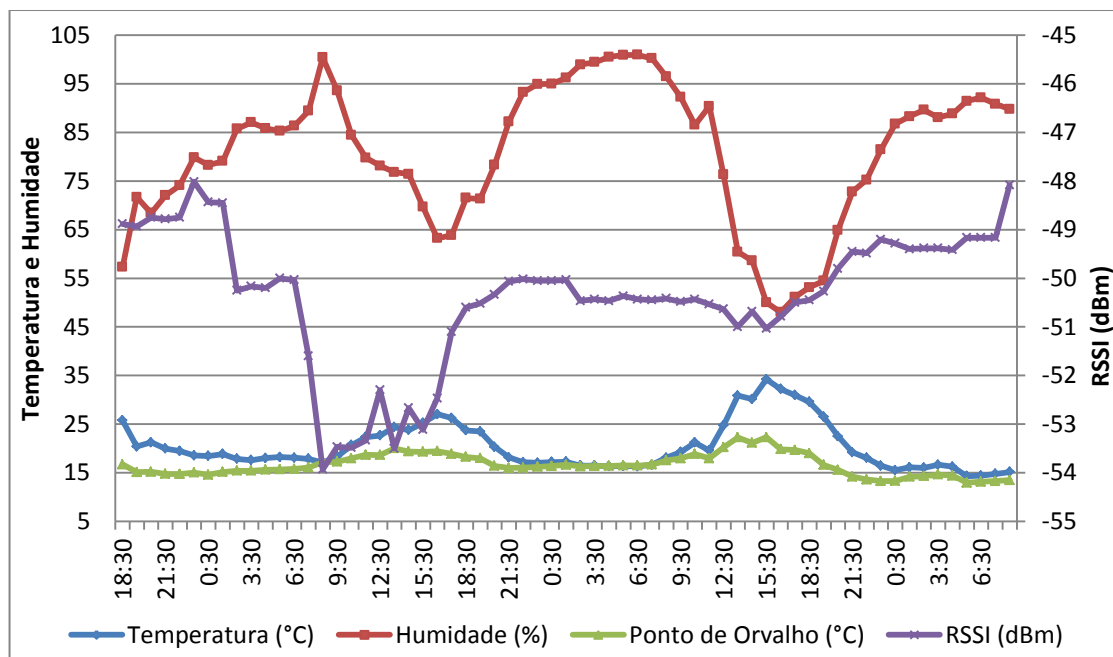


Figura 45: Variação do RSSI com a temperatura, humidade – curta distância.



## 5.6. Métodos de localização

Um sistema de localização caracteriza-se principalmente pelo conjunto das tecnologias constituintes e pelos métodos aplicados na localização, sendo que os diferentes métodos não são permitidos por todas as tecnologias. Vários algoritmos de localização têm sido propostos e avaliados [284] tanto para ambientes indoor como outdoor. Estes algoritmos recorrem, na maioria das vezes, a métodos baseados no tempo de voo de uma mensagem (TOF - *time-of-flight*), na intensidade do sinal (RSSI - *Received Signal Strength Indication*) ou no ângulo de chegada (AOA - *angle-of-arrival*) para estimarem a distância entre os nós. Por ordem crescente de exactidão, a localização pode ser efectuada por identificação local: estar ou não estar ao alcance de um leitor; por triangulação da força de sinal medida por diferentes leitores de radiofrequência; ou por tempo de voo de uma mensagem de radiofrequência, medido pelos diferentes dispositivos e comparado por um sistema master. Esta crescente exactidão implica uma também crescente linha de vista entre os diferentes dispositivos e uma crescente capacidade de computação dos leitores ou das tags.

A medição da intensidade de sinal é o método mais comum e mais viável, uma vez que possibilita a localização em espaços sem linha de vista e com electrónica menos onerosa. A triangulação desta variável não é um método exacto para efeitos de localização uma vez que a força de sinal não é uma grandeza estável, depende fortemente dos obstáculos entre o emissor e o receptor, e das condições atmosféricas, principalmente da humidade.

A solução da **Eneida** é constituída por tags activas que emitem na banda dos 433MHz. A infra-estrutura de rede 433MHz tem capacidade para medir a intensidade de sinal, mas de momento o sistema está configurado na sua forma mais simples, ou seja através da identificação por local próximo, dentro ou fora do alcance de um leitor denominado por pórtico. Também a solução da **Tagstone**, mais focada em seguimento de pessoas e ativos e não na localização em tempo real, faz a identificação de uma tag ao alcance de um pórtico, e permite a consulta do local da última leitura de cada tag, com hora e data.

A solução da **Identec Solutions** compreende a localização por triangulação da força de sinal com recurso a uma infraestrutura de comunicação na banda dos 433MHz (que por si só não consegue uma exactidão inferior a 10m) e a localização por GPS, nos locais onde há linha de vista para 3 ou mais satélites. Quando as pessoas se encontram debaixo de edifícios de betão ou de metal, ou em instalações subterrâneas, o GPS deixa de ser útil e a localização deixa de ser exata, para além de não permitir localização em altura, e dos equipamentos requererem consumos de energia relativamente elevados (os equipamentos têm pouca autonomia energética).

### 5.6.1. Análise preliminar de métodos existentes

Com o desenvolvimento dos primeiros protótipos foi montado um sistema completo nas instalações do Instituto Pedro Nunes (IPN), no edifício C – incubadora (figura 46). Este sistema permitiu fundamentalmente testar as comunicações e a arquitectura do sistema.



Foram inicialmente colocados 11 leitores, e posteriormente reduzidos para 6, por forma a ter melhores resultados para o espaço de cerca de 41m (corredor maior) por 33m (corredor menor), em dois pisos. As *tags* foram configuradas para transmitir a 10dBm.

Nesta fase foi testado um método baseado no algoritmo kNN (*k-nearest neighbours*) [285] [286], cuja implementação vem detalhada em [287]. A rede foi treinada com medidas de RSSI sobre as mensagens de uma *tag*, e os resultados do método foram produzidos com as medidas obtidas a partir de uma segunda *tag*, que acompanhou a primeira à distância de um metro em cada ponto do treino. Desta forma, as medidas de RSSI sobre ambas as *tags* foram obtidas nas mesmas condições ambientais, minimizando o erro inerente ao RSSI. Os resultados encontram-se na tabela 15.

Numa segunda fase foi estudado o resultado de uma implementação de um filtro de Kalman [288] [289] sobre o método baseado no algoritmo kNN, corrigindo a nova posição com base na estimativa da posição anterior, e com um deslocamento limitado por uma velocidade média do pedestre definida no teste como de 4km/h (KF-kNN). A implementação do filtro vem demonstrada no mesmo relatório [287]. Os testes foram refinados limitando o espaço de localização aos corredores e salas da Eneida (ELCE), eliminando portanto o espaço exterior e as salas não usadas pelo sistema.

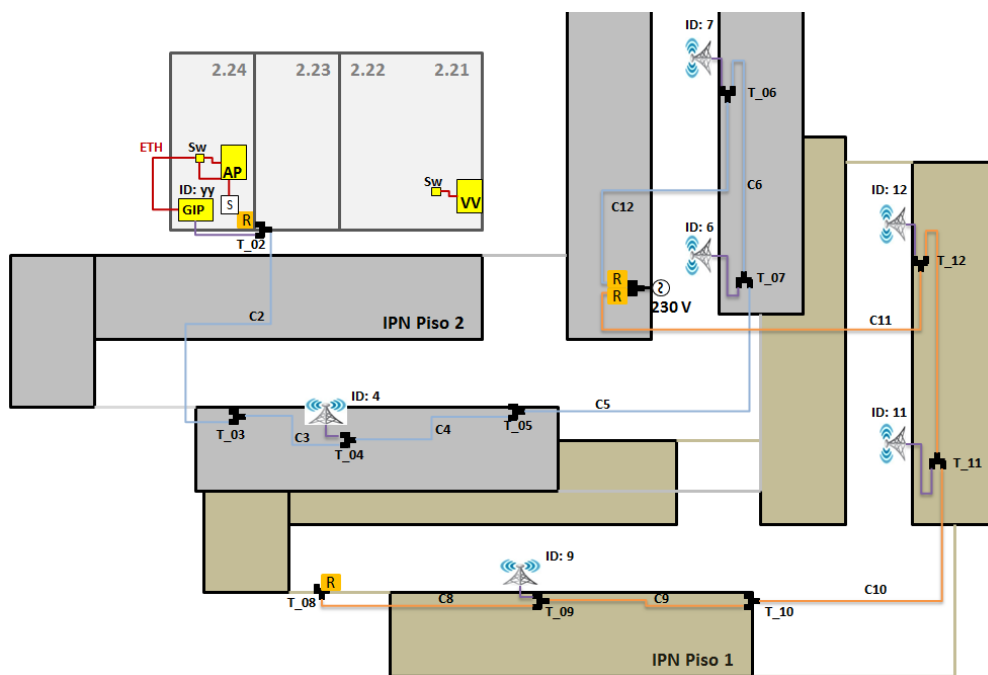


Figura 46: Representação do espaço de implementação no IPN.

Na tabela 15 são apresentados os erros associados aos 2 métodos, nos dois espaços, e por percentis. Os valores foram obtidos a partir do histograma, uma vez que o volume de medidas (428) não nos permite assumir a distribuição como normal. Os erros obtidos estão fora dos objectivos do sistema, para mais tratando-se de um espaço interior onde se espera ter menor dependência de possíveis interferências. Ainda assim, a implementação do filtro

de Kalman permite uma melhoria significativa da estimativa da posição. Será expectável que os mesmos métodos produzam erros maiores em espaço aberto, o que implicará procurar outros algoritmos e outras formas de correcção dos resultados.

**Tabela 15: Avaliação da precisão de localização interior.**

Quartis	kNN	KF-kNN	kNN-ELCE	KF-kNN-ELCE
Mediana	7,31 m	7,14 m	2,31 m	2,05 m
Q3	11,18 m	10,70 m	5,11 m	4,21 m
Perc.95	28,12 m	23,41 m	13,73 m	10,53 m

### 5.6.2. Método de comparação de padrões

Para responder ao requisito precisão foi então concebido um novo algoritmo baseado em comparação de padrões. A comparação de padrões é aplicada em vários domínios, desde a análise de compostos por difracção de raios-x [290] ao reconhecimento facial de pessoas [291], sendo também usada para a localização de pessoas [292].

O método compreende também uma fase de treino do sistema, prévia a fase de realização em tempo-real da estimativa da posição. Na primeira fase é definido um conjunto de pontos de treino, a partir dos quais são recolhidos valores de RSSI afectos a cada posição do espaço de implementação. Nesta fase, são registadas em base de dados as medidas de RSSI de cada leitor para cada uma das posições de treino, criando um vector-padrão com o número de dimensões máximo igual ao número de leitores. Cada dimensão corresponde à distribuição gaussiana do RSSI medido em cada leitor. Na figura Figura 47 estão representadas as tabelas criadas para o método.

Para cada ponto de treino  $(X,Y,Z)$ , para cada conjunto de condições de ensaio (humidade, temperatura, potência emitida, ou outra a aplicar) por  $i = 1, \dots, I$  e para cada leitor denotado por  $n = 1, \dots, N$ , é calculada a média  $\mu_n^i$  do RSSI medido nas mensagens correspondentes, bem como o respectivo desvio padrão  $\sigma_n^i$ . Com esta informação é criada a gaussiana  $\rho_n^i[X, Y, Z]$  dada por:

$$\rho_n^i[X, Y, Z](R) = \frac{1}{\sigma_n^i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R-\mu_n^i)^2}{2(\sigma_n^i)^2}}, i = 1, \dots, I, n = 1, \dots, N \quad (1)$$

onde  $R$  é a variável de RSSI. A função  $\rho_n^i[X, Y, Z]$  corresponde à densidade de probabilidade relativa à distribuição dos valores de RSSI, para a posição de treino  $(X,Y,Z)$ , para o leitor  $n$  e para a condição  $i$ . Desta forma obtemos para cada ponto de treino  $(X,Y,Z)$  uma matriz  $I \times N$  de gaussianas:

$$T(X, Y, Z) = (\rho_n^i[X, Y, Z]) \quad (2)$$

Define-se assim  $T(X, Y, Z)$  como o “padrão de RSSI da posição de treino  $(X, Y, Z)$ ”. A linha  $i = 1, \dots, I$  da matriz  $T(X, Y, Z)$  contém a informação das distribuições de RSSI para a condição  $i$ . Define-se também a linha  $i$  de  $T(X, Y, Z)$  como o “vector-padrão de RSSI para a condição  $i$  da posição de treino  $(X, Y, Z)$ ”.

Na fase de teste, os leitores vão medir o RSSI em cada leitura e vão construir, para cada instante  $k$ , uma “assinatura” de RSSI, ou seja, o vector-medida  $M^i$  com dimensão máxima  $N$ , dado por:

$$M^i = (R_1^i, \dots, R_N^i) \quad (3)$$

onde  $R_n^i, n = 1, \dots, N$ , é a medida de RSSI no leitor  $n$  para a condição  $i$ .

A estimativa da posição instantânea é obtida através da comparação do vector-medida com os vectores-padrão, numa implementação probabilística do método kNN. Dada a assinatura  $M^i$  da equação (3), o método vai encontrar os melhores vectores-padrão cuja linha  $i$  da respetiva matriz apresenta maior probabilidade de ser compatível com aquela assinatura  $M^i$ . A melhor estimativa da posição é dada pela média ponderada dos pontos encontrados. Concretamente, para cada vector-padrão  $\rho_n^i$  da base de dados de treino, calculamos o “indicador de compatibilidade” entre a assinatura de RSSI  $M^i$  e o padrão  $T$ , que definimos como sendo o número positivo  $C(M^i, T)$  dado por:

$$C(M^i, T) = \sum_{n=1}^N \rho_n^i(R_n^i) \quad (4)$$

onde  $\rho_n^i(R_n^i)$  é o valor da distribuição normal  $\rho_n^i$  em  $R_n^i$ .

Após a repetição deste cálculo para cada padrão  $T$ , são guardados os  $K$  melhores padrões, denotados por  $T_1, \dots, T_K$ , que apresentam maiores indicadores de compatibilidade  $C(M^i, T_j)$  com a assinatura de RSSI  $M^i$ , e são recolhidos os respectivos pontos de treino:

$$p_j = (X_j, Y_j, Z_j), \quad j = 1, \dots, K \quad (5)$$

A estimativa da posição, que se denota por  $p$ , do dispositivo móvel que foi detectado com a assinatura de RSSI  $M^i$ , é então dada pela média pesada destas  $K$  posições  $p_j, j = 1, \dots, K$ :

$$p = \sum_{j=1}^K c_j p_j \quad (6)$$

onde os pesos  $c_j$  são normalizados e dados por:

$$c_j = \frac{C(M^i, T_j)}{\sum_{m=1}^K C(M^i, T_m)} \quad (7)$$

Posição de treino	Leitor 1	Leitor 2	(...)	Leitor n	Índice de compatibilidade
$[X, Y, Z]_1^i$	$\mu_1^{i,1}; \sigma_1^{i,1}$	$\mu_2^{i,1}; \sigma_2^{i,1}$	(...)	$\mu_n^{i,1}; \sigma_n^{i,1}$	$C(M^i, T_1)$
$[X, Y, Z]_2^i$	$\mu_1^{i,2}; \sigma_1^{i,2}$	$\mu_2^{i,2}; \sigma_2^{i,2}$	(...)	$\mu_n^{i,2}; \sigma_n^{i,2}$	$C(M^i, T_2)$
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
$[X, Y, Z]_j^i$	$\mu_1^{i,j}; \sigma_1^{i,j}$	$\mu_2^{i,j}; \sigma_2^{i,j}$	(...)	$\mu_n^{i,j}; \sigma_n^{i,j}$	$C(M^i, T_j)$

$R_1^i$	$R_2^i$	(...)	$R_n^i$	$M^i$
---------	---------	-------	---------	-------

Figura 47: Tabelas do método de comparação de padrões.

### 5.6.3. Filtragem de Kalman com dados de movimento

As zonas perigosas ou potencialmente explosivas terão uma configuração semelhante à zona apresentada na figura 51 como Piso 0. Estas zonas estão normalmente relacionadas com processamento de produtos químicos altamente corrosivos ou de baixo ponto de ignição. A figura 48 ilustra bem o nível de perigosidade de determinadas zonas de uma instalação industrial. O caso ilustrado é o de um operador no processo de Alquilação das instalações da BP em Castellón de la Plana, Valência (Espanha). A zona exige um equipamento de protecção individual (EPI) de duas camadas de um polímero resistente aos agentes agressivos, e um volume de ar entre as duas, por forma a retardar o contacto de um pingo desse agente com a pele humana.

Para corrigir o resultado da estimativa da posição dada pelo método de comparação de padrões, e alcançar uma maior precisão em zonas perigosas, foram desenvolvidas novas *tags* com um sensor de aceleração e um giroscópio, ambos de tecnologia MEMS, e desenvolvido para a *tag* um método de cálculo do deslocamento, ou seja, um algoritmo de pedómetro. O método compreende a amostragem a alta frequência dos valores de aceleração (50Hz) e variação angular (100Hz), sobre os quais se efectua o cálculo da variação do vector posição no plano perpendicular ao vector aceleração da gravidade:

$$p_k = p_{k-1} + d_k R(\theta_k) \frac{(p_{k-1} - p_{k-2})}{\|p_{k-1} - p_{k-2}\|} \quad (8)$$

sendo o deslocamento determinado por:

$$d_k = \|p_k - p_{k-1}\| \quad (9)$$

e a variação angular por:

$$\theta_k = \sphericalangle(p_{k-1} - p_{k-2}, p_k - p_{k-1}) \quad (10)$$

Aquando da ausência de deslocamento, a *tag* afere a direcção da gravidade relativamente aos eixos internos do acelerómetro (coincidentes com os eixos do giroscópio):

$$d_k = 0; \|a_k\| = g \quad (11)$$

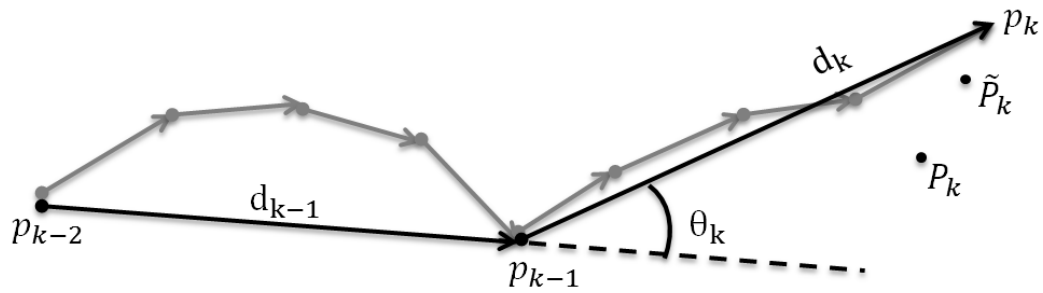


**Figura 48: Operador no processo de Alquilação da BP Castellón.**

Entre o envio de duas mensagens periódicas, a *tag* procede ao cálculo do módulo do seu deslocamento, através das medidas de aceleração. Simultaneamente, a *tag* procede ao cálculo da variação angular projectada no plano perpendicular ao eixo da gravidade. A variação do vector posição é indicada na mensagem enviada aos leitores, através das medidas invariantes da distância percorrida, e do valor resultado da variação angular deste vector posição face ao anterior, no referido plano (ver figura 49), ou seja, o ângulo de rotação do vector posição face ao eixo da gravidade. O método assume que o portador da *tag* se move no plano perpendicular ao eixo da gravidade.

O motor de localização procede continuamente à estimativa da posição  $P_k$  pelo método de comparação de padrões. O método de estimativa da posição por cálculo do módulo do deslocamento, corre em paralelo com o método baseado em RSSI, ambos no motor de localização, e procede à estimativa da posição  $p_k$  baseada nos dados de  $d_k$ ,  $\theta_k$  e nas melhores estimativas de posição  $\tilde{P}_{k-2}$  e  $\tilde{P}_{k-1}$ .

Os métodos de produção dos valores  $d_k$  e  $\theta_k$  (processados na *tag*), bem como o filtro de Kalman que corre no motor de localização, estão descritos com detalhe no pedido de patente [275].



**Figura 49: Implementação de um filtro de Kalman com dados de movimento.**

A melhor estimativa da posição  $\tilde{P}_k$  é então obtida a partir de uma implementação de um filtro de Kalman, onde a medida  $P_k$  é corrigida pelo processo de  $p_k$ :

$$\tilde{P}_K = p_K + G(P_K - p_K) \quad (12)$$

bem como pelos erros de ambas as estimativas (Ganho de Kalman):

$$G = \frac{\sigma_p^2}{(\sigma_p^2 + \sigma_P^2)} \quad (13)$$

## 5.7. Testes em ambiente industrial

Foram realizados testes aos diferentes sistemas em diferentes unidades industriais. O primeiro sistema, previamente testado em laboratório, foi instalado na torre de cogeração da Soporcel, na Figueira da Foz. Tratando-se de uma instalação temporária, os leitores foram equipados com baterias. Os métodos existentes no estado-da-arte, e já implementados no sistema de laboratório, foram então testados ambiente real.

