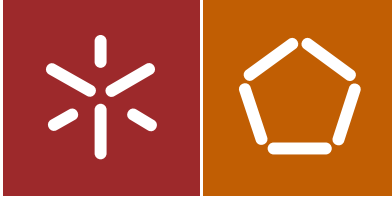




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Alexandre Pereira Azevedo

Domótica sem fios baseada em redes ZigBee



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Alexandre Pereira Azevedo

Domótica sem fios baseada em redes ZigBee

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia e Telecomunicações e Informática

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Augusto Afonso

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor José Augusto Afonso pela excelente orientação, dedicação, paciência e total disponibilidade, ao longo do desenvolvimento da dissertação.

À Universidade do Minho, por ser a minha segunda casa durante a frequência do curso e também por ter ao dispor todo o equipamento necessário, quer ao longo dos estudos como também na realização deste projeto.

Quero agradecer à minha família, com ênfase aos meus pais, Manuel Carlos e Rosa Maria e ao meu irmão, Humberto, pois sem eles este percurso não seria possível.

À minha namorada Mariana Guise, um agradecimento especial, pela ajuda e motivação que transmitiu nos momentos mais difíceis.

Uma menção especial para os meus amigos Eduardo Machado, Hélder Dias, Miguel Pinheiro e Guilherme Raimundo com quem partilhei de perto os melhores momentos ao longo deste percurso. Os meus sinceros agradecimentos pela vossa amizade.

Por fim e não menos importante, aos meus amigos da “Casa do Povo”, pelos momentos vividos durante estes 5 anos de percurso académico, pela receção nos dias mais difíceis e apoio quando era necessário.

Resumo

A gestão inteligente da rede doméstica, com base na combinação das tecnologias de informação e comunicação com sensores e atuadores, abre caminho a novas soluções com grandes utilidades no mundo real. A tecnologia digital oferece oportunidades estimulantes para aumentar a conectividade de dispositivos de rede para fins de automação residencial. Esta dissertação tem como objetivo o estudo, implementação e teste de soluções de automação doméstica baseadas em redes ZigBee.

Nesta dissertação, foi realizado um estudo das tecnologias mais presentes no mercado a nível de comunicação com fios, sem fios e *powerline*, tendo em vista a comparação com o ZigBee, uma tecnologia de redes de área pessoal sem fios baseada na norma IEEE 802.15.4 que tem vindo a crescer ao longo do tempo.

A implementação e teste desta tecnologia foram realizados utilizando plataformas de *hardware* e *software* da Texas Instruments (TI) e o *software* IAR Embedded Workbench. Numa fase inicial foi realizado um estudo da Z-Stack, a pilha protocolar ZigBee fornecida pela TI, que é uma ferramenta poderosa para desenvolvimento de soluções para esta tecnologia. Foi feita uma descrição de como configurar os dispositivos para formar uma rede de sensores sem fios típica e posteriormente foi apresentado como funcionam as aplicações exemplos que se encontram em diferentes versões da Z-Stack.

Foram realizados testes para avaliação da taxa de erros na transmissão num ambiente habitacional, de forma a poder validar a solução. Assim, foi possível perceber onde podem existir problemas e como os resolver.

Palavras-Chave: Automação; Domótica; Redes; ZigBee; Z-Stack.

Abstract

The intelligent management of the domestic network, based on the combination of information and communications technologies with embedded sensors and actuators, opens the way to new solutions with great usefulness on the real world. The network enabled digital technology offers exciting opportunities to increase the connectivity of devices for the purpose of home automation. This dissertation aims the study, implementation and test of solutions for home automation based on ZigBee networks.

This dissertation performed a study of multiple network technologies present in market, based in wired and wireless communications and powerline, with the aim to provide a comparison with ZigBee, a wireless personal area network based in the IEEE 802.15.4 standard that is growing throughout time.

The implementation and tests were performed using hardware and software platforms from Texas Instruments (TI) and the IAR Embedded Workbench software. Initially, information about the Z-Stack, the ZigBee stack supplied by TI, was gathered. A description of how to configure the devices to form a typical wireless sensor network was provided, and then it was presented how the examples applications in different versions of the Z-Stack work.

Tests were made to evaluate the transmission error rate in a residential environment, in order to validate the solution. That way, it was possible to understand where some problems were and solve them.

Keywords: Automation; Home Automation; Networks; ZigBee; Z-Stack.

Índice de conteúdos

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice de conteúdos.....	vii
Lista de figuras.....	xi
Lista de tabelas.....	xiii
Lista de abreviaturas.....	xv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2. Estado da arte.....	5
2.1 Domótica.....	5
2.2 Tecnologias com fios.....	8
2.3 Tecnologias <i>powerline</i>	8
2.3.1 X10.....	9
2.3.2 INSTEON.....	10
2.4 Tecnologias sem fios	10
2.4.1 6LoWPAN.....	11
2.4.2 EnOcean.....	12
2.4.3 Wavenis	12

2.4.4	ZigBee	13
2.4.5	Z-Wave.....	20
2.5	Comparação de tecnologias.....	20
2.6	Trabalhos relacionados.....	25
2.6.1	HM4All - Health Monitoring for All	25
2.6.2	Comunicação ad hoc com ZigBee	26
2.6.3	Body Sensor Networks.....	27
3.	Desenvolvimento do sistema	29
3.1	Plataforma de desenvolvimento.....	29
3.1.1	SmartRF05EB	30
3.1.2	CC2530EM	32
3.1.3	CC2531 USB <i>dongle</i>	35
3.2	<i>Software</i> de desenvolvimento.....	35
3.3	Z-Stack.....	36
3.3.1	Z-Stack 2.5.....	37
3.3.1.1	Coordenador.....	39
3.3.1.2	End Device	40
3.3.2	Z-Stack Home: ZigBee Home Automation Solutions	41
3.3.2.1	Exemplo de um interruptor de luz	41
3.3.2.2	Exemplo de uma fechadura eletrónica	43
3.3.2.3	Exemplo de controlo de temperatura.....	45
3.3.3	Z-Stack Energy: ZigBee Smart Energy Solutions	47
3.3.3.1	GenericApp	47
3.3.3.2	SerialApp.....	48

3.3.3.3 TransmitApp	49
4. Resultados e discussão	52
4.1 Código de teste	52
4.2 Testes e resultados	54
5. Conclusões.....	63
Referências.....	66

Lista de figuras

Figura 2-1 - Consumos de eletricidade em habitações (adaptado de [5]).	6
Figura 2-2 - Exemplo de habitação inteligente [1].	7
Figura 2-3 - Diagrama de blocos da comunicação PLC (adaptada de [10]).	9
Figura 2-4 - IPv6 e 6LoWPAN <i>framing</i> sobre 802.15.4 <i>standard</i> (adaptado de [14]).	11
Figura 2-5 - Arquitetura do Wavenis.	13
Figura 2-6 - Topologia em estrela.	14
Figura 2-7 - Topologia em árvore.	15
Figura 2-8 - Topologia em malha.	15
Figura 2-9 - Arquitetura de pilha protocolar ZigBee [15].	16
Figura 2-10 - Formatos da mensagens da pilha protocolar ZigBee [16].	19
Figura 2-11 - Diagrama HM4All [37].	26
Figura 3-1 - Conteúdo do Kit de desenvolvimento.	30
Figura 3-2 - Arquitetura do SmartRF05EB [31].	31
Figura 3-3 - Visão geral da SmartRF05EB Rev. 1.8.1.	32
Figura 3-4 - Visão geral do CC2530EM.	33
Figura 3-5 - Diagrama de blocos do CC2530EM [31].	34
Figura 3-6 - Visão geral do <i>dongle</i> USB CC2531.	35
Figura 3-7 - Ambiente de trabalho do <i>software</i> IAR Embedded Workbench.	36
Figura 3-8 - <i>Includes</i> do SampleApp.	38
Figura 3-9 - Funções locais da SampleApp.	38
Figura 3-10 - <i>End device</i> no lado direito e coordenador no lado esquerdo.	43