Os novos métodos, desenvolvidos no âmbito deste trabalho, foram testados num processo industrial mais próximo do cenário-alvo de investigação e desenvolvimento deste projecto.

### 5.7.1. Avaliação de métodos existentes

Os métodos existentes mais importantes e já implementados no servidor de localização – variantes do kNN, foram testados em 3 dimensões no interior de uma de cogeração da Soporcel. Os processos de treino e de localização foram realizados com o uso partilhado do único canal RF configurado, para ambos os fluxos de informação: medida de RSSI e transmissão das medidas para o *gateway*. Os 11 leitores foram instalados em 3 pisos diferentes, 4, 5 e 6 (a uma altura do chão de 16m, 19,4m, e 23,5m respectivamente), distribuídos por uma área de cerca de 1240m<sup>2</sup> por piso (40x31m). O edifício da torre é

coberto, mas o seu interior é maioritariamente amplo, e os pisos são constituídos por plataformas de grelha metálica (ver figura 50).

Os testes foram realizados com o mesmo princípio dos anteriores, com a *tag* de teste a emitir no mesmo intervalo da *tag* de treino, a uma distância de um metro uma da outra. Os erros obtidos pelo motor de localização baseado no método kNN, e corrigidos pelo filtro de Kalman, estão apresentados na tabela 16. O estudo foi realizado com cerca de 120 amostras em 174 pontos de treino e 87 pontos de teste. Por forma a melhorar o desempenho do sistema, optou-se por introduzir as barreiras físicas do espaço de implementação.

Um novo teste foi realizado procedendo agora o envio de duas mensagens por período, com potências de emissão distintas. O motor de localização compreende uma rede de treino obtida à maior potência transmissão. O resultado é computado pela implementação do método kNN, e é corrigido para a área de interesse delimitada pelos 4 leitores que medem maior intensidade de sinal para a mensagem transmitida com menor potência (em cada período).



**Figura 50: Espaço de implementação na SOPORCEL.**

Foram avaliados vários níveis de potência de emissão que pudessem maximizar esta correcção à estimativa da posição. Feita essa análise preliminar, optou-se por alterar o nível de potência de base para 0dBm e definir o nível inferior em -30dBm. Foram recolhidas cerca de 120 amostras em 174 pontos de treino e 60 pares de amostras em 132 pontos de teste, dos quais foram validados 89 (aqueles que apresentam um mínimo de 3 leituras à potência mais baixa). Os resultados, listados na coluna 2P-kNN da tabela 16, apresentam melhorias significativas no grosso das amostras, mas mantém um erro bastante elevado para o percentil 95.

**Tabela 16: Avaliação da precisão de localização com o método KF-kNN.**

Quartis	kNN	KF-kNN	2P-kNN
Mediana	1,87 m	3,39 m	0,35 m
Q3	7,53 m	7,19 m	6,61 m
Perc.95	14,97 m	13,34 m	13,18 m

Os processos de treino são muito longos, em particular o de marcação dos pontos da grelha. O tempo de acesso ao recinto e o custo associado às deslocações e aos seguros também constituíram constrangimentos aos ensaios. Os testes na Soporcel decorreram em 5 dias úteis, um por semana, tempo que não permitiu um maior repetição dos testes.

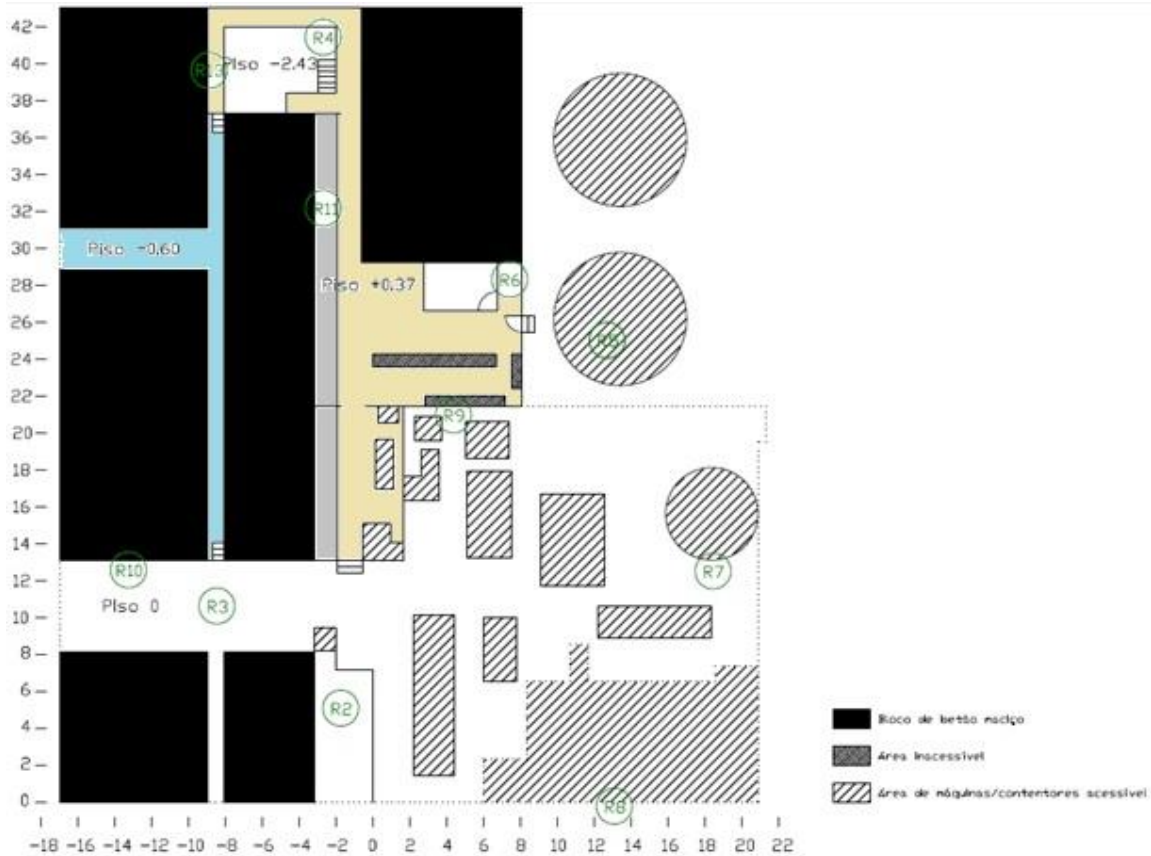
Ainda que não tenham produzido os resultados esperados, os ensaios na Soporcel permitiram à equipa perceber algumas fragilidades do sistema. A mais evidente é a limitação dos leitores configurados como repetidor. Pela sua natureza, os módulos rádio não conseguem transmitir e receber mensagens ao mesmo tempo [86], pelo que se perdem leituras da *tag* quando o leitor se encontra a comunicar para o *gateway*. Este facto não constituiu qualquer problema nos primeiros testes com 3 *tags* a comunicar 2 mensagens/s mas foi identificado no teste a duas potências com o envio da segunda mensagem enviada na sequência-máquina da primeira. Uma vez introduzido um atraso de 500ms, acompanhando a taxa de transmissão de treino a operar nas outras *tags*, o sistema foi eficaz. Este facto corrobora a necessidade do repetidor ter dois canais RF (ver 805.5).

Os ensaios permitiram também verificar que a baixa energia disponível da bateria provoca a não transmissão de mensagens. Ainda assim, quando o transmissor consegue emitir não há alterações ao RSSI medido com uma bateria cheia.

### 5.7.2. Avaliação do método de comparação de padrões

Para avaliar o novo método, o sistema constituído por 11 leitores e 5 *tags*, já usado na Soporcel, foi instalado numa zona de processo da CIREs, em Estarreja, numa área de 1600m<sup>2</sup>, ilustrada na figura 51. Com o novo algoritmo, cada leitor constitui uma dimensão dos vectores medida e padrão. Desta forma deixa de ser necessário conhecer a posição exacta dos leitores, garantindo apenas que a posição de cada um é fixa ao longo do tempo de vida do sistema. Os leitores foram distribuídos no espaço de forma a que cada posição de treino e de teste tenha boa cobertura de rede, e foram colocados a alturas diferentes por forma a criar assimetrias na medida de RSSI e melhor distinguir padrões. A área onde se encontram os leitores R2, R3, R5, R7, R8 e R9 está à cota de 0m – plano de referência. A área onde se encontram os leitores R6, R11 e R13 está à cota de +0,37m. O leitor R4 foi instalado por baixo de um varandim numa área à cota de -2,43m. O leitor R10 foi instalado num varandim a cerca de 6m de altura do plano de referência (cota de 0m).





**Figura 51: Planta do espaço de implementação – CIRES, Estarreja.**

Foram recolhidos vectores-padrão em 158 pontos do espaço de implementação, em pontos que se aproximam a uma grelha de 2m, e recolhidas medidas em 52 pontos diferentes. Para cada ponto foram realizadas 3 amostras de 120 medidas, correspondentes a um minuto de transmissões da tag à taxa de duas mensagens por segundo. Após a constituição desta base de dados foram computadas as estimativas de posição, para diferentes valores de K (melhores padrões). Os melhores resultados ocorreram par  $K=5$ , e estão apresentados na tabela 17, por percentil e por zona de implementação do sistema. A zona de maior área, à cota 0, possui um maior erro associado, que no percentil 99,5 é de 7m. A zona de menor dimensão, e para a qual o método foi corrigido em área delimitada de uma forma mais exacta, o erro para o mesmo percentil é cerca de 1,5m.

Os resultados encontrados com este método são significativamente melhores que os resultados anteriores e permitem validar o método como base de cálculo do sistema. De reforçar que o método exige um esforço inicial grande e dispendioso em recursos humanos para realizar uma grande cobertura do sistema. Para zonas seguras, deve-se alargar a distância entre pontos da grelha para permitir uma implementação mais expedita, mesmo que se obtenha menor precisão.

**Tabela 17: Precisão do método de comparação de padrões.**

Percentis	Área total	Cota 0	Cota +0,37	Cota -0,60	Cota -2,43
<b>Q3</b>	2,34 m	2,53 m	1,94 m	1,89 m	0,67m
<b>Perc.95</b>	4,49 m	4,72 m	3,37 m	3,36 m	1,39 m
<b>Perc.99,5</b>	6,64 m	6,99 m	4,22 m	3,72 m	1,54 m

### 5.7.3. Avaliação do método corrigido com pedómetro

O algoritmo desenvolvido com os dados inerciais foi testado em dois percursos distintos, nas zonas de maior erro de estimativa da posição. Cada percurso foi repetido 10 vezes, com velocidade idêntica, tanto quanto é possível ao humano, portando a *tag* à cintura. Na figura 52 encontra-se ilustrado o percurso efectuado na zona com maior erro, de cota 0. O percurso tem cerca de 23m e foi realizado num tempo médio de 17s. Na figura 53 ilustra-se o percurso efectuado na zona da sala de controlo, à cota de +0,37m. O percurso tem em cerca de 27m e foi realizado num tempo médio de 22s. Os pontos a azul são os pontos reais do teste. Os pontos vermelhos correspondem à estimativa da posição corrigida pelos dados de movimento.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 18. Os objectivos de localização com grande precisão a partir de tecnologia com maior viabilidade para ambientes industriais de áreas grandes – baseada na medida da intensidade de sinal – foram cumpridos. Em ambos os casos o erro é inferior aos 5m no percentil 99,5. O baixo número de experiências não nos permite afirmar que o sistema terá o mesmo desempenho para um intervalo de confiança de 99,5%, mas os resultados provam que há oportunidade para esta tecnologia responder ao requisito inicial.

A limitação ao uso deste algoritmo está no consumo de energia. O uso permanente dos MEMS coloca em causa a autonomia da *tag*, como se apresenta na tabela 19. Só o uso da inteligência do sistema permite gerir os processos da *tag* com o objectivo de otimizar o seu consumo energético e aumentar a sua autonomia. Assim, foi considerado desligar a *tag* quando em simultâneo não há movimento e a esta se encontra num local definido como portaria, reduzindo assim os ciclos normais de operação para 8h diárias, e 5 dias por semana. Foi ainda considerada a utilização do algoritmo inercial para zonas muito perigosas, onde os operadores estarão também menos tempo. Considerando que num turno de 8h só conseguem estar em tais zonas durante 6h, e considerando que o algoritmo só vai trabalhar com movimento (assumindo aqui 50% do tempo), obtiveram-se os valores de autonomia em função do número de visitas mensais aos locais de maior perigo, também apresentados na tabela 19.

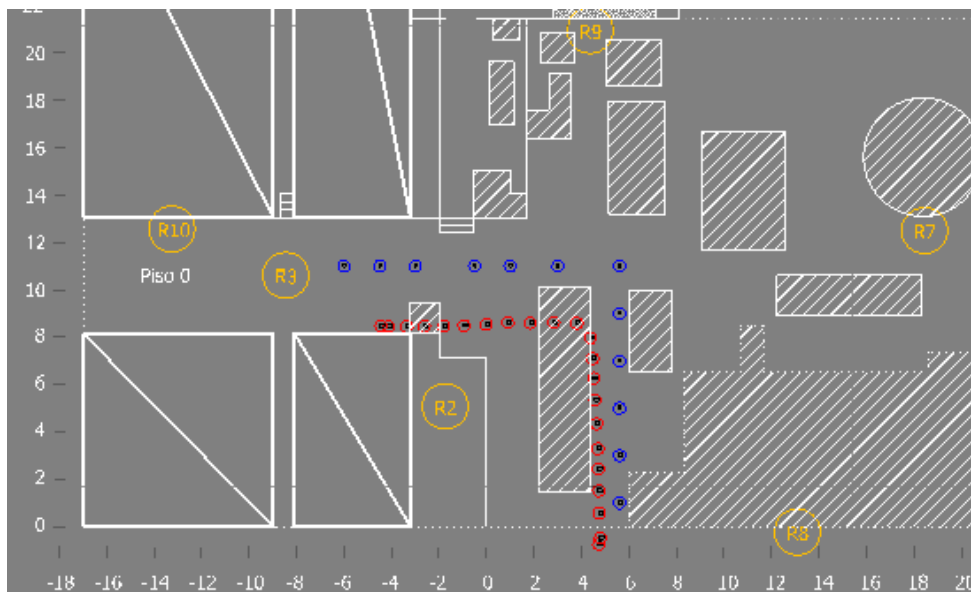


Figura 52: Percurso 1, cota 0.

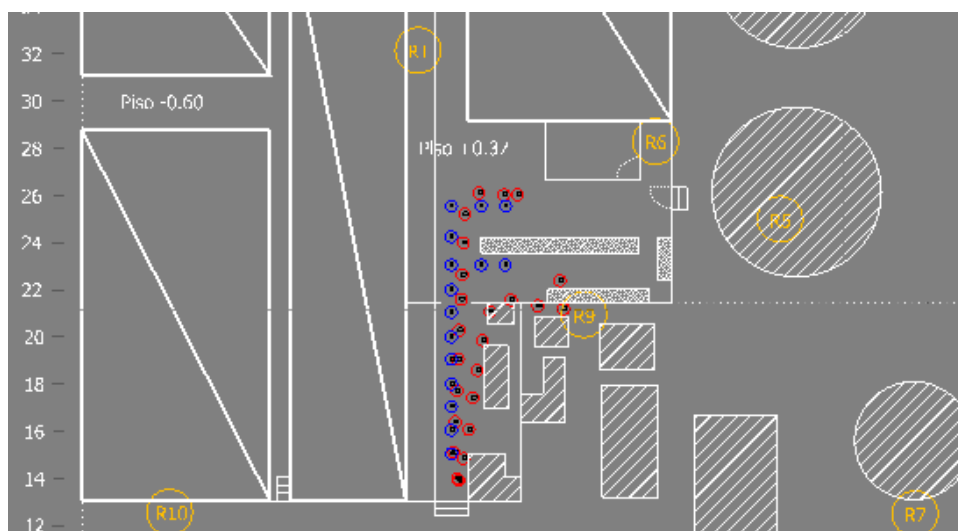


Figura 53: Percurso 2, cota de +0,37m.

Tabela 18: Precisão do motor de localização corrigido com movimento.

	Percurso z=0	Percurso z=0,37
<b>Q3</b>	2,80 m	2,35 m
<b>Perc.95</b>	3,15 m	2,44 m
<b>Perc.99,5</b>	3,32 m	2,46 m

**Tabela 19: Autonomia da tag com a pilha SAFT LS14500 .**

	Comparação de padrões (1)	Padrões + KFm	(1) + KFm (1 dia/mês)	(1) + KFm (2 dias/mês)	(1) + KFm (3 dias/mês)
<b>Consumo por ciclo</b>	28,55 $\mu$ A	3,31 mA			
<b>Autonomia</b>	10 anos	100 dias	5 anos	3 anos e meio	3 anos

## 5.8. Discussão

O motor de localização baseado no método de comparação de padrões de RSSI produz resultados bastante satisfatórios, com erros inferiores a 7m dentro do percentil 99,5. A estimativa da posição pode ser bastante mais precisa com recurso ao algoritmo que caracteriza o movimento da *tag*, baseado nas medidas instantâneas de aceleração e variação angular, nos 3 eixos.

O uso deste algoritmo permitiu ao motor de localização melhorar a sua precisão em cerca de 3m no pior caso, obtendo uma estimativa com erro de 3,3m.

O uso permanente do cálculo inercial faz esgotar a bateria de 2600mAh em 100 dias úteis (valor da estimado para uma exploração de até 25% da carga energia nominal), considerando desde logo as operações mencionadas na secção anterior – 6h/turno e exploração de 50% no tempo). Tomando em conta que as zonas de perigo não são visitadas diariamente, obtém-se uma autonomia superior a 4 anos, para uma visita mensal a zonas muito perigosas. Este cenário justifica-se, uma vez que o método de comparação de padrões dá por si só uma boa resposta em precisão para a generalidade dos casos.

O uso do filtro de Kalman pode ser espoletado por ordem dos leitores que definem o interior de uma zona perigosa, através de mensagem própria para o efeito, que as *tags* vão receber no intervalo de tempo em que se encontram a escutar o canal, imediatamente após o envio da sua mensagem de identificação para localização. A detecção de movimento é outra função base da *tag*, que opera em contínuo, e neste caso permite desligar o giroscópio e a aquisição instantânea de aceleração, quando o corpo não se encontra a dar passos. Desta forma o sistema otimiza a gestão da autonomia das *tags* de forma automática, garantindo uma precisão consideravelmente superior onde o risco é maior e onde se exige uma resposta mais pronta ao resgate.

O uso do algoritmo de caracterização de movimento pode ser igualmente implementado em sistemas cujas *tags* são equipadas com pilhas secundárias. Este cenário é viável nas minas subterrâneas, onde as *tags* são projectadas para operar a partir da pilha de mineiro, carregadas diariamente. Outras aplicações podem passar por ter *tags* dedicadas a zonas perigosas, ou equipadas com tecnologia para carregamento sem fios [293] [294] [295]. O conceito passa por ter, numa determinada portaria, uma bancada de carregamento de baterias, sendo suficiente para tal, que estas sejam dispostas em cima da bancada [296], e um procedimento em que os operadores deixam as *tags* nessa portaria após o seu turno.

## 5.9. Gestão de tráfego em minas subterrâneas

As minas subterrâneas constituem um ambiente industrial bem diferente dos mencionados anteriormente. Em termos de segurança trata-se de um espaço confinado, e portanto com regras de gestão de processos (como a evacuação e resgate) bastante mais rigorosos. No âmbito deste trabalho foi projectado um sistema de localização de pessoas em minas, a partir do qual se acrescentaram funcionalidades como a detecção de proximidade, de forma a promover ao condutor de veículo uma visão alargada (artificial) do espaço que o rodeia, através de um ecrã na cabine do veículo. Esta solução é particularmente importante nos veículos muito pesados de uma mina, os quais têm normalmente a cabine num dos lados do veículo, e dessa forma, uma visão mais reduzida do lado oposto. O sistema de detecção de proximidade funciona a partir dos resultados do sistema de localização, para evitar colisões entre veículos, e mais importante, para evitar o atropelamento de pedestres. Ambos os sistemas foram testados e implementados na mina da SOMINCOR [297].

A tecnologia desenvolvida em 5.1 serviu também para responder a outro desafio deste sector – a gestão de tráfego em galerias subterrâneas. A exploração mineira subterrânea é caracterizada por ter extensas galerias entre os pontos de exploração e a saída à superfície. Estas galerias são dimensionadas em secção para permitir a passagem de um qualquer veículo próprio à exploração. Em diferentes pontos destas galerias existem pontos de cruzamento, designados por refúgios. Só nestes pontos é possível fazer cruzar dois veículos. A operação mineira, sem recurso a tecnologias de gestão de tráfego, está sujeita aos frequentes encontros frontais entre veículos, obrigando a que um deles tenha de voltar atrás, até um refúgio próximo, para deixar passar o outro. Esta situação provoca a diminuição da produtividade, medida em quantidade de material extraído por dia.

Com base no sistema de localização já referido, mas implementando um método mais simples de identificação de presença, foi criada uma solução de gestão de tráfego, testada e implementada numa mina do grupo MATSA, em Aguas Tenidas (Espanha) [298]. A aplicação procede à localização em tempo-real dos veículos identificados e actua os semáforos existentes em cada refúgio de forma a fazer parar o veículo que desce vazio no refúgio imediatamente antes ao ponto de cruzamento espectável (ver figura 54). O objectivo do sistema é conseguir que o veículo que sobe carregado não seja obrigado a parar em todo o seu percurso.

A solução compreende a identificação de viaturas com *tags*, e a distribuição de leitores ao longo das galerias. No caso da MATSA, os leitores foram dispostos a cerca de 60m de cada refúgio, a montante e a jusante daquele, ao longo da rampa de acesso e a superfície, a partir das zonas de carga (ilustrada na figura 55). Os refúgios distam de cerca de 300m num acesso com cerca de 3km [299]. Em cada refúgio foram colocados dois semáforos controlados pelo EWS GIP (também referido em 5.3). Esta unidade inteligente reencaminha as mensagens de localização, provenientes dos leitores conectados ao seu barramento CAN, para a máquina de cálculo onde corre o motor de localização, através da rede TCP/IP.

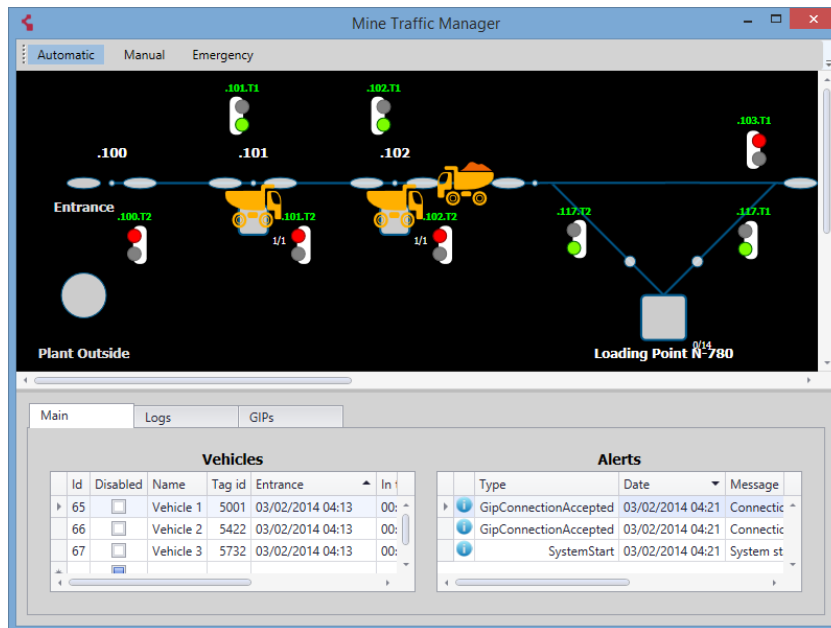


Figura 54: Aspecto gráfico da solução de gestão de tráfego implementada.

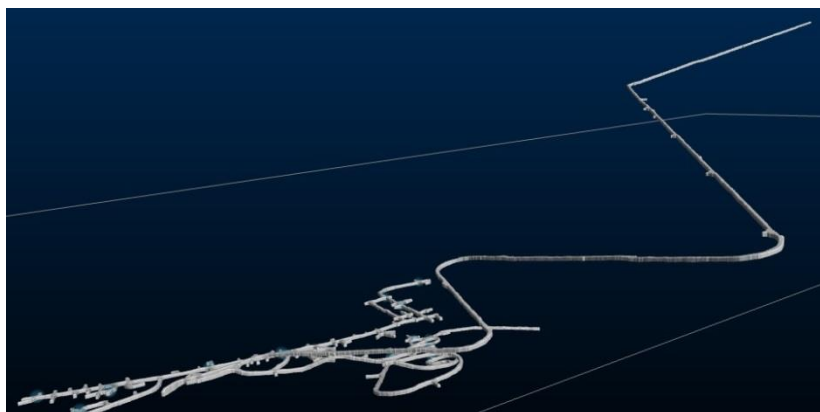


Figura 55: Ilustração da rampa de acesso à superfície.

A aplicação de gestão de tráfego (EWS TM) consulta os resultados das estimativas da posição, e envia ao EWS GIP as ordens de actuação dos semáforos. A EWS TM permite inúmeras configurações do sistema, como a capacidade de cada refúgio (em número de veículos), definição de regras de tráfego, ou priorização de veículos em entroncamentos; bem como de ajustes aos métodos, como o número mínimo de mensagens para entender a entrada ou saída de uma zona. À data da redacção do presente documento, o sistema encontra-se em fase de comissionamento e arranque, pelo que ainda não é conhecido o resultado da optimização da produtividade. No entanto são espectáveis a redução do tempo de subida de veículos carregados, bem como da quantidade de combustível usada pelos mesmos.

### 5.9.1. Avaliação da medida de RSSI em função do movimento

O método desenvolvido para a gestão de tráfego é baseado na medida de RSSI e na avaliação da taxa de perda de pacotes. Para validar o método foi necessário começar por avaliar o comportamento do RSSI com as *tags* em movimento. Para tal foi realizado um teste de estrada, com um veículo equipado com uma *tag* (circuito semelhante ao do PCB 5, figura 7), e a mover-se a uma velocidade controlada a cerca de 30km/h (8,33m/s). A *tag* foi programada para transmitir a 0dBm. Foram colocados dois leitores a uma distância de cerca de 50m do outro, e seleccionada uma zona com um túnel no espaço intermédio entre os leitores. O objectivo desta selecção foi quebrar mais cedo a leitura por parte do dispositivo do lado contrário ao do veículo, relativamente ao túnel. Na figura 56 está ilustrada a situação geográfica dos leitores no espaço do teste. O circuito foi repetido várias vezes. Na figura 57 são apresentados os dados obtidos num dos testes. O gráfico permite concluir que a *tag* é bem detectada num espaço de cerca de 25-30m antes e depois de cada leitor. No ensaio representado no gráfico, e durante o período de detecção, só houve uma mensagem perdida (ordem 1 do leitor 4). Os restantes ensaios tiveram comportamento semelhante ao representado no gráfico.



Figura 56: Local do teste de movimento em Coimbra.

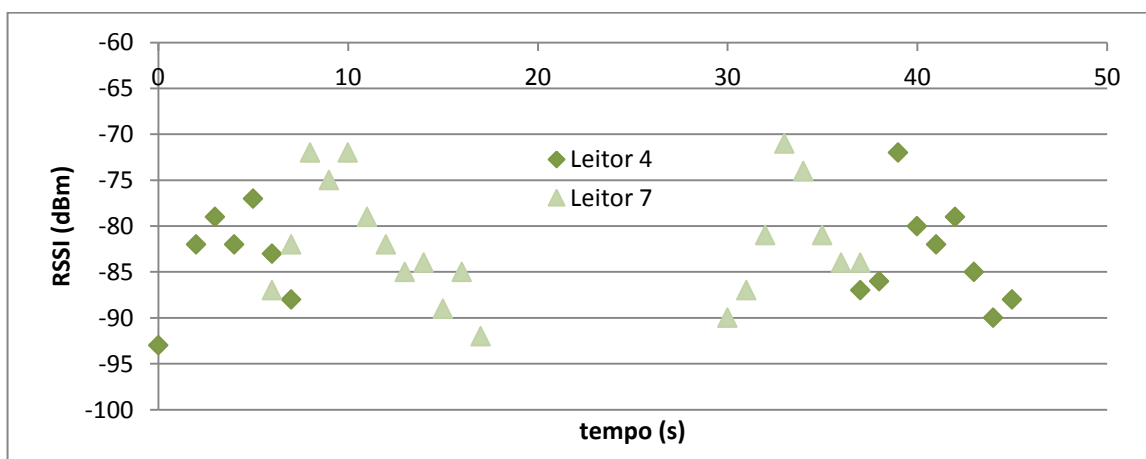


Figura 57: Distribuição do RSSI para uma tag em movimento.

Esta experiência permitiu-nos concluir que a medida de RSSI é demonstrativa do movimento de uma *tag* colocada numa viatura. A taxa perda de pacotes, para este cenário de aplicação, revelou não ser critério. No entanto, no ambiente real da mina da MATSA, a perda de pacotes acontece com alguma frequência em determinadas zonas. Um dos problemas encontrados em ambiente real foi a detecção de uma mensagem num leitor incorrecto, isto é, dado um veículo num refúgio A, uma mensagem aleatório enviado por este pode ser detectada num leitor de um refúgio B (a cerca de 240m). A resolução deste problema passou pela implementação de limites mínimos ao valor de RSSI medido, bem como de um limite mínimo de mensagens recebidas com números de ordem seguidos, para que estas sejam interpretadas pelo motor de localização.

### 5.9.2. Notas finais

Os sistemas apresentados nesta secção são compostos por redes de comunicação de tecnologias diferentes, com o objectivo de melhor servir cada necessidade. Para efeitos de localização, a integração de dispositivos MEMS com redes sem fios de longo alcance e baixo consumo tem a capacidade de produzir uma caracterização de movimento dos activos e das pessoas que não é possível obter com tecnologias passivas. A mais completa e rigorosa caracterização de processos abre oportunidades para a implementação de aplicações de controlo e actuação, como foi o caso da gestão de tráfego.

As WPAN são a opção mais eficiente para realizar a localização em espaços abertos e de maior área. Ainda assim As tecnologias passivas (RFID) podem ser complementares em determinadas soluções, por via do controlo de acessos, promovendo a maior precisão em espaços confinados e de áreas menores. Em Portugal, a identificação de pessoas por sistemas de localização não é permitida pela Comissão Nacional de Protecção de Dados. O ser humano pode ser localizado em tempo-real, e ser atribuído a um grupo, mas não identificado automaticamente, podendo voluntariamente identificar-se perante um leitor RFID.



## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho são exploradas as necessidades da indústria em diferentes vectores de actuação: monitorização da condição de activos num quadro de manutenção preditiva; gestão da segurança de pessoas e activos; e optimização da produção. O trabalho desenvolvido versa os 3 eixos de actuação, procurando discutir o maior número de variáveis que caracterizam os problemas e condicionam as soluções.

No quadro da manutenção preditiva, foi estudado o entendimento a ter com diferentes equipas de manutenção, começando pelo reconhecimento fino dos eventos que devem desencadear alarmes e quais aqueles que embora sejam úteis não requerem a atenção imediata. A quantidade de dados que é possível gerar com sistemas de monitorização é enorme, e o tempo de análise por mão humana é escassa, pelo que urge que cada sistema de monitorização da condição técnica de funcionamento termine numa aplicação de suporte à decisão. É assim importante dotar de inteligência o sistema geral de monitorização de activos, para que este possa ser útil, isto é, para que possa ser um importante mecanismo de apoio à decisão. Se esta inteligência for colocada no instrumento de medida, logo no ponto de aplicação, não só se aumenta a independência dos sistemas como se promove a mais completa caracterização dos activos e dos processos, ao mesmo tempo que se diminuem débitos de informação e se reduz os volumes de dados arquivados, mantendo a mesma quantidade de informação, promovendo assim a melhor gestão das infra-estruturas.

Neste trabalho foi demonstrado que a capacidade de decisão pode ser introduzida em dispositivos sem fios de baixo consumo, possibilitando assim a instalação de sensorização em locais mais inóspitos e/ou em movimento, e assegurando a autonomia necessária à viabilidade do mesmo. Para este resultado contribuem a bem dimensionada memória e a correcta escolha da frequência de processamento. Neste quadro, e com um programa mais simples e eficiente, foram conseguidos os objectivos de autonomia e baixo custo de manutenção do sistema, principalmente em tempos de consignação de equipamentos onde os dispositivos são instalados. A acomodação do tráfego de mensagens no sistema a condições de largura de banda limitada em redes sem fios de baixo consumo foi conseguida através da “inteligência” embebida nos sensores, que permite realizar cálculos *in loco* e transmitir apenas informação de mais “alto nível”, relevante para o suporte à decisão.

O trabalho demonstrou que as arquitecturas de inteligência distribuída funcionam e contribuem para esta boa gestão de recursos. Os actuais sistemas embebidos permitem, com baixos recursos, efectuar cálculos fundamentais aos processos – como a caracterização do movimento – e comunicar de forma eficiente a informação. Foi também demonstrado que as unidades intermédias das redes de baixo consumo têm a capacidade para realizar operações de cálculo e de preparação que conduzem à franca redução do volume de dados, servindo a mesma qualidade de informação, sem por em causa as operações de reencaminhamento. Este trabalho conclui assim que os sistemas embebidos construídos em redes inteligentes de baixo consumo, promovem a melhor gestão dos activos e processos industriais.

No decorrer deste trabalho surgiu ainda a oportunidade da implementação de sistemas inteligentes para fins de controlo e intervenção directa no aumento da produtividade. Este trabalho foi bastante gratificante e foi aquele que demonstrou maior interesse por parte dos parceiros de inovação, clientes da eneida® – é uma reacção natural, dada a relação directa de cada solução com a facturação do parceiro. Mesmo assim, e muito por essa tão estreita relação, a integração M2M de sistemas embebidos em aplicações de controlo, seja por meio de redes sem fios ou de redes de campo, é sempre vista com outra exigência.

No quadro da segurança de activos e pessoas, foram discutidas as regras de dois cenários bem distintos mas igualmente perigosos, onde um acidente pode ser fatal. A instalação de sistemas inteligentes de caracterização e actuação em infra-estruturas da rede eléctrica exige a presença de um forte dispositivo de segurança, que passa pela consignação do equipamento alvo, e da confirmação deste acto pelas diferentes partes envolvidas. As acções desenvolvidas em zonas com atmosferas potencialmente explosivas exigem o uso de equipamento de protecção individual específico para retardar os efeitos de um possível acidente. No âmbito deste trabalho foram realizadas formações de segurança, no primeiro caso com a própria EDP e no segundo caso com a INTERTEK, e adquiridos então os necessários conhecimentos de segurança em perímetros industriais, aos níveis prático, legal e normativo.

Em ambos os cenários, os dispositivos que compõem um sistema inteligente de caracterização da condição não podem – mesmo em caso de falha na sua operação –, pôr em causa a integridade dos equipamentos onde são instalados. Por essa razão, são exigidas as certificações segundo as normas próprias, que constituem por sua vez a harmonização de diferentes directivas legais. Das áreas classificadas aos requisitos de um produto de electrónica, todo o estudo foi conduzido para cumprir com as normas de segurança de cada espaço. Neste âmbito foram conseguidas as certificações Ex necessárias aos sectores químicos, onde foram realizados alguns projectos-piloto em ambiente real. Neste sector foi ainda identificada a necessidade da criação de sensores de monitorização da condição de válvulas e purgadores. O novo projecto vai criar sensores inteligentes, sem fios, alimentados por via de captura energética para que, através da monitorização contínua da condição destes dois activos, se faça uma mais fina gestão da manutenção dos mesmos, diminuindo o prejuízo em perdas de energia, que hoje se estimam em cerca de 300 mil euros mensais. O conceito dos sensores a desenvolver, descritos na matriz técnica do projecto, foi submetido aos pares [300] e aceite para publicação.

## REFERÊNCIAS

- [1] BLS, U.S. Dept. Labor, "Occupational Outlook Handbook, 2012-13 Edition," 19 Março 2012. [Online]. Available: <http://www.bls.gov/ooh/computer-and-information-technology/>. [Acedido em 2012].
- [2] R. Hundt, "The Internet: from here to ubiquity," *Computer, IEEE*, vol. 30, n.º 10, pp. 122-124, 1997.
- [3] ITU, ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things, Geneva, 2005.
- [4] K. Ashton, "RFID Journal," 22 Junho 2009. [Online]. Available: <http://www.rfidjournal.com/article/view/4986>. [Acedido em 2012].
- [5] Gartner, Inc., "Worldwide Mobile Connections," 4 August 2011. [Online]. Available: <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1759714>. [Acedido em 2012].
- [6] J. Brazell, L. Donoho, J. Dexheimer, R. Hanneman e G. Langdon, M2M: The Wireless Revolution, Texas: Texas State Technical College Publishing, 2005.
- [7] Lawton, G., "Machine-To-Machine Technology gears up for growth," *Computer (9)*, pp. 12-5, 2004.
- [8] Eneida, "Eneida Wireless & Sensors," [Online]. Available: [www.eneida.pt](http://www.eneida.pt). [Acedido em 2012].
- [9] T. J. R. Latrobe e G. L. R. Irwin. USA Patente 3898439, 1975.
- [10] J. Decotignie e P. Pleinveaux, "A survey on industrial communication," *Annales Des Télécommunications*, vol. 48, n.º 9-10, pp. 435-448, 1993.
- [11] H. Zimmermann, "OSI Reference Model - The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 28, n.º 4, pp. 425-432, 1980.
- [12] J. Day e H. Zimmermann, "The OSI reference model," *Proceedings of the IEEE*, vol. 71, n.º 12, pp. 1334-1340, 1983.

- [13] A. Tanenbaum e D. Wetherall, "Multiple Access Protocols," em *Computer Networks*, 5ª ed., Seattle, WA, Prentice Hall, 2011, pp. 261-280.
- [14] N. Malcom e Z. W., "The timed-token protocol for real-time communications," *IEEE Computer*, vol. 27, n.º 1, pp. 35-41, Jan. 1994.
- [15] Organization, Modbus, [Online]. Available: [www.modbus.org](http://www.modbus.org). [Acedido em 2013].
- [16] P. Dao-gang, Z. Hao, Y. Li e L. Hui, "Design and Realization of Modbus Protocol Based on Embedded Linux System," em *Embedded Software and Systems Symposia (ICCESS2008), Proceedings of the 2008 International Conference on*, Sichuan, 2008.
- [17] M. Dubreuil, C. Gagne e M. Parizeau, "Analysis of a master-slave architecture for distributed evolutionary computations," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 36, n.º 1, pp. 229-235, 2006.
- [18] Modbus Org., "Modbus over serial line specification and implementation guide," 2002. [Online]. Available: [modbus.org](http://modbus.org).
- [19] Modbus Org., "Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide," 2006. [Online]. Available: [modbus.org](http://modbus.org).
- [20] G. Guarese, F. Sieben, T. Webber, M. Dillenburg e C. Marcon, "Exploiting Modbus Protocol in Wired and Wireless Multilevel Communication Architecture," em *Symposium on Computing System Engineering, Proceedings of 2012 Brazilian*, Natal, 2012.
- [21] S. Xuehua, L. Min, W. Hesheng, W. Hong e L. Fei, "The Solution of Hybrid Electric Vehicle Information System by Modbus Protocol," em *Electric Information and Control Engineering (ICEICE), Proceedings on 2011 International Conference on*, Wuhan, 2011.
- [22] V. Gaspes e Y. Wang, "A Compositional Implementation of Modbus," em *Industrial Embedded Systems (SIES 2011), Proceedings of 6th IEEE International Symposium on*, Vasteras, 2011.
- [23] G. H. a. K. El-Khatib, "Securing Modbus Transactions Using Hash-Based Message Authentication Codes and Stream Transmission Control Protocol," em *Communications and Information Technology (ICCIT-2013), Proceedings of the 3rd International Conference on*, Beirut, 2013.
- [24] T. Morris, R. Vaughn e Y. Dandass, "A Retrofit Network Intrusion Detection System for MODBUS RTU and ASCII Industrial Control Systems," em *Proceedings of 2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, HI, 2012.
- [25] C. i. Automation. [Online]. Available: [www.can-cia.org](http://www.can-cia.org). [Acedido em 2013].
- [26] ANSI, "ISO 11898, Road Vehicles Controller Area Network (CAN) Package".
- [27] Bosch, [Online]. Available: [www.bosch.com](http://www.bosch.com). [Acedido em 2013].
- [28] H. Takagi e L. Kleinrock, "Throughput Analysis for Persistent CSMA Systems," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 33, n.º 1, pp. 627-638, 1985.