Figura 3-11 - Menu de configuração de PIN.	44
Figura 3-12 - SampleDoorLock no coordenador e SampleDoorLockController no <i>end device</i>	45
Figura 3-13 - Display SampleHeatingCoolingUnit.	46
Figura 3-14 - Modo de funcionamento da SerialApp.	48
Figura 4-1 - Fluxograma do algoritmo no coordenador.	53
Figura 4-2 - Tramas capturadas.	54
Figura 4-3 - Disposição dos nós no primeiro esquema de testes.	55
Figura 4-4 - IEEE 802.15.4 (ZigBee) vs IEEE 802.11 (Wi-Fi).	56
Figura 4-5 - Redes Wi-Fi presentes na habitação.	57
Figura 4-6 - Espectro da banda 2.4 GHz com as fontes de interferência.	58
Figura 4-7 - Disposição dos nós no segundo esquema de testes.	59
Figura 4-8 - Espectro da banda de 2.4 GHz com todas as fontes de RF ativas.	60

Lista de tabelas

Tabela 2-1 - Comparação de tecnologias (adaptado de [1], [12], [17]).....	22
Tabela 3-1 - Instruções da aplicação SampleLight.....	42
Tabela 3-2 - Instruções da aplicação SampleSwitch.....	42
Tabela 3-3 – Instruções do SampleDoorLock.....	43
Tabela 3-4 - Instruções SampleDoorLockController.....	43
Tabela 3-5 - Instruções de configuração PIN.....	44
Tabela 3-6 - Instruções do SampleThermostat.....	45
Tabela 3-7 - Instruções para definição de limites de temperatura do SampleThermostat.....	46
Tabela 3-8 - Instruções do GenericApp.....	47
Tabela 3-9 - Instruções da TransmitApp.....	49
Tabela 4-1 - Resultados obtidos no primeiro teste, no canal 11.....	55
Tabela 4-2 - Resultados obtidos no canal 25 com o forno de micro-ondas desligado.	58
Tabela 4-3 - Resultados obtidos no trajeto 5 com o forno de micro-ondas ligado.....	59

Lista de abreviaturas

API	Application Programming Interface
BER	Bit Error Rate
CCA	Clear Channel Assessment
CDMA	Code Division Multiple Access
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunication
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFD	Full Function Device
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunications Union
LAN	Local Area Network
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
WSN	Wireless Sensor Network

ZED	ZigBee End Device
MAC	Medium Access Control
NLDE	NWK Layer Data Entity
NLME	NWK Layer Management Entity
NPDU	NWK Packet Data Unity
NWK	Network
OSI	Open System Interconnection
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical
S-MAC	Sensor Medium Access Control

1. Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

Com a expansão da Internet foi adicionado o potencial de controlo remoto e monitorização de aparelhos. Contudo, a sua adaptação em domótica tem sido lenta e com o ZigBee é possível ultrapassar esses problemas [3].

ZigBee é uma tecnologia de comunicação sem fios, entre dispositivos eletrónicos. A sua vantagem encontra-se na baixa potência de operação, uma vasta densidade de comunicação entre aparelhos dependendo da topologia de funcionamento e redução de conexões físicas. Esta plataforma de desenvolvimento de redes de sensores sem fios é compatível com a norma IEEE 802.15.4.

Num sistema domótico existem várias tarefas; das mais básicas, como acender e apagar luzes, até às tarefas mais complexas, como controlos de consumos elétricos, aumento da vida útil dos equipamentos, controlo através de smartphones em qualquer tempo e lugar e, principalmente, o bem-estar daqueles que usufruem destes sistemas no seu lar ou propriedade.

Os pontos importantes desta dissertação são a performance, segurança e eficiência. Hoje em dia, num sistema com tamanha importância, é necessário garantir segurança e confidencialidade, evitando invasores. O ZigBee tem vantagem nesses pontos, quando comparado com outros sistemas idênticos no mercado [2].

Concebendo um cenário residencial que será realizado com auxílio dos módulos desenvolvidos pela Texas Instruments (TI), baseado em um *System on Chip* (SoC) CC2530, serão efetuados vários testes, de modo a entender qual o melhor modo de funcionamento, para se conseguir obter os pontos relevantes mencionados anteriormente.

1.2 Objetivos

Pretende-se com esta dissertação adquirir conhecimentos no domínio dos protocolos de comunicação em redes sem fios, de modo a que, no final da mesma haja capacidade para:

- a. Descrever as técnicas utilizadas no protocolo de redes sem fios ZigBee;
- b. Descrever as soluções para os problemas encontrados;
- c. Conceber um cenário residencial com módulos ZigBee;
- d. Avaliar a sua performance.

1.3 Estrutura da dissertação

Este capítulo descreve o enquadramento e a motivação que levaram ao desenvolvimento da dissertação, o conjunto dos objetivos a alcançar neste projeto e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte referente às tecnologias presentes no mercado. É realizado um estudo de tecnologias com fios, sem fios e *powerline* mais conhecidas no mercado. É também realizada uma comparação entre as tecnologias e apresentados trabalhos relacionados com a tecnologia que mais se destacou na comparação.

O capítulo 3 apresenta uma descrição da plataforma de desenvolvimento ZigBee utilizada, a nível de *hardware* e *software*. Também é efetuada uma descrição de diversas aplicações exemplo que estão disponíveis para esta plataforma e de alterações efetuadas no código.

O capítulo 4 apresenta o código de teste implementado para um sistema ZigBee e os resultados de testes em ambiente real, de forma a perceber os problemas que podem existir numa habitação para a implementação de uma rede ZigBee numa residência, mostrando passo a passo o que foi realizado.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes ao projeto realizado e perspectiva de trabalho futuro.

2. Estado da arte

Neste capítulo será discutido o estado da arte das tecnologias e conceitos mais importantes das áreas associadas a esta dissertação. Inicialmente serão analisadas as principais tecnologias atualmente existentes no mercado de domótica tais como tecnologias com fios, sem fios e *powerline*. Pretende-se assim analisar as soluções e comparar de modo a chegar a uma solução que seja a mais viável. A tecnologia mais adequada será escolhida para a implementação no sistema, tendo em consideração parâmetros como consumo de energia, taxas de transmissão, alcance entre outros.

2.1 Domótica

As áreas que têm vindo a ter mais foco pela domótica são: eficiência energética, controlo de luzes, controlo remoto, cuidados remotos e segurança [1].

A eficiência energética está relacionada com a monitorização do consumo de energia elétrica e a sua gestão [33], no sentido de alcançar o menor desperdício possível sem que sejam afetados o conforto e a qualidade de vida. O consumo energético de uma habitação depende de diversos fatores, tais como a zona onde a mesma se situa, a qualidade de construção a nível de isolamento, o tipo de equipamentos utilizados e o uso que lhes é dado. Hoje em dia, tanto habitações como equipamentos são classificados com uma classe de desempenho energético.

Em Portugal, 17,7% do consumo de energia final nacional é proveniente de 3,9 milhões de habitações, sendo cerca de 30% do consumo de equipamentos elétricos, o que indica, a necessidade de moderar este consumo elétrico [4].

Nas habitações portuguesas, o consumo energético das mesmas tem vindo a registar um crescimento significativo, também devido, em parte, ao aumento da aquisição de equipamentos consumidores de energia [5].

A ADENE – Agencia para a Energia, é a entidade gestora do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que visa a avaliação e melhoria do desempenho energético aos edifícios. De acordo com a entidade, e em relação ao consumo elétrico de uma habitação média, são consumidos cerca de 3.700 kWh por ano, divididos da forma como se indica na Figura 2-1.