- [29] CAN in Automation, "Part 1: Cabling and connector pin assignment," em *CiA 303 Recommendation*, 2010.
- [30] CAN in Automation, "CiA 301, CANopen application layer and communication profile," 2011.
- [31] CiA, "CAN in Automation," [Online]. Available: <http://www.can-cia.org>. [Acedido em 2012].
- [32] F. Cardoso, P. Falcão, L. Oliveira, N. Rocha, A. Cruz e B. Ribeiro, "Defining scenarios in home and building automation: CANopen and the virtual entities approach," em *Proceedings of the 10th iCC*, Rome, 2005.
- [33] CAN in Automation, "Time-triggered CAN," [Online]. Available: [www.can-cia.org/index.php?id=166](http://www.can-cia.org/index.php?id=166). [Acedido em 2013].
- [34] M. Bertoluzzo, "Experimental Activities on TTCAN Protocol," em *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, Sofia, 2005.
- [35] L. Almeida, P. Pedreiras e J. Fonseca, "The FTT-CAN protocol: why and how," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 49, n.º 6, pp. 1189-1201, 2002.
- [36] M. Imoto, "Global standardization activities of DeviceNet," em *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, Osaka, 2002.
- [37] Rockwell Automation, "Allen-Bradley," [Online]. Available: [ab.rockwellautomation.com](http://ab.rockwellautomation.com). [Acedido em 2013].
- [38] V. Schiffer, K. Vandesteeg, D. Vasko e J. Lenner, "Introduction to DeviceNet safety," em *Factory Communication Systems, 2000. Proceedings of IEEE International Workshop on*, Porto, 2000.
- [39] IEC 61508 ed2.0, "Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems," 2010.
- [40] IEC 61511-SER ed1.0, "Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector," 2004.
- [41] Profibus and Profinet International, "Profibus," [Online]. Available: [www.profibus.com](http://www.profibus.com). [Acedido em 2013].
- [42] IEC 61158-2 ed5.0, "Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part 2: Physical layer specification and service definition," 2010.
- [43] IEC 61784-1 ed3.0, "Industrial communication networks - Profiles - Part 1: Fieldbus profiles," 2010.
- [44] H. Kleines, S. Detert, M. Drochner e F. Suxdorf, "Performance Aspects of PROFINET IO," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 55, n.º 1, pp. 290-294, 2008.
- [45] A. Willig, "Polling-based MAC protocols for improving real-time performance in a wireless PROFIBUS," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, n.º 4, pp. 806-817, 2003.

- [46] T. Suda e T. Bradley, "Packetized voice/data integrated transmission on a token passing ring local area network," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 37, n.º 3, pp. 238-244, 1989.
- [47] J. Pang, F. Tobagi e S. Boyd, "Generalized access control strategies for integrated services token passing systems," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 42, n.º 8, pp. 2561-2570, 1994.
- [48] M. Kotler, "Proof of stability conditions for token passing rings by Lyapunov functions," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 41, n.º 6, pp. 908-912, 1996.
- [49] E. Tovar e F. Vasques, "Real-time fieldbus communications using Profibus networks," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 46, n.º 6, pp. 1241-1251, 1999.
- [50] HART Communication Foundation, [Online]. Available: [www.hartcomm.org](http://www.hartcomm.org). [Acedido em 2013].
- [51] Emerson Process, "Rosemount," [Online]. Available: <http://www2.emersonprocess.com/en-us/brands/rosemount/pages/index.aspx>. [Acedido em 2013].
- [52] HART Communication Foundation, "FSK Physical Layer Specification, HCF\_SPEC-54, Rev 8.1," 1999.
- [53] HART Communication Foundation, "Token-Passing Data Link Layer Specification, HCF\_SPEC-081, Rev. 9.0," 2012.
- [54] HART Communication Foundation, "Universal Command Specification, HCF\_SPEC-127, Rev. 7.1," 2008.
- [55] HART Communication Foundation, "Common Practice Command Specification, HCF\_SPEC-151, Rev. 10.0," 2012.
- [56] T. Sakamoto, T. Kawanishi e M. Izutsu, "Continuous-phase frequency-shift keying with external modulation," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 12, n.º 4, pp. 589-595, 2006.
- [57] American Telephone and Telegraph Company, Data Sets 202S and 202T Interface Specification - Bell System Technical Reference, The Company, 1976.
- [58] HART Communication Foundation, "C8PSK Physical Layer Specification, HCF\_SPEC-60, 1.0," 2001.
- [59] J. Zhenghua, H. Wang e Y. Zhijia, "Joint design of signal detection, demodulation classification, channel estimation and automatic gain control for multi speed HART," em *Computer Design and Applications (ICCD), Proceedings of International Conference on*, Qinhuangdao, 2010.
- [60] J. Zhenghua, H. Wang e Y. Zhijia, "Backward compatible receiver structure for C8PSK HART," em *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), Proceedings of 3rd IEEE International Conference on*, Chengdu, 2010.
- [61] J. Cobb, "Control in the field with HART communications," *Elsivier, ISA Transactions*, vol. 35, pp. 165-168, 1996.

- [62] A. Guochen, M. Zhiyong, M. Hongtao e S. Bingdong, "Design of Intelligent Transmitter Based on HART Protocol," em *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA'10), Proceedings of International Conference on*, Changsha, 2010.
- [63] L. Chang, S. U. o. C. T. S. C. Inf. Eng. e Z. Guoguang, "The Design of Intelligent Temperature Transmitter Based on HART Protocol," em *Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Proceedings of Second International Conference on*, Harbin, 2012.
- [64] Y. W. Q. X. Z. Mingru, "The development of intelligent pressure transmitter based on HART Protocol," em *E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies (EDT), 2010 International Conference on*, Shenzhen, 2010.
- [65] G. Wang, Q. Shang, S.Yu e S. Yang, "Design of PC Communication with HART Field Instrumentation," em *Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), Proceedings of International Conference on*, Hangzhou, 2012.
- [66] Fieldbus Foundation, [Online]. Available: [www.fieldbus.org](http://www.fieldbus.org). [Acedido em 2013].
- [67] E. Tovar e F. Vasquez, "Using WorldFIP networks to support periodic and sporadic real-time traffic," em *Industrial Electronics Society, 1999. IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE*, São José, CA., 199.
- [68] L. Almeida, E. Tovar, J. Fonseca e F. Vasques, "Schedulability analysis of real-time traffic in WorldFIP networks: an integrated approach," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 49, n.º 5, pp. 1165-1174, 2002.
- [69] The International Society of Automation, [Online]. Available: <http://www.isa.org/>. [Acedido em 2013].
- [70] International Society of Automation, "Part 2: physical layer specifications and service definition," em *ISA S50.02, Fieldbus standard for use in industrial control systems*, 1992.
- [71] International Electrotechnical Commission, [Online]. Available: <http://www.iec.ch/>. [Acedido em 2013].
- [72] International Electrotechnical Commission, "Part 2. Physical layer specifications and service definition," em *IEC 1158-2, International standard for use in industrial control systems*, 1993.
- [73] D. Glanzer e C. Cianfrani, "Interoperable fieldbus devices: a technical overview," *Elsivier, ISA Transactions*, vol. 35, pp. 147-151, 1996.
- [74] M. Santori e K. Zech, "Fieldbus brings protocol to process control," *Spectrum, IEEE*, vol. 33, n.º 3, pp. 60-64, 1996.
- [75] Fieldbus Foundation, "FOUNDATION Fieldbus Specifications, Rev. 1.0," 1996.

- [76] Z. Wang, X. Shen, Y. S. J. Chen, T. Wang e Y. Sun, "Real-time performance evaluation of urgent aperiodic messages in FF communication and its improvement," *Elsivier, Computer Standards & Interfaces*, vol. 27, pp. 105-115, 2005.
- [77] S. Hong e S. Song, "Transmission of a Scheduled Message Using a Foundation Fieldbus Protocol," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 57, n.º 2, pp. 268-275, 2008.
- [78] S. Cavalieri, O. Mirabella e S. Monforte, "Enhancing reliability in IEC/ISA FieldBus," *Elsivier, Computer Standards & Interfaces*, vol. 21, pp. 217-240, 1999.
- [79] IEEE Standard 802.3, "IEEE Standard for Ethernet - Section 1," 2012.
- [80] IEC 61784-2 ed2.0, "Industrial communication networks - Profiles - Part 2: Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC 8802-3," 2010.
- [81] M. Felser, "Real-Time Ethernet - Industry Prospective," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, n.º 6, pp. 1118-1129, 2005.
- [82] F. Lian, J. Moyne e T. D., "Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet," *Control Systems, IEEE*, vol. 21, n.º 1, pp. 66-83, 2001.
- [83] V. Skendzic e A. Guzmia, "Enhancing Power System Automation through the use of Real-Time Ethernet," em *Proceedings of Power Systems Conference (PS'06)*, Clemson, SC, 2006.
- [84] A. Yiming e T. Eisaka, "Industrial Hard Real-Time Traffic Protocol Based on Switched Ethernet," em *Communications and Information Technology, Proceedings of IEEE International Symposium on, Pequim*, 2005.
- [85] P. Zand, S. Chatterjea, K. Das e P. Having, "Wireless Industrial Monitoring and Control Networks: The Journey So Far and the Road Ahead," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 1, pp. 123-152, 2012.
- [86] A. Willig, K. Matheus e A. Wolisz, "Wireless Technology in Industrial Networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, n.º 6, pp. 1130-1151, 2005.
- [87] IEEE Standard 802.11g, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications," 2003.
- [88] IEEE Standard 802.15.4, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," 2006.
- [89] J. Ghaderi e R. Srikant, "The Impact of Access Probabilities on the Delay Performance of Q-CSMA Algorithms in Wireless Networks," *Transactions on Networking*, vol. 21, n.º 4, pp. 1063-1075, 2013.
- [90] Linear Technologies, "Dust Networks," [Online]. Available: [http://www.linear.com/products/wireless\\_sensor\\_networks](http://www.linear.com/products/wireless_sensor_networks).



- [91] K. Pister e L. Doherty, "TSMP: Time Synchronized Mesh Protocol," em *Distributed Sensor Networks (DSN'08), Proceedings of the IASTED International Symposium*, Orlando, FL, 2008.
- [92] IEEE 802.15.4e, "Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer," 2012.
- [93] A. Tinka, T. Watteyne, K. Pister e A. Bayen, "A decentralized scheduling algorithm for time synchronized channel hopping," *ICST Transactions on Mobile Communications and Applications*, vol. 11, n.º 7-9, pp. 1-12, 2011.
- [94] V. C. Gungor e G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, n.º 10, pp. 4258-4265, 2009.
- [95] J. Oliveira, J. Fonseca, P. Bartolomeu e L. Costa, "Evaluating severe noise interference in IEEE 802.15.4 based location systems," em *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'08), Proceedings of IEEE International Conference on*, Hamburg, 2008.
- [96] D. Chang e T. Shiu, "Digital GFSK Carrier Synchronization," em *Circuits and Systems (APCCAS'06), Proceedings on IEEE Asia Pacific Conference on*, Singapura, 2006.
- [97] J. Wong e A. Chen, "2GFSK-4GFSK demodulation in DSP based wireless receiver," em *Signal Processing (ICSP '98), Proceedings of Fourth International Conference on*, Pequim, 1998.
- [98] R. Peterson, R. Ziemer e D. Borth, *Introduction to Spread-Spectrum Communications*, Prentice-Hall, 1995.
- [99] J. Tan e G. Stüber, "Multicarrier Spread Spectrum System With Constant Envelope: Antijamming, Jamming Estimation, Multiuser Access," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, n.º 4, pp. 1527-1538, 2005.
- [100] H. Fathallah e L. Rusch, "A subspace approach to adaptive narrow-band interference suppression in DSSS," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 45, n.º 12, pp. 1575-1585, 1997.
- [101] D. Park, S. Park e K. Lee, "Simple Design of Detector in the Presence of Frequency Offset for IEEE 802.15.4 LR-WPANs," *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, vol. 56, n.º 4, pp. 330-334, 2009.
- [102] Y. Tsai, "M-ary Spreading-Code-Phase-Shift-Keying Modulation for DSSS Multiple Access Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, n.º 11, pp. 3220-3224, 2009.
- [103] H. Saarnisaari, "A General Receiver and Constant Envelope Direct Sequence Signals," em *Military Communications Conference (MILCOM'07), Proceedings on IEEE*, Orlando, FL, 2007.
- [104] K. Cheun e K. Choi, "Performance of FHSS multiple-access networks using MFSK modulation," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 44, n.º 11, pp. 1514-1526, 1996.
- [105] K. Choi e K. Cheun, "Maximum Throughput of FHSS Multiple-Access Networks Using MFSK Modulation," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 52, n.º 3, pp. 426-434, 2004.

- [106] A. Pathan, H.-W. Lee e C. Hong, "Security in wireless sensor networks: issues and challenges," em *The 8th International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2006*, Pyeongchang, Coreia do Sul, 2006.
- [107] I. Chatzigiannakis e A. Strikos, "A decentralized intrusion detection system for increasing security of wireless sensor networks," em *Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on*, Patras, Grécia, 2007.
- [108] A. Perrig, J. Stankovic e D. Wagner, "Security in Wireless Sensor Networks," *Communications of the ACM*, vol. 47, n.º 6, pp. 53-57, 2004.
- [109] G. Dini e M. Tiloca, "Considerations on Security in ZigBee Networks," em *Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, IEEE International Conference on*, Newport Beach, CA, EUA, 2010.
- [110] S. Gueron e A. Gradstein, "Method and apparatus for optimizing Advanced Encryption Standard (AES) encryption and decryption in parallel modes of operation". EUA Patente US8600049(B2), 3 12 2013.
- [111] National Institute of Standards and Technology, "Specification for the Advanced Encryption Standard (AES)," *Federal Information Processing Standards Publication 197*., Novembro 2001.
- [112] J.-b. Shin e J.-s. Park, "Method and apparatus using AES CBC for encrypting and decrypting a message and to verify the message integrity by means of MAC". Europa Patente EP1947798(B1), 7 3 2012.
- [113] R. L. Rivest, A. Shamir e L. Adleman, "A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystem," *Communications of the ACM*, vol. 21, pp. 120-126, 1978.
- [114] Z. Wang, Z. Jia, L. Ju e R. Chen, "ASIP-based Design and Implementation of RSA for Embedded Systems," em *Embedded Software and Systems (HPCC-ICESSE), IEEE 9th International Conference on*, Liverpool, Reino Unido, 2012.
- [115] A. Alkalbani, T. Mantoro e A. Tap, "Comparison between RSA hardware and software implementation for WSNs security schemes," em *Information and Communication Technology for the Muslim World (ICT4M), Int. Conf. on*, Jakarta, Indonésia, 2010.
- [116] J.-J. Hwang, "User authentication based on asymmetric cryptography utilizing RSA with personalized secret". EUA Patente US7988362(B2), 07 06 2011.
- [117] W.-L. Chang, M. Ho e M. Guo, "Fast parallel molecular algorithms for DNA-based computation: factoring integers," em *Bioinformatics and Bioengineering, BIBE. Proceedings of 4th IEEE Symposium on*, Taichung, Taiwan, 2004.
- [118] D. Hankerson, A. J. Menezes e S. Vanstone, *Guide to Elliptic Curve Cryptography*, EUA: Springer-Verlag, 2004.

- [119] H. Eberle, A. Wander, N. Gura, S. Chang-Shantz e V. Gupta, "Architectural Extensions for Elliptic Curve Cryptography over GF(2<sup>m</sup>) on 8-bit Microprocessors," em *Proceedings of the 16th International Conference on Application-Specific Systems, Architecture and Processors (ASAP'05)*, Samos, Grécia, 2005.
- [120] P. Kotzanikolaou e E. Magkos, "Hybrid Key Establishment for Multiphase Self-Organized Sensor Networks," em *Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'05)*, Messina, Itália, 2005.
- [121] A. R. Ganesh e N. Manikandan, "An Improved AES-ECC Hybrid Encryption Scheme for Secure Communication in Cooperative Diversity based Wireless Sensor networks," em *Recent Trends in Information Technology (ICRTIT 2011), Proceedings of IEEE-International Conference on*, Chennai, Índia, 2011.
- [122] A. Preveena e S. Devasena, "Achieving energy efficient and secure communication in wireless sensor networks," em *Wireless and Optical Communications Networks (IFIP 2006), Proceedings of International Conference on*, Bangalore, Índia, 2006.
- [123] M. Tariq, B. Koldehofe e K. Rothermel, "Securing Broker-Less Publish/Subscribe Systems Using Identity-Based Encryption," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, n.º 2, pp. 518-528, 2014.
- [124] G. Swapna, P. V. Reddy e T. Gowri, "Efficient Identity Based Multi-Proxy Multi-Signcryption Scheme Using Bilinear Pairings over Elliptic Curves," em *IEEE International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Mysore, Índia, 2013.
- [125] ISO/IEC 7498-1, "Information Technology - Open Systems interconnection - Basic Reference model: The basic model.," 1994.
- [126] N. Salman, I. Rasool e A. Kemp, "Overview of the IEEE 802.15.4 standards family for Low Rate Wireless Personal Area Networks," em *Wireless Communication Systems (ISWCS), 7th International Symposium on*, York, UK, 2010.
- [127] IEEE Standard 802.15.4, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," 2011.
- [128] ISA standard 100.11a, "Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications," 2008.
- [129] IEEE 802.15.4f, "Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 2: Active Radio Frequency Identification (RFID) System Physical Layer (PHY)," 2012.
- [130] IEEE 802.15.4g, "Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks," 2012.

- [131] K. Chang e B. Mason, "The IEEE 802.15.4g standard for smart metering utility networks," em *Smart Grid Communications (SmartGridComm), IEEE Third International Conference on*, Tainan, Taiwan, 2012.
- [132] IEEE 802.15.4k, "Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 5: Physical Layer Specifications for Low Energy, Critical Infrastructure Monitoring Networks," 2013.
- [133] Y. Jin, M. Ameen, H. Liu e K. Kwak, "Interference mitigation study for Low Energy Critical Infrastructure Monitoring Applications," em *Communications and Information Technologies (ISCIT), International Symposium on*, Gold Coast, QLD, Australia, 2012.
- [134] ZigBee Alliance, "ZigBee Specification," *ZigBee Document 053474r13*, pp. i-508, Janeiro 2006.
- [135] ZigBee Alliance, "Control your World," [Online]. Available: [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org). [Acedido em 2013].
- [136] ZigBee Alliance, "ZigBee Smart Energy Profile Specification 0x0109," *ZigBee Document 075356r16ZB*, pp. 1-332, Março 2011.
- [137] C. Gezer e C. Buratti, "A ZigBee Smart Energy Implementation for Energy Efficient Buildings," em *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE*, Yokohama, Japão, 2011.
- [138] C. Prapasawad, K. Pornprasitpol e W. Pora, "Development of an automatic meter reading system based on ZigBee PRO Smart Energy Profile IEEE 802.15.4 standard," em *Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), IEEE International Conference on*, Bangkok, Tailândia, 2012.
- [139] ZigBee Alliance, "ZigBee PRO Stack Profile," *Documento 074855r05*, pp. i-28, Janeiro 2008.
- [140] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Oxford, Reino Unido: Newnes (Elsevier), 2008.
- [141] ZigBee Alliance, "ZigBee Building Automation Profile Specification 0x0105," *Documento 053516r12*, pp. 1-70, Maio 2011.
- [142] ZigBee Alliance, "ZigBee Telecom Applications Profile Specification 0x0107," *Document 075307r07*, pp. 1-234, Abril 2010.
- [143] P. Wong, D. Yin e T. Lee, "Analysis of Non-Persistent CSMA Protocols with Exponential Backoff Scheduling," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 59, n.º 8, pp. 2206-2214, 2011.
- [144] A. Kumar S., K. Ovsthus e L. Kristensen., "An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks — A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. PP, n.º 99, pp. 1-22, 2014.
- [145] J. W. Chong, D. K. Sung e Y. Sung, "Cross-Layer Performance Analysis for CSMA/CA Protocols: Impact of Imperfect Sensing," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, n.º 3, pp. 1100-1108, 2010.
- [146] L. Jiang e J. Walrand, "A Distributed CSMA Algorithm for Throughput and Utility Maximization in Wireless Networks," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 18, n.º 3, pp. 960-972, 2010.