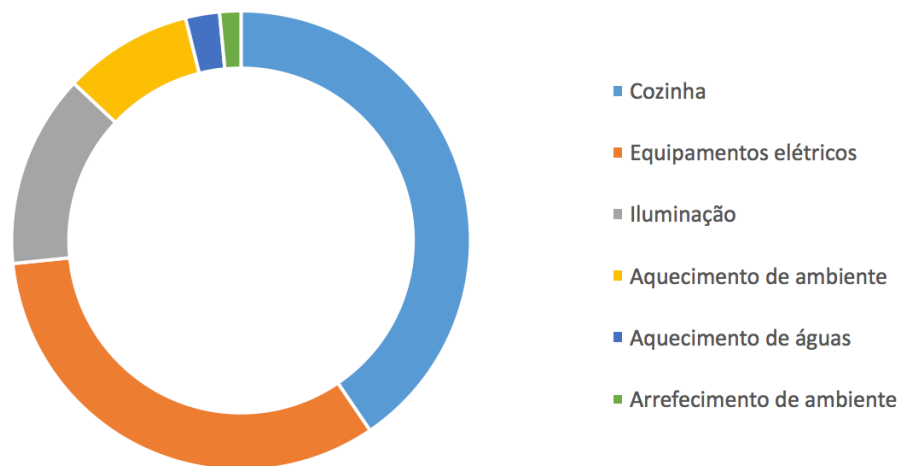


Figura 2-1 - Consumos de eletricidade em habitações (adaptado de [5]).

O aproveitamento da energia e redução do seu consumo é um dos aspetos mais importantes da instalação de um sistema de domótica e, com o uso destes sistemas, estes consumos serão reduzidos significativamente.

O controlo de luzes está ligado diretamente à eficiência energética, sendo que, não existindo movimento numa divisão da habitação, um sensor poderá comunicar a um controlador para desligar as luzes, evitando assim um gasto de energia acrescentado. Caso contrário, quando exista movimento, as luzes serão ligadas. As luzes podem ser controladas a partir de qualquer lugar e o interruptor não necessita estar ligado diretamente a uma lâmpada.

O controlo remoto, como o próprio nome indica, permite que o utilizador possa controlar a habitação, potencialmente, em qualquer lugar. Assim, por exemplo, mesmo no trabalho, o utilizador pode controlar o AVAC (sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado) da habitação para que o ambiente esteja confortável quando pretendido.

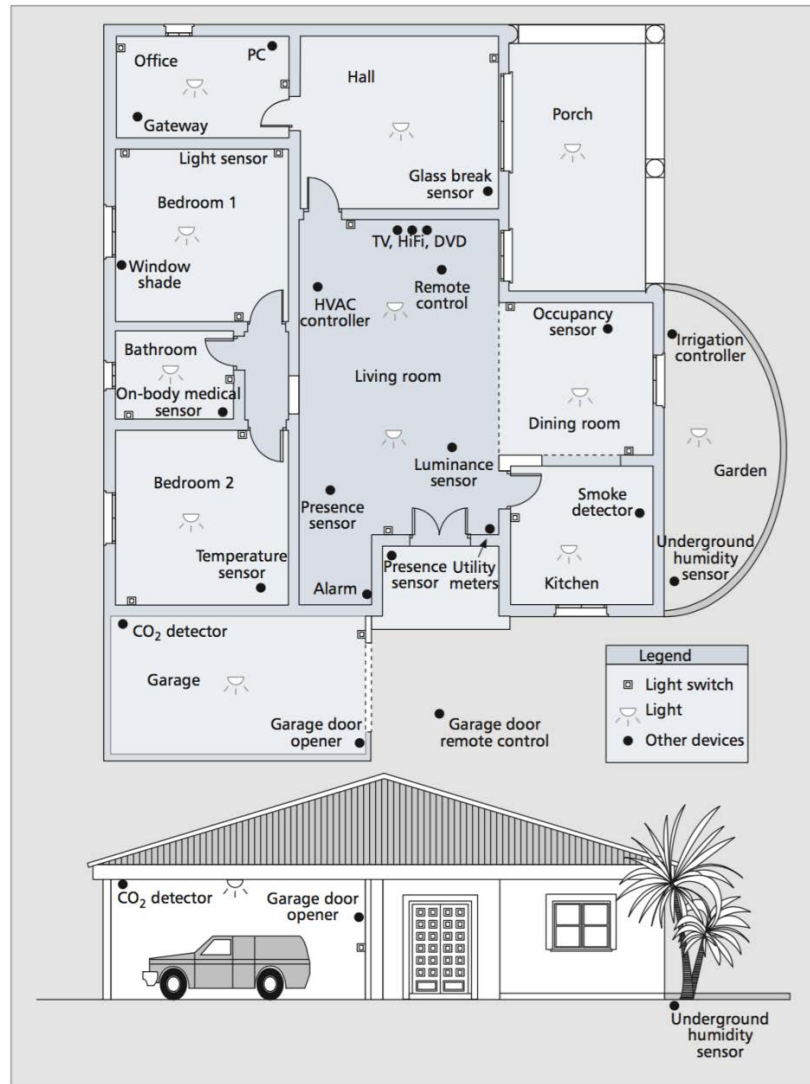


Figura 2-2 - Exemplo de habitação inteligente [1].

Os cuidados remotos referem-se aos cuidados de saúde para quem se encontra na habitação. Assim, com o auxílio de tecnologia *wearable*, é possível monitorizar os utilizadores por longos períodos, no sentido de diagnosticar doenças e possibilitar um tratamento mais eficaz numa fase precoce [7], de possibilitar aos pacientes a realização de sessões de fisioterapia e reabilitação no conforto do lar, com monitorização remota por parte dos terapeutas [8], e de detetar situações de emergência [9] e atuar em tempo recorde, podendo até contactar uma linha de emergência, caso seja necessário.

Por fim, a segurança é outra área de atuação da domótica, através, por exemplo, de sensores que detetam movimento indesejado e ativam alarmes, ou circuitos de câmaras que detetam intrusos.

Na Figura 2-2 é possível ver um exemplo de uma habitação inteligente.

2.2 Tecnologias com fios

As tecnologias com fios foram o início da domótica. Estas tecnologias tinham o incómodo da necessidade de introdução de cabos adicionais na infraestrutura para que os dispositivos comunicassem entre eles. Não existem muitas tecnologias conhecidas associadas à domótica com fios, contudo, existem marcas de componentes elétricos, como por exemplo a Honeywell [6], que avançaram no desenvolvimento de dispositivos de controlo domótico proprietários, baseados em tecnologias de rede já existentes, como é o caso da Ethernet, e assentes sobre par entrelaçado, cabo coaxial ou fibra ótica.

As tecnologias com fios têm as suas vantagens, como melhores taxas de transferência, menor taxa de perdas de pacotes devido a fatores como a distância, ruído e interferência, e maior segurança, comparativamente a tecnologias sem fios. Um exemplo de sistemas de domótica com fios ainda bastante presentes atualmente são os sistemas de videovigilância, devido às taxas de transferência de dados necessárias [22].

2.3 Tecnologias *powerline*

As tecnologias *powerline* (PLC) baseiam-se numa transmissão de dados através de rede elétrica, utilizando uma técnica de modulação adequada ao meio. Os dispositivos PLC podem monitorizar e, consoante o pretendido, comunicar sobre a rede elétrica da habitação [11].

Este sistema é dividido em três partes principais, nomeadamente: transmissor, linha elétrica e recetor. Na Figura 2-3 é possível observar os blocos do transmissor e

do recetor. Na parte do transmissor, os dados modulam uma onda portadora e, em seguida, o sinal resultante é transmitido através da linha elétrica. No recetor, o sinal modulado é recebido e, com o uso de técnicas de desmodulação, os dados são recuperados. Num módulo PLC existe um circuito transmissor e um circuito recetor, para comunicação bidirecional [10].

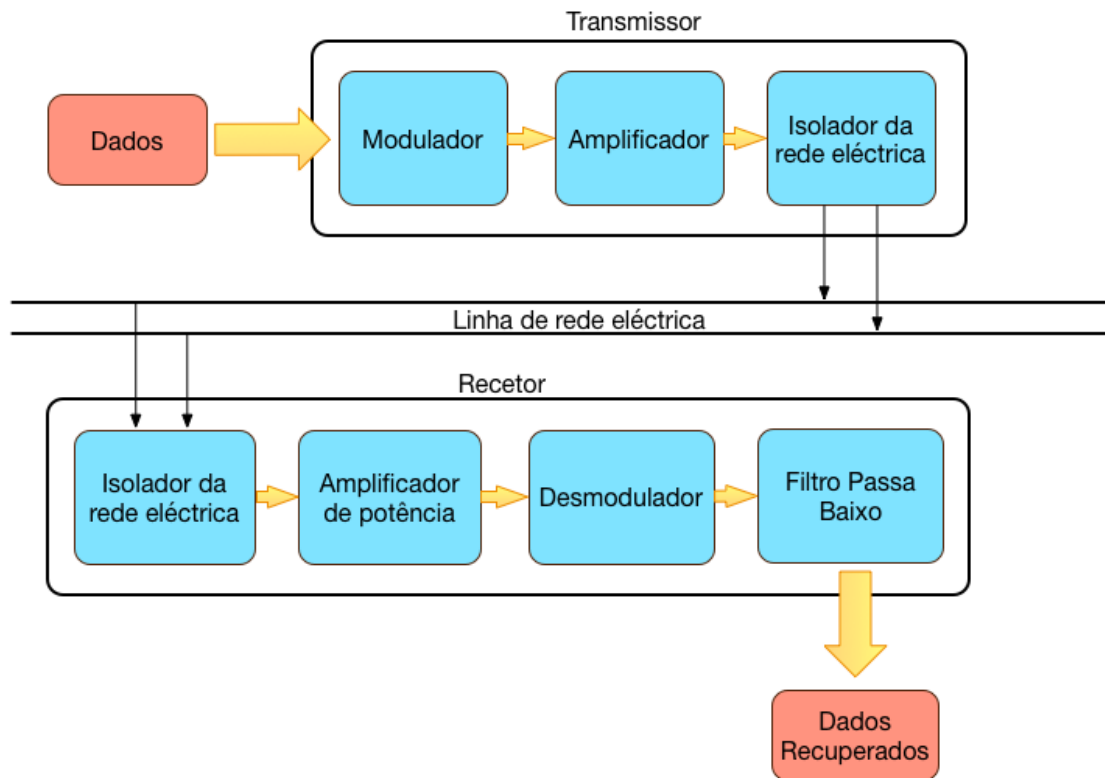


Figura 2-3 - Diagrama de blocos da comunicação PLC (adaptada de [10]).

Alguns dos sistemas de comunicação *powerline* mais conhecidos são o X10 e a INSTEON. Estes sistemas são descritos nas próximas secções.

2.3.1 X10

O X10 é o protocolo mais antigo e usado nas aplicações domésticas. Foi desenvolvido em 1975 pela empresa Pico Electronics com o objetivo de transmitir dados pela rede elétrica com custos muito baixos. A vantagem da utilização da rede elétrica consiste em não ser necessária a instalação de nova cablagem, sendo este o principal meio de comunicação. Além disso, a facilidade de implementação e a

possibilidade de utilizar uma instalação de rede elétrica constituem alguns dos aspetos que contribuíram para o seu sucesso.

Os controladores enviam códigos/sinais pela rede elétrica, dirigidos aos módulos recetores, para estes atuarem. Deste modo é necessário definir os endereços, quer dos controladores, quer nos módulos recetores [12].

2.3.2 INSTEON

A INSTEON foi desenvolvida para substituir o padrão X10. Foi concebido de tal modo que permite que os dispositivos, sensores ou interruptores possam ser usados em conjunto utilizando a rede elétrica e/ou em radio frequência (RF). Esta é a única tecnologia que se comunica através de ambos os modos.

Outra vantagem da INSTEON é a sua compatibilidade parcial com dispositivos X10, uma vez que os comandos executados são idênticos aos do X10. A transmissão de dados ocorre na frequência de 1.131,65 KHz para dispositivos ligados à rede elétrica e 904 MHz para dispositivos sem fios [12]. O número máximo de *hops* para cada mensagem é limitado a quatro, como no Z-Wave.

A transmissão *multihop* é realizada utilizando um esquema de sincronização por intervalo de tempo, pelo que são permitidas as transmissões nesses intervalos. Os nós dentro da mesma rede não transmitem mensagens diferentes ao mesmo tempo.

2.4 Tecnologias sem fios

As tecnologias sem fios constituem uma alternativa às redes convencionais com fios, fornecendo as mesmas funcionalidades, mas de uma forma mais flexível. Apesar das vantagens deste tipo de redes, existem desvantagens: o consumo de energia, o alcance, as interferências no sinal, a menor largura de banda, entre outros. Muitas das desvantagens apresentadas têm vindo a diminuir com o avanço da tecnologia. Algumas das tecnologias mais utilizadas na área de domótica sem fios são o 6LoWPAN, o EnOcean, o Z-Wave, o Wavenis e o ZigBee.

2.4.1 6LoWPAN

O 6LoWPAN é baseado no protocolo IPv6, tendo sido projetado para ser usado sobre o padrão IEEE 802.15.4 [18] para comunicação sem fios de baixa potência.

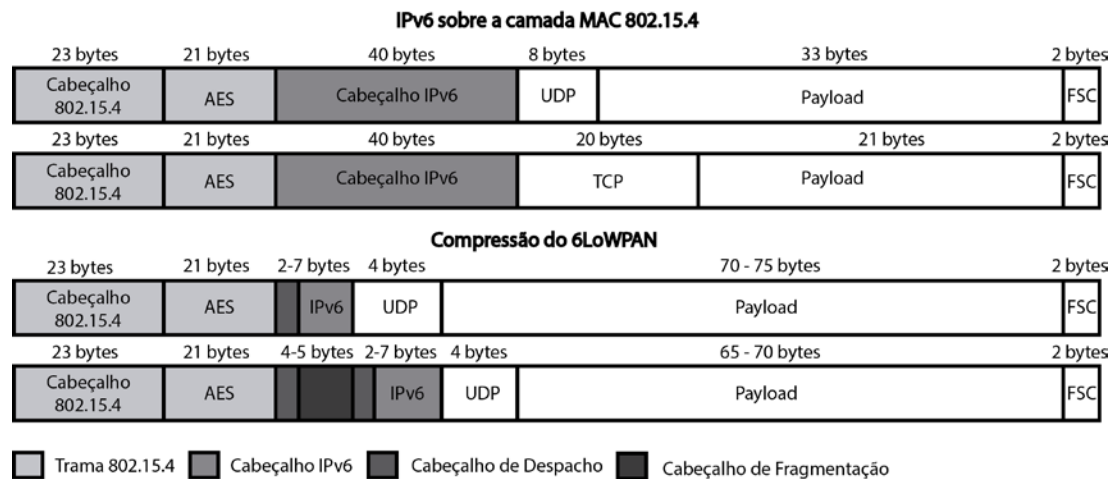


Figura 2-4 - IPv6 e 6LoWPAN *framing* sobre 802.15.4 *standard* (adaptado de [14]).