- [147] T. Lennvall, S. Svensson e F. Hekland, "A comparison of WirelessHART and ZigBee for industrial applications," em *Factory Communication Systems, WFCS. IEEE International Workshop on*, Dresden, Alemanha, 2008.
- [148] J. Akerberg, M. Gidlund, J. Neander, T. Lennvall e M. Björkman, "Deterministic Downlink Transmission in WirelessHART Networks enabling Wireless Control Applications," 2010.
- [149] K. Al Agha, M.-H. Bertin, T. Dang, A. Guitton, P. Minet, T. Val e J.-B. Viollet, "Which Wireless Technology for Industrial Wireless Sensor Networks? The Development of OCARI Technology," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, n.º 10, pp. 4266-4278, 2009.
- [150] H. Hayashi, T. Hasegawa e K. Demachi, "Wireless Technology for Process Automation," em *ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, Fukuoka, Japão, 2009.
- [151] P. Radmand, A. Talevski, S. Petersen e S. Carlsen, "Comparison of industrial WSN standards," em *Digital Ecosystems and Technologies (DEST), 4th IEEE International Conference on*, Dubai, EAU, 2010.
- [152] D. Stanislowski, X. Vilajosana, Q. Wang, T. Watteyne e K. Pister, "Adaptive Synchronization in IEEE802.15.4e Networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, n.º 1, pp. 795-802, 2014.
- [153] P. Song, K. Li, X. Shan e G. Qi, "Multi-hop based highly precise time synchronization Protocol for ZigBee networks," em *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 3rd IEEE International Symposium on*, Pequim, China, 2009 .
- [154] HCF, "WirelessHART Technology," [Online]. Available: [http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless\\_technology.html](http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_technology.html). [Acedido em 2013].
- [155] ISA 100, "Wireless Systems for Automation," [Online]. Available: [www.isa.org/isa100](http://www.isa.org/isa100). [Acedido em 2013].
- [156] A. Ajmeri, "Field Wireless Networks," *InTech (ISA)*, pp. 30-35, Nov.Dez. 2013.
- [157] The ISA100 Wireless Compliance Institute, "ISA100 Wireless," [Online]. Available: <http://www.isa100wci.org>. [Acedido em 2013].
- [158] ISA 100.11a, "An Update on the First Wireless Standard Emerging from the Industry for the Industry," 2007.
- [159] S. Raza e T. Voigt, "Interconnecting WirelessHART and Legacy HART," 2010.
- [160] G. Fiore, V. Ercoli, A. Isaksson, K. Landernäs e M. Benedetto, "Multihop Multi-Channel Scheduling for Wireless Control in WirelessHART Networks".
- [161] R. D. Caro, "ISA100 Gives Up on Convergence," *Control*, pp. 1-2, 4 Fev. 2013.

- [162] P. Tuset, A. Anglès, J. López e X. Vilajosana, “On the suitability of the 433 MHz band for M2M low-power wireless communications: propagation aspects,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, pp. 1-15, 2013.
- [163] S. Aust, R. Prasad e I. Niemegeers, “Performance Evaluation of Sub 1 GHz Wireless Sensor Networks for the Smart Grid,” em *Local Computer Networks (LCN), 37th Annual IEEE Conference on*, Clearwater, Florida, 2012.
- [164] P. Tuset, F. Adelantado, X. Vilajosana, F. Vazquez-Gallego e J. Alonso-Zarate, “On the use of the 433 MHz band to Improve the Energy Efficiency of M2M Communications,” em *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), IEEE 24th International Symposium on*, London, UK, 2013.
- [165] J. P. Norair, “Introduction to DASH7 Technologies,” Dash7 Alliance, 2009.
- [166] J. P. Norair, “An Advanced Communication System for Wide-Area Low Power Wireless Applications and Active RFID,” Dash7 Alliance, 2011.
- [167] ISO/IEC 18000-7, “Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 7: Parameters for active air interface communications at 433 MHz,” 2009.
- [168] M. Weyn, G. Ergeerts, L. Wante, C. Vercauteren e P. Hellinckx, “Survey of the Dash7 Alliance Protocol for 433MHz Wireless Sensor Communication,” *Hindawi Int. Journal of Distributed Sensor Networks*, pp. 1-9, 2013.
- [169] X. Vilajosana, P. Tuset, F. Vasquez, J. Zarate e L. Alonso, “Standardized Low-Power Wireless Communication Technologies for Distributed Sensing Applications,” *MDPI Sensors (ISSN 1424-8220)*, pp. 2663-2682, 2014.
- [170] S. Hong, H. Zhang, I. Song, K. Chang, D. Shin e H. Lee, “ISO/IEC 18000-7 based on RFID multi-hop relay system,” em *Communications and Information Technology (ISCIT), 9th International Symposium on*, Icheon, South Korea, 2009.
- [171] CoSysLab - University of Antwerp, “Dash7 open source stack: OOS-7,” 2013. [Online]. Available: <https://github.com/CoSys-Lab/dash7-ap-open-source-stack>. [Acedido em 2014].
- [172] Texas Instruments, “SimpliciTI™ - RF Made Easy,” [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/simpliciti>. [Acedido em 2014].
- [173] D. Koscielnik, M. Miskowicz e J. Szyduczynski, “Upper Bounds on Unsuccessful Transmission Rate in Persistent and Non-Persistent CSMA Protocols,” em *Computer Communications and Networks (ICCCN), Proceedings on 22nd International Conference on*, Nassau, Bahamas, 2013.
- [174] R. Want, “An introduction to RFID technology,” *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 5, n.º 1, pp. 25-33, 2006.
- [175] A. Juels, “RFID Security and Privacy: A Research Survey,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 24, n.º 2, pp. 381-394, 2006.
- [176] O. W. D. J. R. René Wermke, “White paper RFID high speed”.

- [177] G. D. Vita e G. Iannaccone, "Design Criteria for the RF Section of UHF and Microwave Passive RFID Transponders," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 53, n.º 9, pp. 2978-2990, 2005.
- [178] ISO/IEC 18000-6, "Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz," 2010.
- [179] GS1, "The global language of business," [Online]. Available: <http://www.gs1.org/epcglobal>. [Acedido em 2014].
- [180] MIFARE, "Mifare Smart Cards," [Online]. Available: <http://www.mifare.net>. [Acedido em 2014].
- [181] NFC Forum, "Near field communication," [Online]. Available: <http://nfc-forum.org/>. [Acedido em 2014].
- [182] ISO/IEC 18092, "Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Near Field Communication - Interface and Protocol (NFCIP-1)," 2013.
- [183] S. Wu e C. Yang, "Promoting collaborative mobile payment by using NFC-Micro SD technology," em *Services Computing, IEEE 10th International Conference on*, Santa Clara, CA, 2013.
- [184] C. Opperman e G. Hancke, "Using NFC-enabled Phones for Remote Data Acquisition and Digital Control," em *IEEE Africon 2011, Zambia*, 2011.
- [185] R. Ramanathan e J. Imtiaz, "NFC in Industrial Applications for Monitoring Plant Information," em *Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), 2013 Fourth International Conference on*, Tiruchengode, India, 2013.
- [186] The Internet Engineering Task Force (IETF®), "to make the Internet work better," [Online]. Available: <http://www.ietf.org/>. [Acedido em 2014].
- [187] IETF, "RFC 6282 - Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks," Setembro 2011. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc6282>. [Acedido em 2013].
- [188] IETF, "RFC 4944 - Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks," Setembro 2007. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>. [Acedido em 2013].
- [189] IETF, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks," Março 2012. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc6550>. [Acedido em 2013].
- [190] IPSO Alliance, "RPL: The IP routing protocol designed for low power and lossy networks," 2011.
- [191] IETF, "6LoWPAN Roadmap and Implementation Guide," Abril 2013. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-bormann-6lowpan-roadmap-04>. [Acedido em 2013].
- [192] R. M. Silva, J. S. Silva e F. Boavida, "Evaluating 6lowPAN implementations in WSNs," em *Conferência sobre Redes de Computadores*, Lisboa, 2009.

- [193] A. P. Castellani, G. Ministeri, M. Rotoloni, L. Vangelista e M. Zorzi, "Interoperable and globally interconnected Smart Grid using IPv6 and 6LoWPAN," em *SmArt Communications in Network Technologies, 3rd IEEE International Workshop on*, Ottawa, Canadá, 2012.
- [194] Y. Mazzer e B. Tourancheau, "Comparisons of 6LoWPAN Implementations on Wireless Sensor Networks," em *Sensor Technologies and Applications, IEEE 3rd International Conference on*, Atenas, 2009.
- [195] ZigBee Alliance, "ZigBee IP Specification," *ZigBee Document 13-002r00*, pp. i-72, Fev. 2013.
- [196] ZigBee Alliance, "Smart Energy Profile 2," 2013. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/Standards/ZigBeeSmartEnergy/SmartEnergyProfile2.aspx>. [Acedido em 2014].
- [197] J. Norair, "OpenTag: Office Hours," Dash7 Alliance, 2011.
- [198] R. Gomes, J. Oliveira e F. Cardoso, "Integrating Zigbee and CAN Networks in Industrial Applications," em *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Proceedings of 6th IEEE International Conference on*, Santa Barbara, CA, 2010.
- [199] G. Wood, "State of play [fieldbus technology]," *IEE Review*, vol. 46, n.º 4, pp. 26-28, 2000.
- [200] OPen Connectivity, "About OPC," [Online]. Available: <http://www.opcfoundation.org/>. [Acedido em 2012].
- [201] W. Mahnke, S. Leitner e M. Damm, *OPC Unified Architecture*, Berlim: Springer, 2009.
- [202] W. Donglin, Y. Guosheng, Z. Dong e Z. Yan, "Medium-density fiberboard production line distributed control system based on Fieldbus," em *Computer Engineering and Technology (ICCET 2010), Proceeding of 2nd International Conference on*, Chengdu, 2010.
- [203] D. Kominek, "OPC: The Ins and Outs to What It's About," MatrikonOPC, Alberta, Canada, 2009.
- [204] MatrikonOPC, "Wireless OPC Servers," [Online]. Available: <http://www.matrikonopc.com/drivers/wireless-opc-servers.aspx>. [Acedido em 2013].
- [205] FDT Group, "FDT 2.0 - Technical Specification v1.00," Belgium, 2012.
- [206] FDT Group, "Open Access to device intelligence," [Online]. Available: <http://www.fdtgroup.org/>. [Acedido em 2013].
- [207] PACTware Consortium, "Process Automation Configuration Tool," [Online]. Available: [www.pactware.com](http://www.pactware.com). [Acedido em 2013].
- [208] VEGA, "Operating Instructions PACTware and DTM Collection," 2014. [Online]. Available: [www.vega.com](http://www.vega.com). [Acedido em 2014].
- [209] B. Lydon, "Internet of Things - industrial automation industry exploring and implementing IoT," *InTech*, pp. 12-16, Março-Abril 2014.



- [210] J. Kim, J. Lee, J. Kim e J. Yun, "M2M Service Platforms: Survey, Issues and Enabling Technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, n.º 1, pp. 61-76, 2014.
- [211] P. Falcão, A. Cruz, J. Oliveira, H. Oliveira e F. Cardoso, "Remote Health Monitoring of critical parts in Pulp washing and bleaching rigs," em *Investigação em Celulose e Papel, Artigos do VI Congresso Iberoamericano de*, Lisboa, 2010.
- [212] J. Alves, P. Carreira, H. Ferreira, H. Pereira, J. Oliveira e F. Cardoso, "Smart Grids: Asset Management in Primary Distribution Substations, with Wireless Sensor Networks," em *International Conference on Electricity Distribution*, Stockholm, 2013.
- [213] J. Oliveira, D. Tran, N. Sousa, D. Raposo e e. al, *Accurate Real-Time Location System for Harsh Industrial Environments*, Berlim: IDTechEx, 2013.
- [214] F. Cardoso, J. Oliveira e J. Reis, "Telegestão de infra-estruturas industriais dispersas: uma estratégia de virtualização," em *Artigos do VI Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*, Maputo, 2011.
- [215] Texas Instruments, "Analog, Embedded Processing," [Online]. Available: <http://www.ti.com/>. [Acedido em 2014].
- [216] Microchip, "Microchip Technology," [Online]. Available: <http://www.microchip.com/>. [Acedido em 2014].
- [217] ST Microelectronics, "MEMS & Sensors," [Online]. Available: [http://www.st.com/web/en/catalog/sense\\_power/FM89](http://www.st.com/web/en/catalog/sense_power/FM89). [Acedido em 2014].
- [218] Analog Devices, "MEMS & Sensors," [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/mems-sensors/products/index.html>. [Acedido em 2014].
- [219] IEC standard 60079, "Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "i"," em *Explosive atmospheres*, [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch), 2012.
- [220] IEC standards 60079, "Part 15: Equipment protection by type of protection "n"," em *Explosive atmospheres*, <http://webstore.iec.ch/>, 2010.
- [221] R. Wallace, "DN025 - Johanson Technology Matched Balun Filters for CC110x & CC111x," Texas instruments, 2011.
- [222] Texas Instruments, "Highly temperature-stable Impedance Matched RF Front End Differential Balun-band Pass Filter Integrated Ceramic Component," Johanson Technologies, 2012.
- [223] J. Oliveira, N. Sousa, M. Cordeiro e L. Oliveira, "EPRIL R4.2 - Desenvolvimento de Circuitos RF," Eneida Wireless & Sensors, Coimbra, 2013.
- [224] Pulse Technologies, "W3127 Datasheet version 1.2. ISM 433MHz Helical Antenna," 2008. [Online]. Available: [www.pulseeng.com/antennas](http://www.pulseeng.com/antennas). [Acedido em 2013].

- [225] Antenna Factor, "ANT-433-CW-RH Data Sheet," 2013. [Online]. Available: <https://www.linxtechnologies.com/resources/data-guides/ant-433-cw-rh.pdf>. [Acedido em 2013].
- [226] P. Evjen e G. Jonsrud, "AN003 - SRD Antennas," Texas Instruments, 2006.
- [227] M. Carmona, "433 MHz Chip Antenna Measurement Report and Technical note," Johanson Technology, 2010.
- [228] Antenova, "Titanis 2.4 GHz Swivel SMA Antenna," 2006. [Online].
- [229] Roving Networks, "RN-SMA-S 1" short antenna," 2011. [Online].
- [230] Molex, "2.4 GHz SMD on-ground antenna - 47948," 2011. [Online].
- [231] Johanson Technologies, "2.45 GHz High Gain Chip Antenna (Vertical Orientation)," [Online].
- [232] A. Saifullah, Y. Xu, C. Lu e Y. Chen, "Real-Time Scheduling for WirelessHART Networks," em *IEEE Real-Time Systems Symposium*, San Diego, CA, 2010.
- [233] GE Energy, "Valves - Control & Safety," [Online]. Available: <http://www.ge-energy.com>. [Acedido em 2014].
- [234] GE Energy, "GEA19099 - SVI II AP - Advanced Performance Digital Valve Positioner," General Electric Co., 2011.
- [235] GE Energy, "GEA19362 - VECTOR V1100 - WirelessHART Adapter," General Electric Co., 2012.
- [236] Pepperl+Fuchs, "221981 / DOCT-1898C WHA-GW-\*," Pepperl+Fuchs, Mannheim, 2011.
- [237] J. Oliveira e N. Sousa, "Evaluation of SVI II AP Positioners over WirelessHART," Eneida Wireless & Sensors, S.A., Coimbra, 2013.
- [238] A. Puşcaş, M. Carp, C. Kertesz, P. Borza e G. Coquery, "Thermal and voltage testing and characterization of supercapacitors and batteries," em *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on*, Brasov, Romania.
- [239] Texas Instruments, "SWRS081B - A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications," 2009.
- [240] Texas Instruments, "SLAS554H - MSP430™ SoC With RF Core," 2009.
- [241] Analog Devices, "ADT7301 - Digital Temperature Sensor," 2011.
- [242] Sensirion, "SHT21 - Humidity and Temperature Sensor IC," 2012.
- [243] Texas Instruments, "Z-Stack™ Energy," [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/z-stack>. [Acedido em 2014].
- [244] SAFT Batteries, "Doc. N° 31040-2-0510: Primary lithium battery LS 17330," 2010.

- [245] IPN Led&Mat, “Laboratório de Ensaios e Desgaste & Materiais,” [Online]. Available: [www.ipn.pt](http://www.ipn.pt). [Acedido em 2014].
- [246] M. Guegan, “B0404-13 Answer to the PSR from ENEIDA Wireless & Sensors, Portugal,,” Saft Lithium Division, Poitiers, França, 2013.
- [247] Tadiran Batteries, [Online]. Available: <http://www.tadiranbat.com/>. [Acedido em 2014].
- [248] M. Farooq e T. Kunz, “Contiki-based IEEE 802.15.4 node's throughput and wireless channel utilization analysis,” em *Wireless Days (WD), IFIP*, Dublin, Ireland, 2012.
- [249] N. Dopico, C. Gil-Soriano, I. Arrazola e S. Zazo, “Analysis of IEEE 802.15.4 Throughput in Beaconless Mode on micaZ under TinyOS 2,” em *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), Proceedings of IEEE 72nd*, Ottawa, Canada, 2010.
- [250] K. Kunert, M. Jonsson e E. Uhlemann, “Exploiting time and frequency diversity in IEEE 802.15.4 industrial networks for enhanced reliability and throughput,” em *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Proceedings of IEEE Conference on*, Bilbao, Espanha, 2010.
- [251] D. Raposo e J. Oliveira, “EPRIL R4.3 - Dimensionamento do sistema,” Eneida Wireless & Sensors, Coimbra, 2013.
- [252] F. Cardoso, J. Oliveira, A. Macedo, S. Faria, Gomes, R. e P. Falcão, “Redes de Energia eléctrica inteligentes: gestão de activos em subestações,” em *Artigos do VI Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia (CLME)*, Maputo, 2011.
- [253] H. Mannaert, P. Huysmans e P. Adriaenssens, “Connecting Industrial Controllers to the Internet Through Software Composition in Web Application Servers,” em *Internet and Web Applications and Services (ICIW), Proceedings of IEEE 2nd International Conference on*, Morne, Maurícia, 2007.
- [254] F. Cardoso, S. Faria e J. Oliveira, “A smart sensor for the condition monitoring of industrial rotating machinery,” em *Sensors, Proceedings of IEEE International Conference on*, Taipei, Taiwan, 2012.
- [255] R. Gomes, J. Oliveira, F. Cardoso, A. Cruz, S. Faria e P. Falcão, “A Hybrid Sensor Network for Electric Engine Real-Time Condition Monitoring,” em *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Proceedings of 6th International Conference on*, Santa Barbara, CA, 2010.
- [256] F. Cardoso, J. Oliveira, S. Semedo e R. Gomes, “Método de monitorização sem fios de seccionadores em subestações de redes eléctricas e respectivo dispositivo”. Portugal Patente 106988, 6 Junho 2010.
- [257] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, “Directiva 2004/108/CE - compatibilidade electromagnética,” *Jornal Oficial da União Europeia*, vol. L, n.º 390, pp. 24-37, 2004.
- [258] IEC 61131-2, “Programmable controllers – Part 2: Equipment requirements and tests,” 2007.
- [259] IEP, “Relatório de ensaio E-2011-0602.00 - EWS Sistema Subestação,” Porto, 2011.

- [260] IEC 61140, "Protection against electric shock – Common aspects for installation and equipment," 2001.
- [261] IEC 60529, "Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)," 2001.
- [262] S. Semedo, J. Oliveira e F. Cardoso, "Remote Monitoring of High-Voltage Disconnect Switches in Electrical Distribution Substations," em *Industrial Electronics, Proceedings of 23rd IEEE International Symposium on*, Istambul, 2014.
- [263] J. Oliveira, "Correcção de interferência electromagnética em sistemas de localização (Dissertação de mestrado)," Universidade de Aveiro, 2008.
- [264] G. Mao, B. Fidan e B. Anderson, "Wireless sensor network localization techniques," *Computer Networks*, vol. 51, pp. 2529-2553, 2007.
- [265] J. Oliveira, "EPRIL R1.1 - Estado-da-arte de sistemas de localização de pessoas em ambientes aberto agressivos," Eneida Wireless & Sensors, Coimbra, 2012.
- [266] M. Kirkman, "Realizing the benefits of people tracking: BP's Central Technology Office Experience," em *e-Tagging for HSE and Asset management in Oil & Gas*, Abu Dhabi, 2011.
- [267] British Petroleum, [Online]. Available: [www.bp.com](http://www.bp.com). [Acedido em 2014].
- [268] S3ID Safe Secure Solutions, [Online]. Available: <http://www.s3-id.com/>. [Acedido em 2014].
- [269] Zebra Technologies, [Online]. Available: [www.zebra.com](http://www.zebra.com). [Acedido em 2014].
- [270] Aeroscout, [Online]. Available: <http://www.aeroscout.com/>. [Acedido em 2014].
- [271] Wavetrend, [Online]. Available: <http://www.wavetrend.net/>. [Acedido em 2014].
- [272] Ubisense, [Online]. Available: <http://www.ubisense.net/>. [Acedido em 2014].
- [273] Ekahau, "Business Intelligence Through Location," [Online]. Available: <http://www.ubisense.net/>. [Acedido em 2014].
- [274] A. Paul e E. Wan, "RSSI-Based Indoor Localization and Tracking Using Sigma-Point Kalman Smoothers," *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 3, n.º 5, pp. 860-873, 2009.
- [275] J. Oliveira, F. Cordeiro, N. Sousa e T. Tran, "Sistema de localização fina tridimensional em tempo-real". Portugal Patente 107579, 10 Abril 2014.
- [276] IEC 60079-10-1, "Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres," IEC, 2008.
- [277] IEC 60079-10-2, "Explosive atmospheres - Part 10-2: Classification of areas - Combustible dust atmospheres," IEC, 2009.
- [278] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, "Directiva 94/9/EC - equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres," *Official Journal of the European Communities*, vol. L, n.º 100, pp. 1-29, 1994.