A Figura 2-4 mostra a diferença entre cabeçalhos normais IPv6 em comparação com o cabeçalho comprimido 6LoWPAN sobre IEEE 802.15.4.

Uma das desvantagens deste padrão parte da limitação no tamanho das tramas a 127 bytes, incluindo um cabeçalho MAC de 23 bytes e um cabeçalho opcional de criptografia AES de 21 bytes. Com um protocolo IPv6 convencional, o *payload* seria reduzido para 33 bytes UDP e 21 bytes com o TCP [1].

A ideia do 6LoWPAN é manter o protocolo IPv6, mas comprimindo o cabeçalho das tramas para diminuir o *overhead* relativamente ao *payload*. Assim *payload* pode variar entre 65 e 75 bytes de dados. Desta forma, a transmissão de uma determinada quantidade de dados demora menos pacotes e, conseqüentemente, consome menos energia. O 6LoWPAN remove a implementação do Transmission Control Protocol (TCP), ou seja, o nó é limitado ao protocolo User Datagram Protocol (UDP) e a camada de aplicação fica responsável pela manipulação de erros.

2.4.2 EnOcean

A EnOcean é uma das mais novas tecnologias em automação residencial, com a vantagem de alimentar-se da energia que ela própria capta. A característica benéfica e única nos nós EnOcean é a sua capacidade para trabalhar sem bateria e ainda conseguir comunicar sem fios.

Os primeiros desenhos de dispositivos EnOcean usavam geradores elétricos piezoelétricos, mas foram mais tarde substituídos por fontes de energia eletromagnéticas [13]. Como todos os dispositivos são autoalimentados, a manutenção é mínima. A interferência de rádio também é mínima, uma vez que atua na banda 868 MHz na UE.

2.4.3 Wavenis

O Wavenis é uma pilha de protocolos para comunicação sem fios desenvolvida pela Coronis Systems para controlo e aplicações de monitorização em vários ambientes, incluindo automação residencial e construção. O Wavenis está a ser promovido e gerido pela Wavenis Open Standard Alliance.

Esta tecnologia atua principalmente nas bandas de 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz, que são bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) disponíveis na Ásia, Europa e/ou Estados Unidos, respetivamente. Alguns produtos também operam na banda de 2,4 GHz. As taxas de transferência mínima e máxima oferecida pelo Wavenis são 4,8 kbps e 100 kbps, respetivamente, sendo o valor médio de 19,2 kbps [1].

A subcamada MAC oferece sistemas sincronizados e não-sincronizados. Numa rede sincronizada, os nós operam com um misto de CSMA (Carrier Sense Multiple Access) e TDMA (Time Division Multiple Access). Neste caso, um nó atribui a si mesmo um intervalo de tempo que é aleatoriamente calculado baseado no seu endereço. Antes da transmissão, o nó executa o CS (Carrier Sense). Se o canal estiver ocupado, o nó calcula um novo intervalo de tempo para a transmissão. Para aplicações em que a fiabilidade é uma exigência crítica, como por exemplo alarmes, o sistema deve ser não-sincronizado, usando CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision

Avoidance). A camada de rede especifica uma árvore hierárquica virtual. A arquitetura do Wavenis é visível na Figura 2-5.

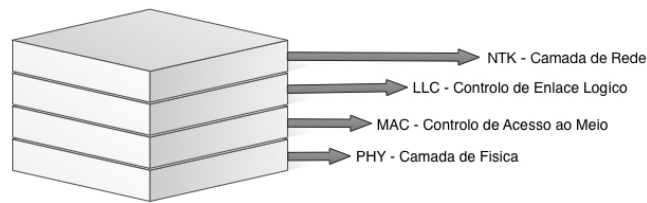


Figura 2-5 - Arquitetura do Wavenis.

2.4.4 ZigBee

O ZigBee é uma tecnologia de área pessoal sem fios baseada na norma IEEE 802.15.4 [18] a nível da camada física e camada MAC. O ZigBee tem como objetivo um baixo consumo de energia de modo a que, ao ser alimentado por baterias, estas tenham uma elevada autonomia. As redes IEEE 802.15.4/ZigBee têm sido utilizadas em diversas áreas de aplicação, como o desporto [24], a agricultura [25], a medicina [26] a automação industrial [27], etc.

O baixo custo de instalação oferecido pela ZigBee ajuda a combater os caros e complexos problemas de arquitetura com sistemas de automação residencial [28].

De modo a satisfazer os requisitos de baixo custo financeiro e energético, o ZigBee é uma tecnologia que utiliza potências de transmissão e taxas de transmissão de dados substancialmente menores do que redes de área local. Isso implica um alcance menor. Contudo, o ZigBee suporta comunicações *multihop* e, assim, consegue aumentar o alcance. O coordenador ZigBee tem a responsabilidade de criação e manutenção da rede. Cada dispositivo eletrónico na habitação pertence a uma rede ZigBee gerida pelo coordenador. O ZigBee suporta uma elevada quantidade de nós na rede, até 65.535 dispositivos por cada coordenador, atingindo um alcance direto máximo com mais de 10 metros. Este protocolo pode operar em diferentes bandas de frequência: a banda dos 2.4 GHz que, com 16 canais, do 11 ao 26, separados por 5 MHz, pode obter taxas

de transmissão até 250 kbps; a banda dos 915 MHz que, com 10 canais, do 1 ao 10, pode obter taxas de transmissão na ordem dos 40 kbps; e 868 MHz, no canal 0.

O ZigBee define três tipos de nós: coordenador (ZC), encaminhador ou *router* (ZR) e *end device* (ZED). O ZigBee admite diferentes tipos de topologia [29]. Na Figura 2-6 é visível a topologia em estrela. Esta tem um nó central (coordenador) que está ligado a todos os outros nós da rede, e todas as mensagens passam pelo nó central.

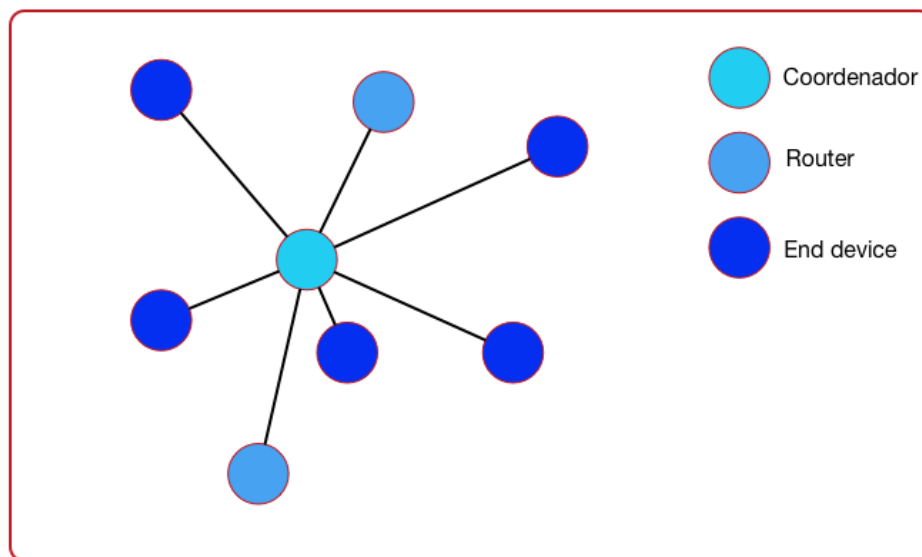


Figura 2-6 - Topologia em estrela.

Na topologia em árvore, o nó superior é o coordenador, e para enviar uma mensagem é necessário percorrer a árvore até ao topo e, em seguida, descer. Tem como desvantagem a inexistência de uma rota alternativa caso a ligação necessária falhe, como é possível observar na Figura 2-7.