- [279] R. Antram, V. Varma e A. Austin, “GB/ITS/ExTR11.0043/00 Intertek Project Nr. 11052574,” Intertek Testing & Certification Ltd., Leatherhead, Surrey, Reino Unido, 2012.
- [280] J. Oliveira, S. Semedo, D. Raposo e F. Cardoso, “Place-&Play industrial Router addressing potential explosive atmospheres,” em *Industrial Electronics Society, Proceedings of the 40th Annual Conference of IEEE*, Dallas, TX, 2014.
- [281] China Solar, “Painéis Solares Fotovoltaicos,” [Online]. Available: <http://www.solars-china.com/pt>. [Acedido em 2013].
- [282] H. Yu, Q. Yue e W. H., “Power management and energy harvesting for indoor photovoltaic cells system,” em *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on*, Inner Mongolia, China.
- [283] IEC 62262, “Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts (IK code),” 2002.
- [284] D. Tran, J. Oliveira, J. S. Silva, V. Pereira, N. Sousa, D. Raposo e F. Cardoso, “A Scalable Localization System for Critical Controlled Wireless Sensor Networks,” em *Proceedings of 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT 2014)*, St. Petersburg, Russia, 2014.
- [285] K. Li, J. Bigham, E. Bodanese e L. Tokarchuk, “Outdoor Location Estimation in Changeable Environments,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 17, n.º 11, pp. 2072-2075, 2013.
- [286] B. Altintas e T. Serif, “Indoor Location Detection with a RSS-based Short Term Memory Technique (KNN-STM),” em *Pervasive Wireless Networking, IEEE PerCom Workshop on*, Lugano, Suíça, 2012.
- [287] D. Tran, “EPRIL R2.4 - Location Engine Specifications,” Eneida Wireless & Sensors, Coimbra, 2013.
- [288] e. a. S. Haykyn, *Kalman Filtering & Neural Networks*, Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001.
- [289] S. Outmzabet e C. Nerguizian, “Accuracy Enhancement of an Indoor ANN-based Fingerprinting Location System Using Kalman Filtering and a Low-cost sensor,” em *Vehicular Technology Conference, Proceedings of the 67th IEEE*, Singapura, 2008.
- [290] J. Oliveira, “Análise de pigmentos de obras de João de Ruão por difracção de raios-x e espectroscopia Raman (Tese de Licenciatura),” Universidade de Coimbra, 2006.
- [291] O. Williams, A. Blake e R. Cipolla, “Sparse Bayesian Learning for Efficient Visual Tracking,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, n.º 8, pp. 1292-1304, 2005.
- [292] R. Peng e M. Sichitui, “Robust, probabilistic, constraint-based localization for wireless sensor networks,” em *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2nd Annual IEEE Communications Society Conference on*, Santa Clara, CA, 2005.
- [293] W. Zhong, X. Liu e S. Hui, “A Novel Single-Layer Winding Array and Receiver Coil Structure for Contactless Battery Charging Systems With Free-Positioning and Localized Charging Features,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, n.º 9, pp. 4136-4144, 2011.

- [294] X. Liu e S. Hui, "Simulation Study and Experimental Verification of a Universal Contactless Battery Charging Platform With Localized Charging Features," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, n.º 6, pp. 2202-2210, 2007.
- [295] S. Hui e W. Ho, "A New Generation of Universal Contactless Battery Charging Platform for Portable Consumer Electronic Equipment," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 20, n.º 3, pp. 620-627, 2005.
- [296] Powermat, "Wireless Power. For your products.," [Online]. Available: <http://www.powermat.com>. [Acedido em 2014].
- [297] SOMINCOR, "Sociedade Mineira de Neves Corvo," [Online]. Available: <http://somincor.com.pt/pt>. [Acedido em 2014].
- [298] MATSA, "matsa mining group," [Online]. Available: <http://www.prensamatsa.es/>. [Acedido em 2014].
- [299] N. Varandas, F. Cordeiro, H. Almeida, N. Sousa, P. França, A. Cruz e J. Oliveira, "Underground mine traffic management and optimization: an intelligent application based on a real-time localization system," em *Aachen International Symposium on Mining (AIMS), Proceedings of 6th BBK*, Aachen, 2014.
- [300] J. Faria, S. Semedo, F. Cardoso e J. Oliveira, "Condition Monitoring and Diagnosis of Steam Traps with Wireless Smart Sensors," em *Sensing Technology, Proceedings of the 8th International Conference on*, Liverpool, UK, 2014.

## **ANEXOS**

**A1. PATENTE DE INVENÇÃO NACIONAL:  
MÉTODO DE MONITORIZAÇÃO SEM FIOS DE  
SECCIONADORES EM SUBESTAÇÕES DE REDES  
ELÉCTRICAS E RESPECTIVO DISPOSITIVO**

**Patente de Invenção Nacional**

Nº 106988 (6 de Junho de 2013)

**Requerente**

Eneida Wireless & Sensors, S. A.

**Autores**

Francisco José de Almeida Cardoso

José Eduardo Gomes Oliveira

Rui Paulo do Nascimento Gomes

Sónia Maria Vaz Semedo



**RESUMO**

**“MÉTODO DE MONITORIZAÇÃO SEM FIOS DE SECCIONADORES EM  
SUBESTAÇÕES DE REDES ELÉCTRICAS E RESPECTIVO DISPOSITIVO”**

A invenção descreve um método de monitorização sem fios de seccionadores em subestações de redes eléctricas e respectivo dispositivo multisensor inteligente que realiza funções de detecção e medida de variáveis descritivas do estado técnico de funcionamento de seccionadores de Alta Tensão e Média Tensão em subestações de redes eléctricas de distribuição. A presente invenção é indicada para aplicação em seccionadores telecomandados, suportando a detecção e confirmação explícita de cumprimento dos comandos de fecho e abertura, permitindo assegurar a concordância do estado dos seccionadores com as ordens de operação respectivas; determinação do grau de (des) alinhamento, sempre que um seccionador se encontra fechado; alarme em casos de detecção de temperaturas tendencialmente excessivas em seccionadores fechados. A informação assim obtida é transmitida a uma unidade central remota, através de uma rede sem fios.

## DESCRIÇÃO

### **"MÉTODO DE MONITORIZAÇÃO SEM FIOS DE SECCIONADORES EM SUBESTAÇÕES DE REDES ELÉCTRICAS E RESPECTIVO DISPOSITIVO"**

#### **Domínio técnico da invenção**

A invenção descreve um método de monitorização sem fios de seccionadores em subestações de redes eléctricas e respectivo dispositivo (2) multisensor inteligente que realiza funções de detecção e medida de variáveis descritivas do estado técnico de funcionamento de seccionadores (1) de Alta Tensão (AT) e Média Tensão (MT) em subestações de redes eléctricas de distribuição.

A presente invenção é indicada para aplicação em seccionadores telecomandados, suportando as seguintes funções de avaliação funcional:

- Detecção e confirmação explícita de cumprimento dos comandos de fecho e abertura, permitindo assegurar - remota e imediatamente, ao nível do sistema de supervisão SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) de gestão da condução da rede - a concordância do estado dos seccionadores (1) com as ordens de operação respectivas;
- Determinação do grau de (des)alinhamento, sempre que um seccionador (1) se encontra fechado;
- Alarme em casos de detecção de temperaturas tendencialmente excessivas em seccionadores fechados, configurando situações potenciais de "pontos quentes".

A informação assim obtida é transmitida a uma unidade central remota, através de uma rede sem fios. Outra característica fundamental da presente invenção multisensor é a sua autonomia energética conseguida por captura e armazenamento de energia solar, que assegura a sua permanente alimentação em potência.

### **Estado da técnica**

Não são conhecidas soluções anteriores para a monitorização em contínuo do estado técnico de funcionamento de seccionadores em circuitos de AT e MT, em subestações de redes eléctricas tal como descritas no presente documento e tendo em consideração dois elementos-chave presentes no dispositivo descrito:

- (i) o carácter global e completo de avaliação do estado dos seccionadores (1), e
- (ii) a concentração da sensorização (5) na área dos contactos dos seccionadores, onde os dispositivos são instalados.

As soluções anteriormente conhecidas caracterizam-se por proceder a avaliação do alinhamento das duas partes do seccionador de forma indirecta, pela medida do ângulo de rotação das hastes verticais que suportam os seccionadores. Ora, tal análise realizada neste ponto da estrutura, tendo em conta a existência doutros elementos mecânicos móveis (ou com capacidade independente de movimento) a jusante, tende a ser uma abordagem susceptível de gerar erros de percepção daquele alinhamento. A presente invenção, ao actuar junto ao ponto de contacto efectivo das duas partes

do seccionador, permite uma leitura rigorosa, eliminando os potenciais equívocos dos sistemas anteriormente conhecidos.

Em pesquisa ao estado da técnica da invenção, foram identificados os seguintes documentos de patente, dos quais destacamos a sua distinção com a presente invenção:

(D1) JP 2002238151 A - D1 divulga um método e aparelho para detetar o estado aberto de um seccionador para linha de distribuição de subestação. O método baseia-se no cálculo do valor da impedância do sistema de distribuição de energia entre eléctrodos do seccionador aberto, determinando-se que o seccionador das linhas de distribuição foi aberto quando dito valor da impedância exceder um valor estabelecido;

(D2) US 6222714 B1 - D2 divulga um controlador de grupo de configuração baseado em microprocessador, para operações de réle de protecção. Uma subestação para distribuição de energia eléctrica inclui réles de protecção cujos pontos de disparo são função da temperatura, sendo os réles de protecção usados para controlar a abertura e o fecho de seccionadores para protecção contra condições defeituosas em pelo menos uma das porções de entrada e de saída de energia do sistema de distribuição de energia;

(D3) FR 2696600 A1 - D3 divulga um dispositivo para interromper ou estabelecer, à distância, uma corrente eléctrica, particularmente para equipamentos de alta protecção. O dispositivo inclui um órgão detetor constituído por dois elementos móveis, um em relação

ao outro; um deles tem um difusor ou um reflector, o outro recebe uma extremidade de uma fibra ótica; o órgão de comutação permite interromper ou estabelecer contactos eléctricos em resposta ao órgão de reconhecimento em função de uma variação da luz reflectida ou retrofundida captada pela fibra ótica devido a desalinhamento ou a rearranjo dos ditos elementos móveis.

A presente invenção difere do estado da técnica, pois o mesmo não divulga qualquer grau de alinhamento relativo dos dois braços de um seccionador como o da presente invenção, nem qualquer menção ao ambiente da subestação.

#### **Descrição das figuras**

As figuras ilustram a forma construtiva e o modo de instalação deste dispositivo inteligente.

A Figura 1 - Instalação do sensor - ilustra a montagem típica do dispositivo (2) de monitorização, apenas no braço "fêmea" (1) de um seccionador.

A Figura 2 - Estrutura de montagem do sensor - mostra uma perspectiva da estrutura construtiva do dispositivo, incluindo o acessório de montagem. Está representada uma simples plataforma como acessório de montagem (3), e o dispositivo multisensor inteligente (5), compreendendo as seguintes partes componentes: sensor de vibração, mecanismo optoelectrónico constituído por um díodo emissor de luz (LED) e uma barra de foto-transístores, sensor de

temperatura, microcontrolador associado a um transceptor de radiofrequência, mecanismo de captura e armazenamento de energia do meio envolvente, compreendendo painel fotovoltaico (4), supercondensador.

### **Descrição detalhada da invenção**

A presente invenção consiste num método de monitorização sem fios de seccionadores em subestações de redes eléctricas e respectivo dispositivo (2), o qual se é um multisensor inteligente sem fios, com autonomia de energia para alimentação em potência, compacto, leve, e de fácil instalação, com base num suporte (3) destinado à monitorização e caracterização em contínuo do modo e do estado de funcionamento de seccionadores de AT e MT, em subestações de redes de distribuição de energia eléctrica.

O dispositivo que implementa o método da presente invenção, prevê o seu funcionamento sem fios, quer para comunicar, quer para a sua alimentação em potência, compreendendo os seguintes dispositivos (5) instalados na área dos contactos dos seccionadores:

- sensor de vibração, de tecnologia MEMS (*Micro Electro-Mechanical System*), permitindo a detecção inequívoca de transições de fecho e abertura, pela medição da amplitude de vibração e respectiva comparação com limiares de choque parametrizáveis;
- mecanismo optoelectrónico constituído por: um diódo emissor de luz (LED) e uma barra de foto-transístores, todos operando em regime de rendimento máximo na banda de infravermelho;

- sensor de temperatura, colocado na área de junção das barras condutoras que constituem um seccionador, para a medição de temperatura na zona efectiva de contacto dos seccionadores;
- microcontrolador associado a um transceptor de radiofrequência para a comunicação sem fios da informação gerada. O microcontrolador processa e integra os dados obtidos dos diversos sensores, designadamente relativa aos potenciais desalinhamentos dos seccionadores, da temperatura gerada na área de junção das barras condutoras e da amplitude das vibrações emergentes das transições de fecho e abertura. Este microcontrolador decide e formata as mensagens a trocar relativas à citada informação e dados sobre uma rede de comunicação bidireccional sem fios, que é assegurada por um adequado transceptor de radiofrequência, de acordo com os regulamentos locais de gestão do espectro radioelétrico;
- mecanismo de captura e armazenamento de energia do meio envolvente, compreendendo:
  - (i) um painel fotovoltaico (4) actuando como transdutor de energia luminosa para energia eléctrica;
  - (ii) um supercondensador para armazenamento de energia eléctrica; e
  - (iii) um circuito electrónico para controlar o regime de carregamento do supercondensador e monitorizar o seu nível de carga.

A informação produzida nestes dispositivos será remotamente concentrada numa estação central de recepção, arquivo,

tratamento e difusão de informação, a fim de apoiar mecanismos de decisão visando o desempenho de telegestão operacional e/ou de funções últimas de gestão de activos.

O método de monitorização sem fios de seccionadores em subestações de redes eléctricas objecto da presente invenção é constituído pelas seguintes etapas:

- detecção e sinalização das mudanças de estado (aberto/fechado) de funcionamento dos seccionadores de AT e MT, em geral por accionamento motriz comandado remotamente, por indicação de choque fornecida ao microcontrolador do dispositivo por um acelerómetro de tecnologia MEMS;
- determinação do grau de alinhamento de um seccionador fechado na gama mínima de valores compreendida entre  $+15^\circ$  e  $-15^\circ$  relativamente à posição de alinhamento ideal, transmitindo indicações de alinhamento em três escalões de qualidade, com limites parametrizáveis. O alinhamento é medido através de um feixe estreito de radiação infravermelha emitido por um LED do dispositivo montado no braço "fêmea", que posteriormente é reflectido por uma face plana do braço "macho" do seccionador, vindo incidir sobre uma barra de fotodetectores na mesma banda de frequência do LED, barra esta posicionada ao redor do LED, dentro do dispositivo. O padrão da mancha de radiação infravermelha recebida permite determinar o ângulo formado pelos braços do seccionador, com uma resolução mínima de  $1^\circ$ ;



- medição da temperatura das barras de um seccionador fechado, directamente na zona dos respectivos contactos, fornecendo avisos de tendências para "ponto quente" e alarmes de "ponto quente" atingido relativos a limiar de temperatura, parametrizáveis (em amplitude e em número);
- caracterização do estado de funcionamento de seccionadores de Alta e de Média Tensão em subestações de redes de distribuição de energia eléctrica, permitindo determinar localmente situações de:
  - (i) operação de um seccionador; e de
  - (ii) mau alinhamento dos braços, absoluto e relativo à carga do circuito.

Lisboa, 3 de Junho de 2014

## REIVINDICAÇÕES

1. Método de monitorização sem fios de seccionadores em subestações de redes eléctricas caracterizado pelas seguintes etapas:
  - a) detecção de transições de fecho e abertura de um seccionador, através do sensor de vibração com acelerómetro, pela medição da amplitude de vibração e respectiva comparação com limiares de choque parametrizáveis;
  - b) determinação do grau de alinhamento de um seccionador fechado, através de um mecanismo optoelectrónico com um LED montado num braço e uma barra de fotodetetores posicionada em redor do LED;
  - c) transmissão de indicações de alinhamento em três escalões de qualidade, com limites parametrizáveis^;
  - d) medição do alinhamento através de um feixe estreito de radiação infravermelha;
  - e) determinação do ângulo formado pelos braços do seccionador;
  - f) medição da temperatura das barras de um seccionador fechado, directamente na zona dos respectivos contactos;
  - g) geração de avisos e alarmes aquando atingido um valor limiar de temperatura parametrizável;
  - h) caracterização do estado de funcionamento de seccionadores de Alta e de Média Tensão em subestações de redes de distribuição de energia eléctrica;
  - i) determinação local de situações de:
    - i. operação de um seccionador;

- ii. desalinhamento dos braços.
2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a determinação do grau de alinhamento de um seccionador fechado ser na gama mínima de valores compreendida entre  $+15^\circ$  e  $-15^\circ$  relativamente à posição de alinhamento ideal.
3. Dispositivo (2) que implementa o método da reivindicação 1, **caracterizado por** apresentar base num suporte (3) e ser constituído pelos seguintes dispositivos (5) instalados na área dos contactos dos seccionadores:
- a) sensor de vibração;
  - b) mecanismo optoelectrónico constituído por um díodo emissor de luz (LED) e uma barra de foto-transístores, todos operando em regime de rendimento máximo na banda de infravermelho;
  - c) sensor de temperatura, colocado na área de junção das barras condutoras que constituem um seccionador;
  - d) microcontrolador associado a um transceptor de radiofrequência
  - e) mecanismo de captura e armazenamento de energia do meio envolvente, compreendendo painel fotovoltaico (4), supercondensador para armazenamento de energia eléctrica e circuito electrónico de controlo do regime de carregamento do supercondensador.

Lisboa, 3 de junho de 2014

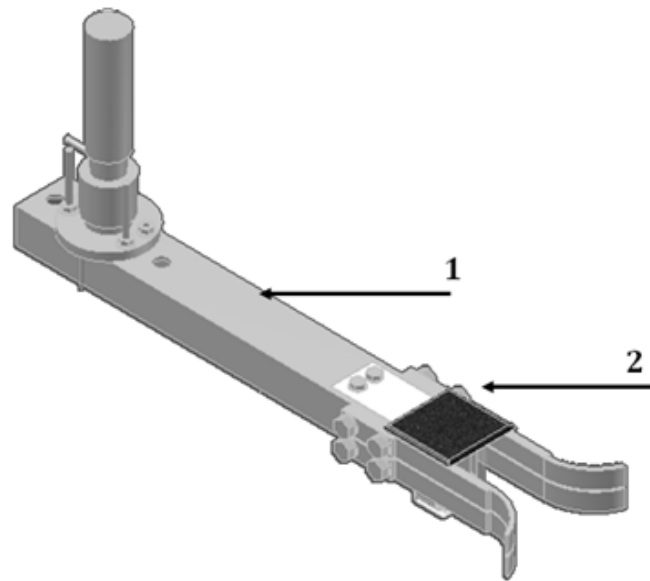


Figura 1

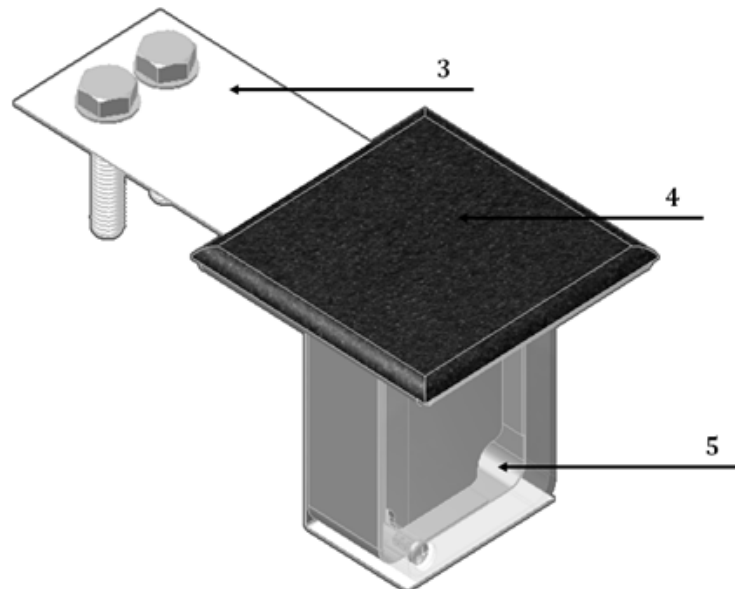


Figura 2

**A2. PATENTE DE INVENÇÃO NACIONAL:  
SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO FINA TRIDIMENSIONAL  
EM TEMPO-REAL**

**Patente de Invenção Nacional**

Nº 107579 (10 de Abril de 2014)

**Requerente**

Eneida Wireless & Sensors, S. A.

**Autores**

José Eduardo Gomes Oliveira

Flávio Fernando Domingues Cordeiro

Nuno Miguel Santos Sousa

Tran-Dien Thanh

## **"Sistema de localização fina tridimensional em tempo-real"**

### **1. Domínio técnico da invenção**

A presente invenção insere-se no domínio dos sistemas de localização em tempo-real de pessoas ou bens móveis, recorrendo a uma solução que combina o emprego de sensores inerciais com a medição da força de sinal de sistemas de radiofrequência.

### **2. Breve descrição da invenção**

A invenção descreve um sistema, compreendendo um método implementado em computador e uma rede de sensores (emissores e recetores) sem fios, caracterizado por realizar funções de localização tridimensional fina e em tempo-real de pessoas ou bens móveis. Propõe-se uma nova e distinta abordagem a este problema técnico, consubstanciada num novo algoritmo de localização em tempo-real, baseado numa nova e distinta implementação de um filtro de Kalman estendido, onde informação invariante (perante transformações de coordenadas) obtida a partir de sensores inerciais (acelerómetro e giroscópio), é combinada com um algoritmo de localização exclusivamente baseado em medidas de força de sinal de radiofrequência.

Um maior desempenho do sistema de sensores inerciais é obtido através de um processo contínuo de calibração automática e da produção de medidas invariantes de distância e ângulo a serem usadas no filtro de Kalman estendido. Desta forma, o sistema inercial não necessita de calibração inicial nem de manter a orientação fixa durante

a localização. Este sistema é assim implementável num número mais lato de aplicações, sem comprometer a precisão da estimativa da posição.

### **3. Estado da técnica**

Observa-se uma necessidade crescente de desenvolver sistemas e técnicas de localização *indoor* que sejam capazes de substituir o uso de GPS (*Global Positioning System*), já que não é possível em geral usar-se esta última solução técnica em ambientes interiores ou cobertos, atendendo à fraca ou inexistente linha de vista para os satélites, necessária à comunicação GPS.

Vários sistemas de localização têm sido propostos e avaliados, para ambientes *indoor* e *outdoor*. São amplamente conhecidos os métodos baseados no tempo de voo do sinal de radiofrequência (TOF - *time-of-flight*), na força do sinal (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*) ou no ângulo de chegada (AOA - *angle-of-arrival*) para estimarem a distância entre os vários nós (emissores e recetores). Por ordem crescente de exatidão, a localização de um dispositivo móvel pode ser efetuada por identificação local (estar ou não estar ao alcance de um leitor); por triangulação da força de sinal medida por diferentes leitores de radiofrequência; por determinação do ângulo de receção do sinal; ou por tempo de voo de uma mensagem de radiofrequência, medido pelos diferentes dispositivos e comparados por um nó coordenador. Esta crescente exatidão implica uma também crescente linha de vista entre os

diferentes dispositivos e uma crescente capacidade de computação dos leitores ou dos dispositivos móveis.

A medição da força de sinal é o método mais comum e mais viável em sistemas caracterizados por movimento aleatório, uma vez que possibilita a realização da localização em espaços sem linha de vista, e com menor densidade de recetores da rede, bem como a utilização de eletrônica menos onerosa e de baixo consumo. A triangulação de RSSI não é um método exato para efeitos de localização uma vez que a força de sinal não é uma grandeza estável - depende fortemente dos obstáculos entre o emissor e o recetor, e das condições atmosféricas, principalmente da humidade.

São várias as soluções técnicas focadas no seguimento de pessoas e bens móveis, realizando a identificação de um dispositivo móvel ao passar junto de um pórtico, permitindo ao utilizador ou aplicação a consulta do local da última leitura de cada dispositivo móvel, com hora e data. São também muitas as soluções que compreendem a localização *indoor* ou *outdoor* coberto, por triangulação da força de sinal radiofrequência (RF), combinado com a localização por GPS (nos locais onde há linha de vista para 3 ou mais satélites). Nos meios industriais, é frequente encontrar estas soluções de rede local e GPS implementadas em telefones móveis. No entanto, debaixo de coberturas de betão ou de metal, ou em instalações subterrâneas, o GPS deixa de ser útil. O GPS não permite ainda a localização em altura, e os equipamentos requerem consumos de energia relativamente elevados.



O documento de patente KR20100124649B1 apresenta um sistema de localização baseado em diferentes tecnologias de radiofrequência, usadas em simultâneo, por forma a melhorar a resolução do conjunto. Nesta solução observa-se a implementação de um filtro de Kalman estendido, combinando a força de sinal recebida por pontos de acesso de diferentes tecnologias em cada ponto fixo bem definido.

O documento de patente US8362949B2 descreve um sistema de localização de dispositivos móveis com base em dois métodos concorrentes. Como método primeiro, a posição e a velocidade são obtidas com recurso a um dispositivo GPS. Como método segundo, a aceleração e a velocidade são obtidas com recurso à combinação de um acelerómetro e um giroscópio de tecnologia MEMS. O segundo método é calibrado através dos resultados confiáveis do primeiro, e depende da velocidade inicial e da posição inicial (obtidas pelo método primeiro) para daí calcular a posição. O segundo método é usado nos casos de falta de cobertura de rede GPS ou em modo de poupança de energia - sempre em substituição do primeiro. Esta publicação refere então dois modos de funcionamento distintos - o modo por omissão (doravante designado por modo A) e o modo de poupança de energia (doravante designado por modo B). No modo A, o método primeiro assegura a localização, sendo que o método segundo assume essas funções em substituição do primeiro, quando o sistema perde a cobertura de satélites (exemplos: túneis rodoviários ou ferroviários). No modo B, o método primeiro é responsável pela criação de condições iniciais ao método segundo, e de forma esparsa no tempo obtém a posição e a

velocidade do dispositivo por forma a corrigir o processo de cálculo do método segundo.

O documento de patente US7761233B2 descreve um método de localização com precisão de um sensor móvel (instalado num objeto ou pessoa) que se move num qualquer ambiente, *indoor* ou *outdoor*. O sistema baseia-se na combinação de medidas de uma unidade de sensores inerciais (USI) composta por um acelerómetro e um giroscópio, instalada no sensor móvel, com as medidas de um sistema posicional de referência (SPR) através de um filtro de Kalman estendido.

A invenção descrita no documento US7761233B2 apresenta uma solução que necessita de uma calibração inicial que por sua vez se divide em duas fases:

- Fase 1. O sensor móvel tem de ser posicionado na pessoa ou no objeto que o transporta de tal forma que o eixo-z interno da USI está alinhado com a direção da gravidade e aponta no sentido contrário à desta;
- Fase 2. O posicionamento do sensor móvel tem ainda de garantir que, aquando da primeira medida do sistema, os eixos internos x e y da USI estão alinhados com os eixos X e Y do sistema de referência SPR, respetivamente.

Este processo de calibração constitui um inconveniente à implementação da invenção documentada em US7761233B2 para a localização de pessoas. Outra limitação daquele sistema é a necessidade da não variação da direção do eixo-z da USI ao longo do processo de localização, uma vez que o seu método implica, em cada iteração, transformar a aceleração

(vetorial) dada pelo acelerómetro no referencial  $(x,y,z)$  da USI para o referencial  $(X,Y,Z)$  do SPR através de uma matriz de rotação definida pelo ângulo em torno do eixo-z (coincidente com o eixo-Z do SPR) dado pelo giroscópio.

Características como as que acima se apresentaram limitam em muito a variedade de cenários aos quais aquela tecnologia pode ser aplicada. Para a situação mais comum em que o sensor móvel está na posse de uma pessoa, por exemplo preso na sua roupa, e portanto com oscilações de orientação consideráveis, tal sistema de localização é completamente inaplicável.

#### **4. Descrição detalhada da invenção**

A invenção descreve um sistema **1** e um método implementado em computador **2** que em conjunto realizam funções de localização tridimensional fina em tempo-real de pessoas ou bens móveis em qualquer espaço, *indoor* ou *outdoor*, para as mais diversas finalidades, entre elas a segurança dos indivíduos a exercer funções em zonas perigosas de produção e distribuição elétrica, infraestruturas industriais ou quaisquer áreas de exploração mineira ou equiparadas.

O sistema **1** é composto por:

- dispositivos móveis (emissores) de identificação individual **11**;
- leitores de radiofrequência (recetores) com posições fixas **12**;
- redes de banda larga **13** para transporte de informação;
- um servidor central de informação **14**;

- uma base de dados **15**; e
- uma máquina de cálculo **16**.

O sistema **1** é instalado num espaço físico tridimensional, doravante denominado por Espaço de Implementação do Sistema (EIS), com sistema de coordenadas (X, Y, Z).

Os leitores **12** encontram-se distribuídos pelo EIS, fixos à infraestrutura local, por forma a conseguirem a completa cobertura de rede de radiofrequência onde comunicam os dispositivos móveis **11**. Os leitores **12** são também elementos da rede de banda larga **13**.

Os dispositivos móveis **11** são compostos por um elemento rádio **111**, um acelerómetro **112**; um giroscópio **113**; e um botão de pânico **114**. Por forma a maximizar a autonomia do dispositivo **11**, e minimizar o seu tamanho e peso, os sensores **112** e **113** são de tecnologia MEMS (dos termos em inglês *Micro Electromechanical System*).

O conjunto composto por acelerómetro **112** e giroscópio **113** será doravante denominado por Unidade de Sensores Inerciais (USI). A USI tem associado a si mesma um sistema de coordenadas (x,y,z) em relação ao qual são computados os dados fornecidos por acelerómetro **112** e giroscópio **113**.

O método **2** é composto por duas fases, a de aprendizagem das condições de radiofrequência locais **20**, e a de localização em tempo-real **21** baseada na implementação de um filtro de Kalman estendido, constituído por uma equação de processo **22** de carácter inercial, e uma equação de medida que emprega a estimativa da posição instantânea **162** obtida pelo método **23** baseado exclusivamente na força de sinal e na aprendizagem **20**.

Na fase de aprendizagem **20**, é definido um conjunto de pontos de treino **31** que cobre o EIS. Em cada um dos pontos de treino **31**, é colocado um dispositivo móvel **11** que comunica um conjunto de **H** mensagens de treino **201** multiplicadas por **I** diferentes potências de sinal **252**. As mensagens **201** são compostas pelos seguintes dados: identificação (ID) **251** do dispositivo móvel **11**; e potência de sinal **252** emitida pelo mesmo. Cada um dos **N** leitores **12** recebe as mensagens **201**, mede a força de sinal recebida (RSSI) e constrói  $H \times I$  mensagens de contexto de treino **202**, uma por cada das **H** mensagens de treino **201** e por cada uma das **I** potências de sinal **252**. Estas novas mensagens **202** são de seguida enviadas para a base de dados **15** através da rede de banda larga **13**. Estas mensagens **202** são compostas pelos seguintes dados: identificação (ID) **251** do dispositivo móvel **11**; potência **252** emitida pelo mesmo; ID do leitor **253**; e o valor do RSSI **254** medido no leitor **12**.

Uma vez feita a aprendizagem em todos os pontos de treino **31** do conjunto, as mensagens guardadas na base de dados **15** são agrupadas por pontos de treino **31** e classificadas por potência **252**. De seguida, para cada ponto de treino  $(X, Y, Z)$ , dados a potência de sinal **252** denotada por  $i = 1, \dots, I$  e o leitor **12** denotado por  $n = 1, \dots, N$ , é calculada a média  $\mu_n^i$  do RSSI medido nas **H** mensagens correspondentes, bem como o respetivo desvio padrão  $\sigma_n^i$  daqueles valores de RSSI. Esta informação,  $\mu_n^i$  e  $\sigma_n^i$ , determina a Gaussiana  $\rho_n^i[X, Y, Z]$  dada por

$$\rho_n^i[X, Y, Z](R) = \frac{1}{\sigma_n^i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R - \mu_n^i)^2}{2(\sigma_n^i)^2}}, \quad i = 1, \dots, I, \quad n = 1, \dots, N \quad (1)$$

onde  $R$  é a variável de RSSI. A função  $\rho_n^i[X,Y,Z]$  corresponde portanto à densidade de probabilidade relativa à distribuição dos valores de RSSI, isto para a posição de treino  $(X,Y,Z)$ , para o leitor  $n$  e para a potência  $i$ .

Procedendo deste modo, obtemos para cada ponto de treino  $(X,Y,Z)$  uma matriz  $I \times N$  de Gaussianas

$$T(X,Y,Z) = (\rho_n^i[X,Y,Z]) \quad (2)$$

que contém portanto a informação da distribuição dos valores de RSSI naquele ponto de treino **31** para as várias potências de sinal **252** e para os vários leitores **12**. Diz-se então que  $T(X,Y,Z)$  é o “padrão de RSSI da posição de treino  $(X,Y,Z)$ ” **160**. A linha  $i=1,\dots,I$  da matriz  $T(X,Y,Z)$  contém a informação das distribuições de RSSI pelos  $N$  leitores **12** para a potência de sinal  $i$ . Assim, dizemos também que a linha  $i$  de  $T(X,Y,Z)$  é o “padrão de RSSI para a potência  $i$  da posição de treino  $(X,Y,Z)$ ”.

A base de dados de treino final consiste assim na lista de todos os padrões de RSSI  $T(X,Y,Z)$  **160**, um para cada ponto de treino  $(X,Y,Z)$  **31**.

Na fase de localização **21**, os dispositivos móveis **11** comunicam periodicamente uma mensagem de sinalização **211**, com uma das  $I$  potências **252** selecionadas na fase de aprendizagem **20**. A potência de sinal **252** emitida por cada dispositivo móvel **11** depende da zona do EIS em que se encontra em cada instante, e é configurada pelos leitores **12** que se encontram nessa zona. Sempre que um dispositivo

móvel **11** entra numa zona diferente, os leitores **12** dessa zona enviam uma mensagem de configuração ao dispositivo móvel **11** com a informação da potência de sinal **252** que foi previamente estipulada para aquela zona. Nomeadamente, isto quer dizer que EIS se encontra virtualmente dividido em diferentes zonas, sendo atribuído uma das **I** potências de sinal **252** a cada zona. Desta forma conseguimos adequar a precisão do presente sistema de localização às necessidades de cada zona. Em zonas onde não existe necessidade de se ter uma precisão elevada, os leitores **12** são colocados de forma mais esparsa e a potência de sinal **252** utilizada será mais alta (portanto com maior alcance). Em zonas onde existe uma necessidade de precisão elevada (por exemplo certas zonas perigosas de instalações ou plantas industriais) os leitores **12** são colocados de uma forma mais densa (mais leitores **12** por área) e a potência de sinal **252** usada é mais baixa (portanto com menor alcance), de forma que o dispositivo móvel **11** seja detetado por um número menor de leitores **12**.

As mensagens de sinalização **211** são compostas, em cada instante  $k$ , pelos seguintes dados: ID do dispositivo móvel **251**; potência de emissão **252**; distância percorrida pelo dispositivo móvel **11** entre os instantes  $k-1$  e  $k$  **261**; e a variação angular **262** entre as duas seguintes retas: a reta que liga as posições nos instantes  $k-2$  e  $k-1$ , e a reta que liga as posições nos instantes  $k-1$  e  $k$ . As posições nos instantes  $k-1$  e  $k$  referidas são calculadas internamente pela USI, no respetivo sistema de coordenadas  $(x,y,z)$ , com base nas medidas adquiridas pelo acelerómetro **112** e giroscópio **113** e tendo como origem o ponto no instante  $k-2$ .

No final da computação, são devolvidos, não as posições nos instantes  $k-1$  e  $k$  (que dependem do referencial), mas sim as medidas invariantes referidas: a distância percorrida **261** e a variação angular **262**. Estas medidas invariantes podem ser usadas diretamente no sistema de coordenadas do EIS e irão entrar na equação de processo **22** do filtro de Kalman estendido descrito mais adiante.

A distância **261** é obtida a partir do acelerómetro **112** através de um método matemático para a aplicação de pedómetro **117**. A variação angular **262** é obtida a partir do giroscópio **113** através de um método matricial **118**.

Cada leitor **12** recebe as mensagens **211** e mede o respetivo RSSI instantâneo **260**. Cada leitor **12** procede posteriormente à construção de uma mensagem de localização **212** por cada dispositivo móvel **11**, composta pelos seguintes dados: o ID do dispositivo móvel **251**; a potência de emissão **252**; o ID do recetor **253** (o ID do próprio); o RSSI **260**; a distância percorrida pelo dispositivo móvel **11** entre os instantes  $k$  e  $k-1$  **261**; e a variação angular **262** entre a reta que liga as posições nos instantes  $k-1$  e  $k$  e a reta que liga as posições nos instantes  $k-2$  e  $k-1$ . Estas mensagens são veiculadas na rede **13** e registadas na base de dados **15** através do servidor **14**.

A máquina de cálculo **16** trata então as  $N$  mensagens **212** afetas a um dispositivo móvel **11**, para cada instante  $k$ , uma por cada leitor **12**, construindo a respetiva "assinatura" de RSSI **161**, ou seja, o vetor de medida  $M^i$  com dimensão  $N$  dado por:



$$M^i = (R_1^i, \dots, R_N^i) \quad (3)$$

onde  $R_n^i$ ,  $n=1, \dots, N$ , é a medida de RSSI no leitor  $n$  para a potência  $i$  **252** emitida pelo dispositivo móvel **11**. O índice  $i$  usado nestes símbolos serve para indicar a potência de sinal **252** afeta às medidas de RSSI registadas e apresentadas na assinatura de RSSI **161**.

A estimativa da posição instantânea **162** é obtida através de uma implementação probabilística do método KNN (*K-nearest neighbours*) sobre a lista de posições de treino **31**. Isto é, dada a assinatura  $M^i$  acima na equação **(3)**, o método **24** para encontrar as  $K$  "melhores" posições de treino **31** baseia-se em encontrar os  $K$  padrões **160** cuja linha  $i$  da respetiva matriz (a linha associada à potência de emissão **252**  $i$  indicada no vetor de medida  $M^i$ ) apresenta maior probabilidade de ser compatível com aquela assinatura  $M^i$  **161**. No final, a estimativa da posição **162** é dada por uma média ponderada do  $K$  pontos encontrados.

Mais concretamente, para cada padrão **160**  $T = (\rho_n^i)$  da base de dados de treino, calculamos o "indicador de compatibilidade" entre a assinatura de RSSI  $M^i$  e o padrão  $T$ , que definimos como sendo o número positivo  $C(M^i, T)$  dado por:

$$C(M^i, T) = \prod_{n=1}^N \rho_n^i(R_n^i) \quad (4)$$

onde  $\rho_n^i(R_n^i)$  é o valor da distribuição normal  $\rho_n^i$  em  $R_n^i$ . De notar que no cálculo de  $C(M^i, T)$  apenas se usou a linha  $i$  da matriz  $T$ , já que a assinatura  $M^i$  está afeta à potência  $i$ .

Após a repetição deste cálculo para cada padrão  $T$  na base de dados **15**, são guardados os  $K$  padrões, denotados por  $T_1, \dots, T_K$ , que têm os maiores indicadores de compatibilidade  $C(M^i, T_j)$  com a assinatura de RSSI  $M^i$ , e recolhidos os respetivos pontos de treino **31** que se denotam por:

$$p_j = (X_j, Y_j, Z_j), \quad j = 1, \dots, K \quad (5)$$

A estimativa da posição **162**, que se denota por  $p$ , do dispositivo móvel **11** que foi detetado com a assinatura de RSSI **161**  $M^i$ , é então dada pela média pesada destas  $K$  posições  $p_j, j = 1, \dots, K$ :

$$p = \sum_{j=1}^K c_j p_j \quad (6)$$

onde os pesos  $c_j$  são normalizados e dados por

$$c_j = \frac{C(M^i, T_j)}{\sum_{m=1}^K C(M^i, T_m)} \quad (7)$$

De notar ainda que o espaço de pontos de treino **31** é "tridimensional" no sentido que os pontos de treino **31** estão distribuídos segundo as 3 direções do referencial do EIS, consoante as necessidades de precisão de localização de cada zona. Deste modo a estimativa da posição **162** dada por este método é feita de forma tridimensional. Em particular, é feita localização também em altura.

A computação da posição instantânea final **164** é então realizada através da combinação da estimativa da posição **162**, dada pela equação **(6)**, com a informação fornecida

pelos sensores inerciais, a distância **261** representada por  $d$ , e o ângulo **262** representado por  $\theta$ , através de um filtro de Kalman estendido.

Descreve-se, seguidamente a implementação do filtro de Kalman estendido, efetuada no presente sistema.

Define-se um processo que descreve a evolução temporal da posição  $p_k = (X_k, Y_k, Z_k)$  do dispositivo móvel **11** com o tempo  $k$  no referencial do EIS. Na Figura 6 descreve-se a situação genérica das posições do dispositivo móvel **11**,  $p_{k-2}$ ,  $p_{k-1}$  e  $p_k$ , em três instantes distintos,  $k-2$ ,  $k-1$  e  $k$ , respetivamente.