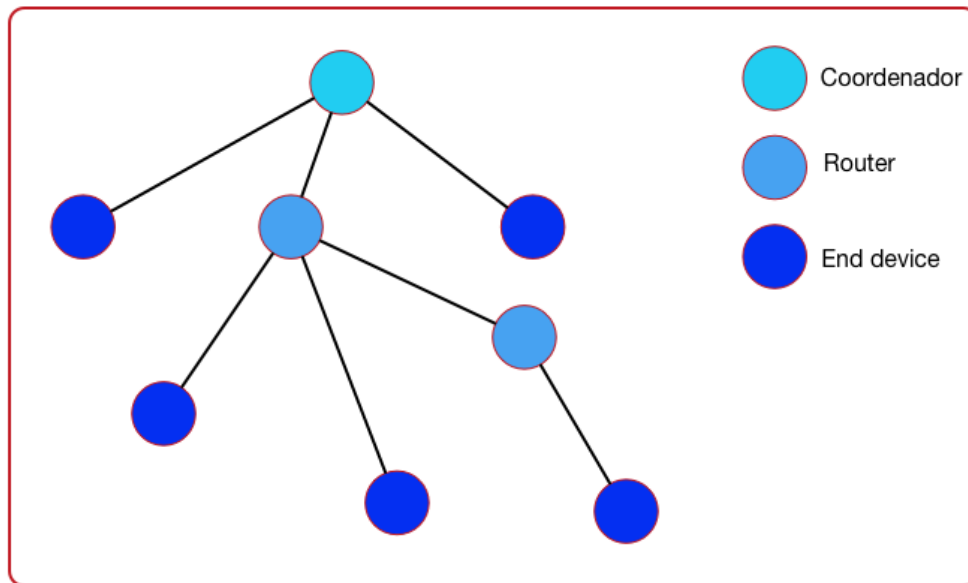


Figura 2-7 - Topologia em árvore.

Na topologia em malha (*mesh*) os *routers* comunicam entre si, existindo assim rotas alternativas. A ligação entre os *routers* é o que diferencia esta tipologia e a topologia em árvore. Na Figura 2-8 é apresentado um exemplo da topologia em malha.

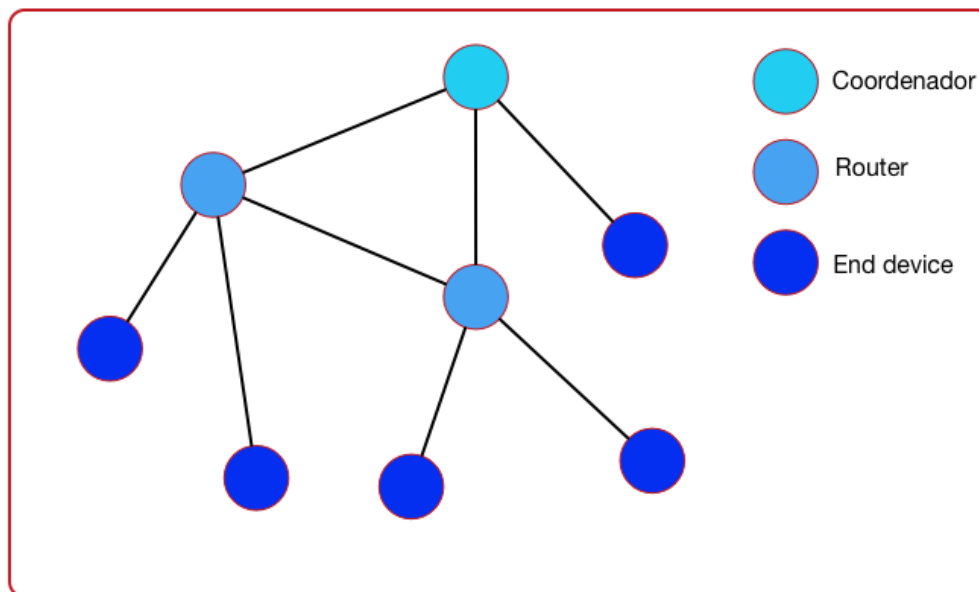


Figura 2-8 - Topologia em malha.

O ZigBee assenta sobre a norma IEEE 802.15.4. Na Figura 2-9 é visível a arquitetura da pilha protocolar ZigBee.

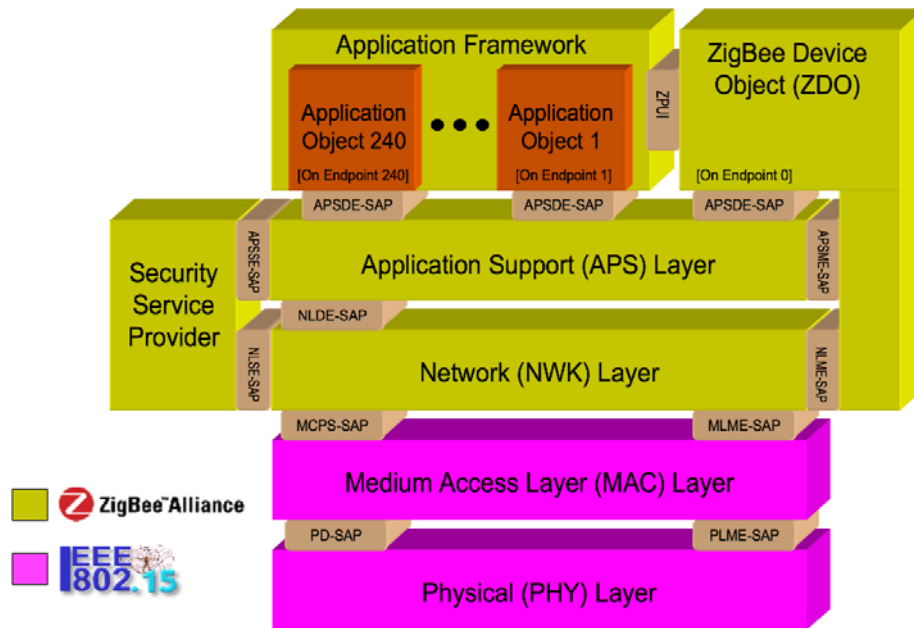


Figura 2-9 - Arquitetura de pilha protocolar ZigBee [15].

A camada de rede (NWK) é responsável pela configuração dos dispositivos, e é aqui que são implementados os mecanismos de descoberta de rotas e encaminhamento da informação. Esta camada tem como funções:

- Encontrar novos dispositivos que possam integrar-se na rede;
- Monitorização dos dispositivos da rede;
- Armazenar informações relativas aos dispositivos;
- Atribuir endereços, caso seja o coordenador.

Esta camada é responsável por fornecer serviços que permitam o correto funcionamento da camada de controlo de acesso ao meio (MAC) do 802.15.4, e, da mesma forma, serviços adequados para a interface com a camada de aplicação. Para esta camada existem duas entidades, o serviço de dados e o serviço de gestão.

O NLME (Network Layer Management Entity) é o serviço de gestão que, através do seu ponto de acesso ao serviço (SAP – Service Access Point) fornece serviços responsáveis por criar recursos que permitam à aplicação interagir com a pilha protocolar. O NLME tem ainda outros serviços disponíveis como:

- Configuração de novos dispositivos;

- Criação de uma rede;
- Juncão ou abandono a uma rede;
- Endereçamento;
- Descobrir vizinhos;
- Descobrir rotas.

A NLDE (Network Layer Data Entity) é a entidade que fornece o serviço de transmissão de dados através do seu SAP, e está capacitada a fornecer serviços como:

- Criação de NPDUs (Network Protocol Data Units);
- Topologia específica de roteamento;
- Segurança.

A camada de aplicação ZigBee consiste na subcamada Application Support (APS), no ZigBee Device Object (ZDO) e nos objetos de aplicação definidos pelo fabricante na Application Framework (AF).

As responsabilidades da subcamada Application Support (APS) incluem a manutenção de tabelas para efetuar o *binding*, que é a capacidade de combinar dois dispositivos baseados nos seus serviços e necessidades, e o encaminhamento de mensagens entre os dispositivos ligados. Existem dois tipos de mensagem: Key-Value Pair (KVP), onde cada nó conhece o endereço do nó destino; e Message Service Type (MSG), onde é necessário que seja feita e armazenada uma ligação entre dois *end points*. Outra responsabilidade da subcamada APS é a funcionalidade de discovery, que é a capacidade para determinar quais são os outros dispositivos que operam no espaço operacional pessoal de um dispositivo. Isto é realizado com auxílio de duas entidades, o serviço de dados, Application Support Sub-Layer Data Entity (APSDE), e o serviço de gestão, Application Support Sub-Layer Management Entity (APSME).

As responsabilidades do ZigBee Device Object (ZDO) incluem a definição da função do dispositivo dentro da rede (como, por exemplo, coordenador, router ou *end device*), iniciar e/ou responder a pedidos de ligação, e estabelecer uma relação segura entre dispositivos de rede, selecionando um dos métodos de segurança do ZigBee, tais como: chave pública, chave simétrica, entre outros.

A Application Framework (AF) fornece funções que permitem enviar e receber dados. Nesta subcamada o utilizador pode definir até 240 objetos de aplicação, em que cada um é identificado pelo seu *end point*, tornando possível o desenvolvimento e identificação de aplicações no mesmo nó. Na Figura 2-10 são visíveis os formatos das mensagens criadas pelas diferentes camadas da pilha protocolar ZigBee.

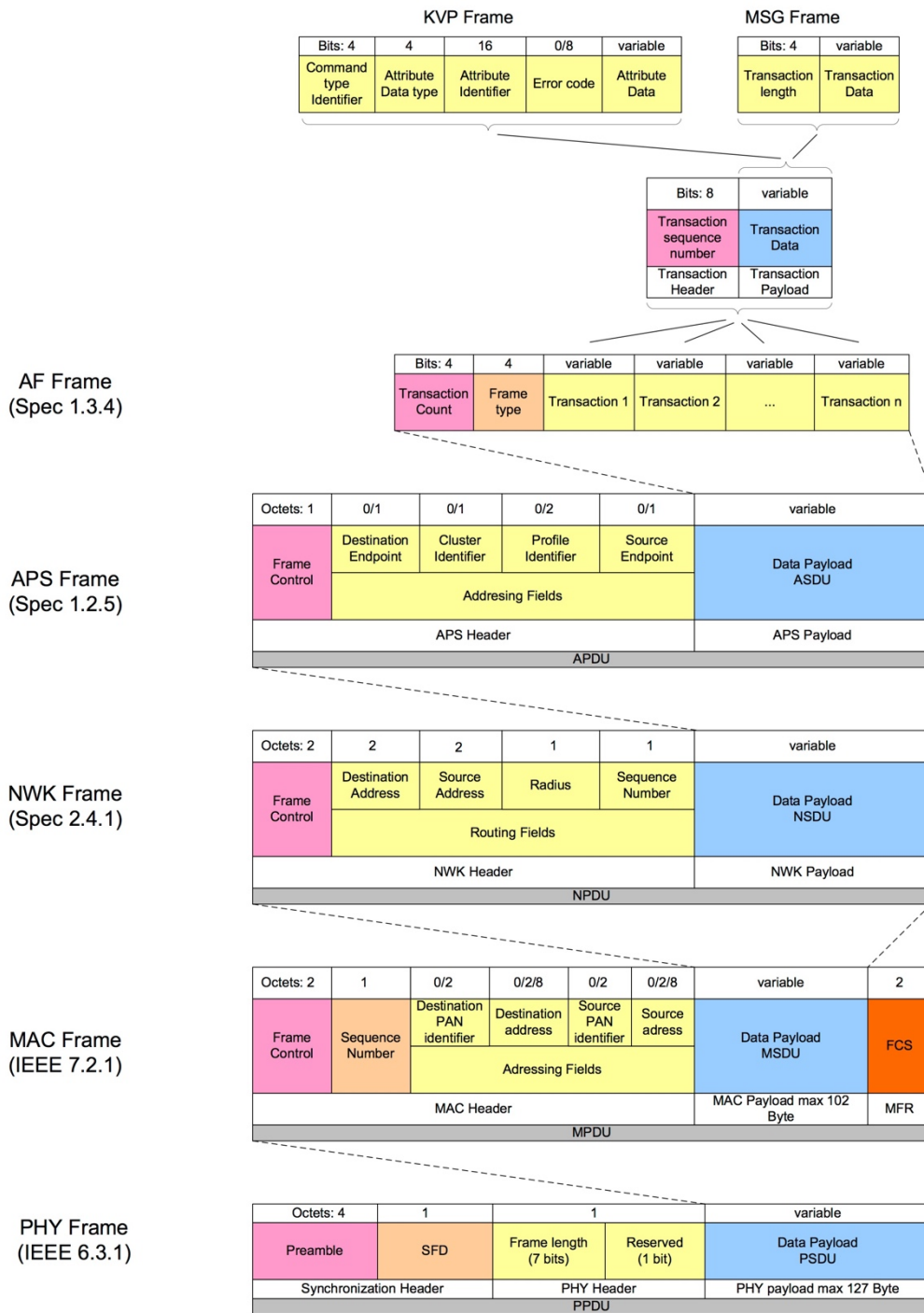


Figura 2-10 - Formatos da mensagens da pilha protocolar ZigBee [16].

2.4.5 Z-Wave

A Z-Wave Alliance foi estabelecida no início de 2005 por um grupo de fabricantes de produtos para controlo de habitação [19]. Esta tecnologia possui uma arquitetura sem fios, desenvolvidos pela Zensys e promovido pela Z-Wave Alliance, para automação em ambientes residenciais e ambientes comerciais. O principal objetivo do Z-Wave é permitir uma transmissão fiável de mensagens curtas a partir de uma unidade de controlo para um ou mais nós na rede [12]. A melhor característica de dispositivos Z-Wave é sua compatibilidade entre diferentes sistemas da marca [19].

Esta oferece boa integridade de rede e estabilidade. É uma das mais antigas tecnologias de automação doméstica dentro das disponíveis. Cada nó Z-Wave tem um ID de rede único e cada rede tem uma identificação única. Esta é uma tecnologia em malha e, portanto, os nós vizinhos podem comunicar diretamente uns com os outros.

A frequência de operação do Z-Wave varia de acordo com a região; a frequência é de 908,42 MHz nos Estados Unidos da América (EUA) e de 868,42 MHz na Europa e recentemente 2.4 GHz num chip específico [23]. As distâncias diretas cobertas pelo Z-Wave aproximam-se dos 30 metros, sendo possível aumentar as mesmas utilizando os nós como repetidores. Este processo pode ser utilizado para estender alcance da rede através de um máximo de 4 nós, pois quando o número de nós ultrapassa 4 o Z-Wave termina a transmissão. Os recentes chips da série Z-Wave 400 são os únicos que suportam a banda de 2,4 GHz, oferecendo taxas de transmissão até 200 kbps [1].

2.5 Comparação de tecnologias

Neste capítulo foi realizado um levantamento das vantagens e desvantagens das soluções apresentadas anteriormente: ZigBee, Z-Wave, INSTEON, Wavenis, 6LoWPAN, EnOcean e X10. Considerando que o ZigBee e 6LoWPAN foram concebidos para fins gerais, as restantes soluções foram desenvolvidas para aplicações específicas. Com o auxílio da Tabela 2-1 pode-se observar algumas das características.