No instante  $k$ , o dispositivo móvel **11**, através dos sensores inerciais **112** e **113**, indica a distância  $d_k$  entre as posições  $p_k$  e  $p_{k-1}$ , bem como o ângulo  $\theta_k$  entre as retas definidas pelos vetores  $p_{k-1} - p_{k-2}$  e  $p_k - p_{k-1}$ , isto é:

$$d_k = \|p_k - p_{k-1}\| \quad (8)$$

$$\theta_k = \angle(p_{k-1} - p_{k-2}, p_k - p_{k-1}) \quad (9)$$

sendo que o ângulo  $\theta_k$  é medido do vetor  $p_{k-1} - p_{k-2}$  para o vetor  $p_k - p_{k-1}$ , definindo-se assim, pela "regra da mão direita", o sinal do ângulo  $\theta_k$ . O ângulo  $\theta_k$  é dado em relação ao eixo Z do referencial do EIS, eixo este que tem a direção da gravidade e o sentido contrário a esta.

A evolução temporal da posição  $p_k$  do dispositivo móvel **11** pode assim ser facilmente descrita pela seguinte equação de processo

$$p_k = p_{k-1} + d_k R(\theta_k) \frac{(p_{k-1} - p_{k-2})}{\|p_{k-1} - p_{k-2}\|}, \quad (10)$$

onde as posições  $p_k$  estão a ser vistas como vetores coluna  $p_k = (X_k, Y_k, Z_k)^T$  e  $\|p_{k-1} - p_{k-2}\|$  é a norma do vetor  $p_{k-1} - p_{k-2}$ .  $R(\theta_k)$  é a matriz de rotação tridimensional em torno dos eixo Z do referencial do EIS pelo ângulo  $\theta_k$ :

$$R(\theta_k) = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k & 0 \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

A equação (10) não está na forma pretendida para poder ser usada num filtro de Kalman, já que este último envolve uma equação de processo com apenas dois estados: um estado anterior no instante  $k-1$  e um estado atual no instante  $k$ , cuja melhor estimativa se quer determinar. No entanto, é possível reescrever a equação (10) de forma a esta satisfazer os requisitos do filtro de Kalman. Concretamente a equação (10) é equivalente à equação:

$$\Pi_k = f(k-1, \Pi_{k-1}) \quad (12)$$

onde o estado do sistema no instante  $k$  passa a ser dado pelo vetor 6-dimensional

$$\Pi_k = (p_k \ p_{k-1})^T = (X_k \ Y_k \ Z_k \ X_{k-1} \ Y_{k-1} \ Z_{k-1})^T \quad (13)$$

e onde  $f$  é uma função não-linear, de  $\mathbb{N} \times \mathbb{R}^6$  em  $\mathbb{R}^6$ , dada por:

$$f(k-1, \Pi_{k-1}) = \begin{pmatrix} I + A_{k-1} & -A_{k-1} \\ I & 0 \end{pmatrix} \Pi_{k-1}, \quad (14)$$

onde  $I$  é a matriz identidade de dimensão 3, e  $A_{k-1}$  é a matriz  $3 \times 3$  dada por

$$A_{k-1} = \frac{d_k R(\theta_k)}{\|p_{k-1} - p_{k-2}\|}$$

Agora os vetores  $p_k$  devem ser vistos como projeções dos vetores  $\Pi_k$ , de modo que por exemplo a norma  $\|p_{k-1} - p_{k-2}\|$  acima é agora vista como uma função de  $\Pi_{k-1}$ .

A equação (12) resulta de uma abordagem determinista. A sua passagem para o caso não-determinista, tal como é formulado o filtro de Kalman, é feita de forma simples considerando-se as componentes do estado  $\Pi_k$  como variáveis aleatórias, e adicionando àquela equação um erro gaussiano de média zero  $w_k$ . Desta forma, a versão não-determinista da equação (12) é a equação dada por:

$$\Pi_k = f(k-1, \Pi_{k-1}) + w_{k-1} \quad (15)$$

O erro  $w_{k-1}$  descreve a imprecisão que se tem ao computar o estado  $\Pi_k$  através da equação (12). Como a componente  $p_{k-1}$  de  $\Pi_k$  é igual à componente  $p_{k-1}$  de  $\Pi_{k-1}$ , que já é conhecida no instante  $k$ , então não existe erro na determinação daquela componente de  $\Pi_k$ . Desta forma o erro  $w_{k-1}$ , é da forma

$$w_{k-1} = (w_{k-1}^1, w_{k-1}^2, w_{k-1}^3, 0, 0, 0)^T$$

onde  $w_{k-1}^1, w_{k-1}^2, w_{k-1}^3$  são os erros nas coordenadas  $X, Y, Z$ , respetivamente, da estimativa da posição  $p_k$  dada pela equação (10) ou equivalentemente pela equação (12). Na prática estes erros correspondem à incerteza das medidas de distância  $d_k$  e variação angular  $\theta_k$  fornecidas pelo acelerómetro 112 e giroscópio 113, respetivamente, e são intrínsecos a estes últimos sensores. Os erros  $w_{k-1}^1, w_{k-1}^2, w_{k-1}^3$  podem ser facilmente calculados realizando experimentalmente um número adequado de percursos

semelhantes ao da Figura 6, comparando em cada um dos percursos a posição final real com a posição final estimada através da equação (10).

A equação (15) é então a equação de processo a ser usada no filtro de Kalman estendido.

Como instrumento de medida é usado o método 23, que em cada instante retorna uma estimativa da posição instantânea 162. Em cada instante  $k$  este método fornece uma medida da posição  $m_k = (X_k, Y_k, Z_k)$  do dispositivo móvel 11. A equação seguinte descreve a relação entre os vetores de medida e os vetores representativos do estado do sistema presentes na equação de processo:

$$m_k = H \Pi_k + v_k \quad , \quad H = (I \ 0) \quad (16)$$

onde  $H$  é portanto uma matriz  $3 \times 6$  independente do tempo, e  $v_k$  é o erro associado ao método 23 como instrumento de medida. Este erro é conhecido *a priori* realizando vários testes de medida com o método 23 no EIS.

Fica assim definido, pelas equações (15) e (16), o filtro de Kalman estendido usado no presente sistema de localização.

O sistema descrito no presente documento está ainda desenhado para satisfazer, simultaneamente, os seguintes requisitos ao nível da unidade de sensores inerciais (USI):

- 1) O dispositivo móvel 11 não necessita de calibragem inicial quanto à sua orientação;

- 2) A orientação do dispositivo móvel **11** pode variar arbitrariamente ao longo do tempo segundo qualquer direção.

Descrição breve dos métodos da presente invenção que respondem aos requisitos anteriores:

- A USI está programada para se autocalibrar repetidamente ao longo do tempo enquanto decorre o processo de localização. Nomeadamente, a USI está dotada com um método computacional que efetua o cálculo periódico da direção e sentido da gravidade relativamente ao sistema de eixos da USI. O resultado deste cálculo tem uma ótima precisão nos instantes em que as outras acelerações provocadas pelo movimento do dispositivo móvel **11** são significativamente menores (em módulo) que a da gravidade. Estes instantes são aqueles em que o dispositivo móvel **11** está mais próximo dos estados de repouso ou de velocidade constante. Verificada esta condição, a direção e sentido da gravidade é determinada com grande confiança (no referencial da USI) e usada como autocalibração da USI para o intervalo de tempo seguinte. Logo que aquelas condições se voltem a verificar há lugar a uma nova calibração automática, e assim sucessivamente. Este método de "autocalibração recorrente" é também a razão do nosso sistema permitir que a orientação do dispositivo móvel **11** varie arbitrariamente segundo qualquer eixo ao longo do tempo.

De notar que computar a direção e sentido da gravidade relativamente ao referencial da USI é o mesmo que

expressar em cada instante o eixo Z do referencial do EIS no referencial da USI. Assim, os ângulos fornecidos pelo giroscópio 113 podem ser projetados sobre o eixo da gravidade, e o resultado, o ângulo  $\theta_k$ , pode ser usado diretamente no referencial do EIS como sendo o ângulo que o dispositivo móvel **11** rodou em torno do eixo Z.

- A transformação de informação do sistema de coordenadas da USI para o sistema de coordenadas do EIS é realizada através do uso de grandezas invariantes (que por definição não dependem do sistemas de coordenadas), nomeadamente a distância entre dois pontos e o ângulo entre duas retas. Assim, procede-se à conversão da informação dada por acelerómetro **112** e giroscópio **113** no sistema de coordenadas  $(x, y, z)$  da USI em grandezas invariantes (distância  $d$  e ângulo  $\theta$ , que entram na equação de processo do filtro de Kalman) que podem assim ser usadas diretamente no sistema de coordenadas  $(X, Y, Z)$  do EIS sem necessidade de qualquer transformação.

Estas características permitem que o presente sistema de localização possa ser aplicado a qualquer cenário, mesmo aqueles em que o objeto ou pessoa que transporta o dispositivo móvel **11** tem um comportamento instável em termos de orientação. Este facto representa uma vantagem significativa sobre os outros sistemas de localização



constantes dos documentos de patente a que se alude na secção do estado da técnica.

O algoritmo associado ao acelerómetro **112**, responsável por converter os valores de aceleração em distância percorrida, pode ser adequado ao cenário em questão. Por exemplo, no caso em que o portador do sensor é uma pessoa, o algoritmo mais adequado a usar será o de pedómetro. No caso de um sensor instalado, por exemplo, num carrinho de compras num supermercado, o algoritmo mais adequado já será o de conversão de aceleração em distância através de integração.

## 5. Figuras

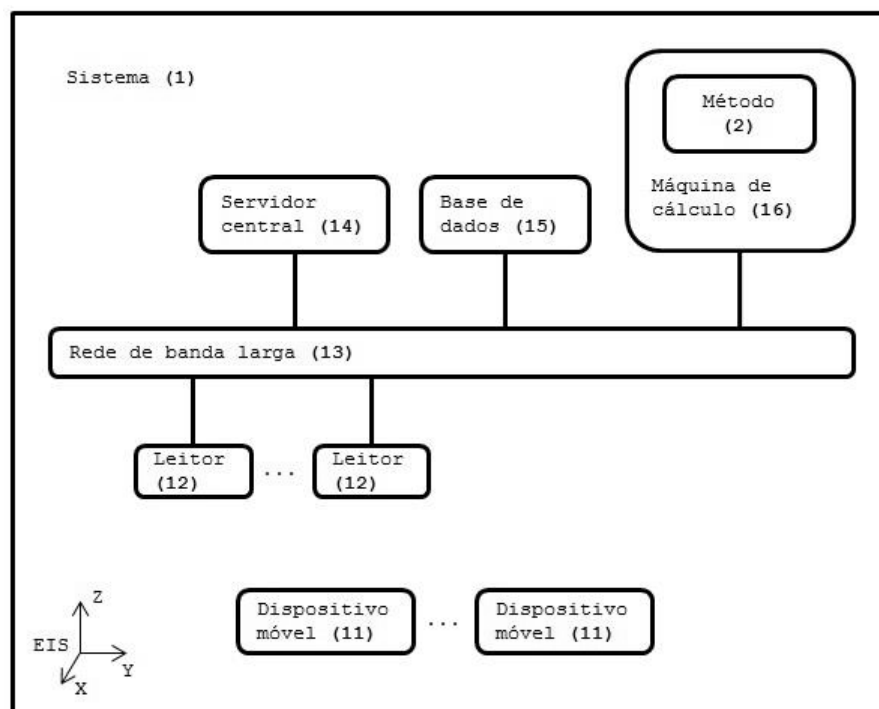


Figura 1: Componentes do sistema.

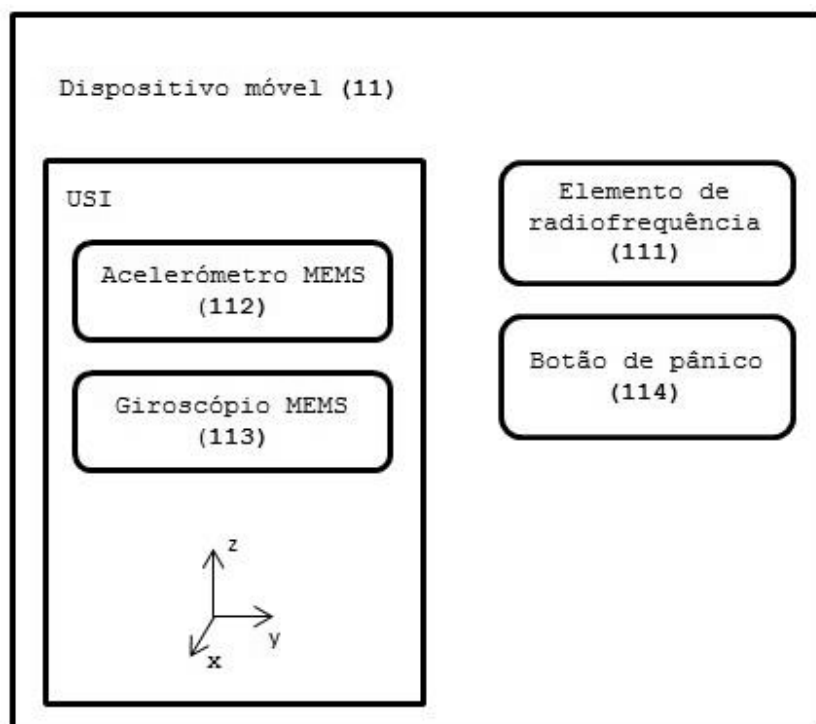


Figura 2: Componentes do dispositivo móvel.

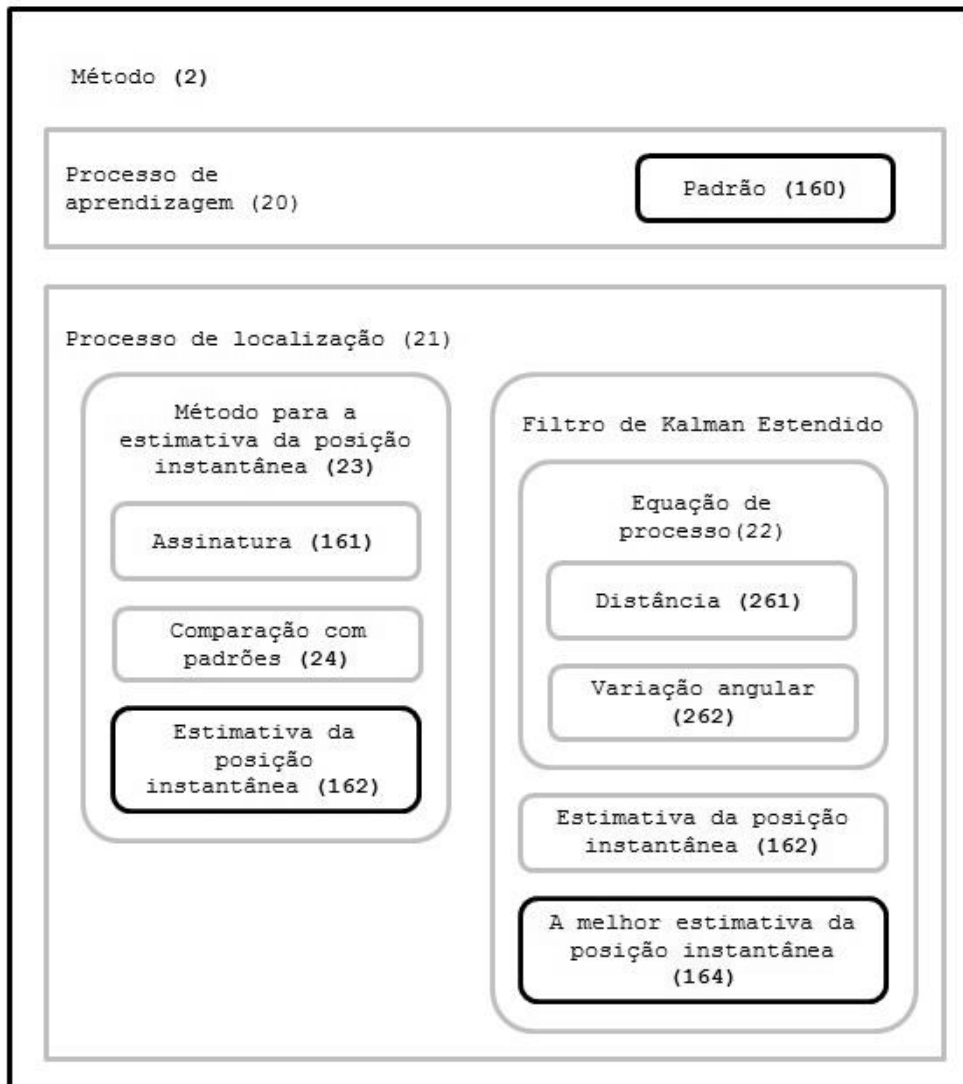


Figura 3: Organização dos processos do método computacional 2. Os retângulos a preto correspondem aos resultados de cada bloco processual. O resultado final do método é a melhor estimativa da posição instantânea **164**.

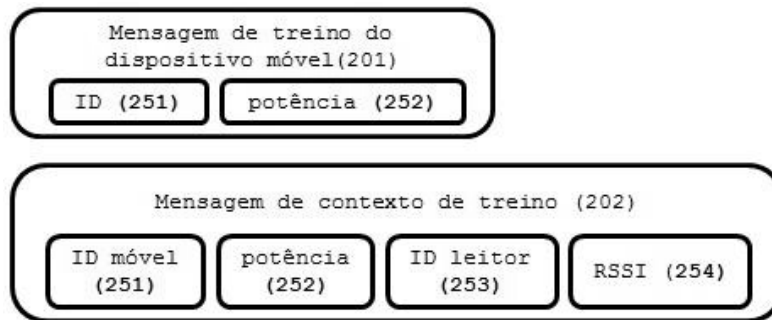


Figura 4: Estrutura das mensagens da fase de treino **20**, com os respectivos elementos de informação.

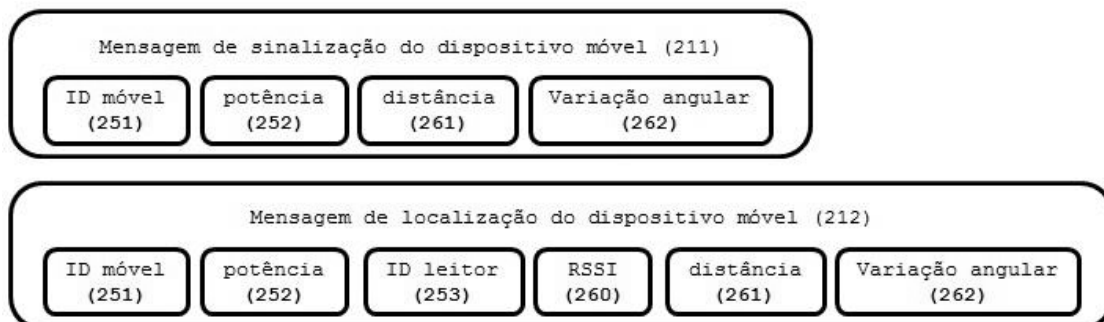


Figura 5: Estrutura das mensagens da fase de localização **21**, com os respectivos elementos de informação.

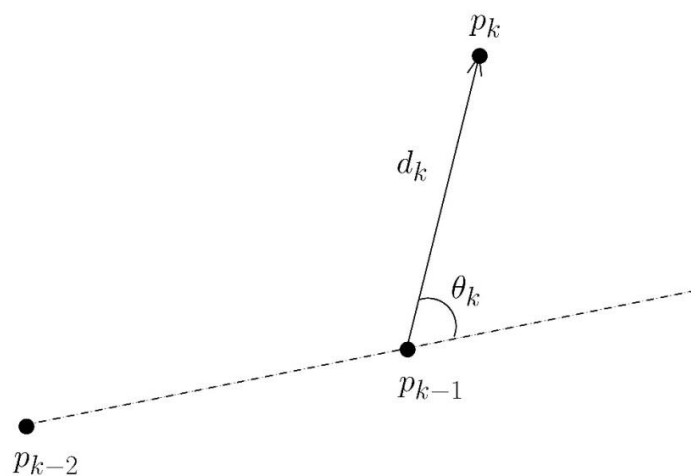


Figura 6: Significado da distância  $d_k$  **261** e da variação angular  $\theta_k$  **262** fornecida pelos sensores inerciais **112** e **113**, respetivamente. O eixo Z do EIS (com a direção da gravidade e sentido contrário a esta) é perpendicular ao plano na figura.

## Referências

### Documentos de patentes

US	7,761,233	B2	07/2010	Schott et al
US	8,362,949	B2	01/2013	Yang et al
KR	20100124649	B1	11/2010	Sun Woo et al

Coimbra, 10 de Abril de 2014