Um dos fatores mais importantes é o consumo de energia destes dispositivos. Como foi mencionado o EnOcean capta energia do ambiente e não requer bateria. A ZigBee Alliance encontra-se a desenvolver uma funcionalidade para que os seus dispositivos funcionem em modo de autoalimentação, não necessitando assim de baterias [12].

O 6LoWPAN e o Wavenis aproximam-se bastante ao ZigBee em termos do consumo de energia, enquanto as outras tecnologias consomem mais energia.

Outro fator importante é a taxa de transferência de dados. Tanto o ZigBee como 6LoWPAN oferecem um máximo de 250 kbps, o que supera as outras tecnologias por uma larga margem. O EnOcean, com 125 kbps, e o Wavenis, com 100 kbps, seguem-se como as tecnologias de maior taxa de transmissão. Após esses, vem o Z-Wave com uma taxa de 40 kbps e o INSTEON com uma taxa de transmissão aproximada de 38.4 kbps. O X10 é a tecnologia com a mais baixa taxa de transferência, cerca de 2 kbps.

Quanto ao alcance da transmissão, o INSTEON e Z-Wave chegam aos 30 metros num único salto. Estes dispositivos atuam como repetidores e podem realizar 4 saltos. Sendo assim, podem ter um alcance máximo de 120 metros. Segue-se o ZigBee com 10 a 100 metros de alcance e com a possibilidade de 6 saltos entre dispositivos, tendo assim um alcance final de 60 metros. O EnOcean tem um alcance aproximadamente 20 metros e não suporta *multihop*.

Tabela 2-1 - Comparação de tecnologias (adaptado de [1], [12], [17]).

	6LoWPAN	Z-Wave	Wavenis	ZigBee	INSTEON	X10	EnOcean
Banda RF	868 / 915 MHz 2.4 GHz	868 / 908 MHz 2.4 GHz Serie 400	433 / 868 / 915 MHz Recentemente 2.4GHz	868 / 915 MHz 2.4GHz	904 MHz	N/A	868 MHz
Alcance (m)	10-100	30	200	10-100	45	30	120
Taxa de Transferência	20 / 40 / 250 kbps	9.6 / 40 kbps 200 kbps Serie 400	4.8 / 100 kbps	20 / 40 / 250 kbps	38.4 kbps	2 kbps	125 kbps
Modo de Comunicação	Radiofrequência	Radiofrequência	Radiofrequência	Radiofrequência	Radiofrequência / <i>Powerline</i>	<i>Powerline</i>	Radiofrequência / <i>Powerline</i>
Encriptação	AES 128	AES 128	AES 128	AES 128	Não contêm	Não contêm	ARC4 / AES
Solução <i>Multihop</i>	RPL	Estrela	Árvore	Malha / Árvore / Estrela	<i>Simulcast</i>	Não contêm	Não contêm
Tamanho da mensagem	127 Bytes	64 Bytes	N/D	127 Bytes	14 / 28 Bytes	N/D	N/D
Máximo de Nós	254	232	N/D	65535	400	N/D	N/D
Modulação	BPSK / O-QPSK	GFSK	GFSK	BPSK / O-QPSK	BPSK / FSK	OOK	FSK

A capacidade de operação *multi-channel* tem um grande peso na escolha de uma destas tecnologias, sendo uma das grandes vantagens do ZigBee. Os seus mecanismos contra interferência nos canais fazem com que um coordenador ZigBee possa formar nova rede, para mudar de canal, caso haja demasiada interferência, ao contrário de outras tecnologias. O INSTEON, o Wavenis, o Z-Wave (exceto o chip série 400), e o x10 operam somente num único canal.

Por o INSTEON usar *simulcast* em vez de encaminhamento, quando um dispositivo intermédio fica indisponível, os dados podem ainda chegar ao seu destino através de caminhos alternativos (caso existam), sem sofrer uma lacuna na conectividade. As outras soluções, que usam encaminhamento, detetam a falha de ligação e encontram um caminho alternativo (se existir). O Route Change Latency (RCL) no Z-Wave é de 1 s, em média, enquanto no ZigBee encontra-se entre 50 e 100 ms [21].

A questão de segurança é um fator importante: o ZigBee e o 6LoWPAN tiram proveito dos serviços de segurança oferecidos pelo IEEE 802.15.4, que utiliza o algoritmo de chave de 128 bits Advanced Encryption Standard (AES). Enquanto isso, o Z-Wave, nas séries 200 e 300, não oferece serviços de segurança. Já o chip série 400 oferece suporte a criptografia AES de 128 bits. O INSTEON oferece vários métodos de criptografia, mas recomenda o uso de criptografia simples. O Wavenis também suporta vários algoritmos de criptografia, incluindo AES de 128 bits.

Quanto à fiabilidade, o Z-Wave e o INSTEON utilizam verificação de 8 bits, enquanto o ZigBee e o 6LoWPAN utilizam uma verificação mais forte, de 16 bits, usada no IEEE 802.15.4. O Wavenis utiliza técnicas de controlo de erro mais avançadas. O INSTEON é personalizável dependendo dos requisitos da aplicação. A sua fiabilidade pode ser negociada de modo a poupar energia e largura de banda.

O X10 é o sistema mais barato entre os considerados, mas a tecnologia está a tornar-se obsoleta. Com as outras tecnologias a baixarem o preço ao longo do tempo, a vantagem de preço vai dissipar-se.

Como é possível ao INSTEON operar em malha e funcionando com repetidores, isso aumenta o alcance de transmissão. A instalação de dispositivos INSTEON é

ligeiramente mais fácil. No entanto, suas principais desvantagens são número limitado de fornecedores e dispositivos certificados disponíveis. O INSTEON é interessante para utilizadores que migram do antigo padrão X10, já que este permite a integração de ambas as tecnologias de RF e de *powerline*.

O EnOcean é o melhor no consumo de energia visto que são dispositivos autoalimentados. No entanto, a sua fiabilidade é baixa e não tem capacidade de funcionar como repetidores. A tecnologia é relativamente nova e tem um futuro promissor dadas as atividades de investigação em curso para melhorar esta tecnologia [12].

A conectividade com a Internet é uma vantagem significativa do 6LoWPAN, já que é intrinsecamente compatível com a mesma. Ligar uma estação base 6LoWPAN à Internet não requer uso de conversão de protocolos [1]. Esta vantagem está a ser estudada pela ZigBee Alliance, que em meados de 2009 anunciou a incorporação de padrões da Internet Engineering Task Force (IETF).

As principais vantagens dos dispositivos Z-Wave são a flexibilidade e a segurança. Características como capacidades de rede de malha, *firmware* atualizável e diagnóstico do dispositivo remoto tornam esta tecnologia interessante. Além disso, o Z-Wave oferece APIs abertas, o que é ideal para desenvolvedores.

O ZigBee tem sido uma tecnologia preferida por muitos, principalmente devido ao facto de ser um padrão aberto. Além disso, ZigBee oferece fiabilidade dos dados e contém bons recursos de criptografia de dados. Tem potencial para prevalecer no mercado que continua em expansão. Existem vários kits de desenvolvimento ZigBee disponíveis no mercado para o desenvolvimento de protótipos e, assim, o ZigBee é ideal para atividades relacionadas com a investigação [12].

Como é possível de concluir, os diferentes protocolos são adequados para diferentes aplicações, e não há uma solução de rede de sensores sem fios que se encaixe perfeitamente em todas as aplicações. Cada tecnologia representa um compromisso entre diferentes fatores como alcance, taxa de transmissão e segurança. A escolha de uma determinada tecnologia depende do onde esta será aplicada.

Contudo, concluiu-se que o ZigBee é considerado o sistema com mais abrangência de aplicações comparativamente aos outros.

2.6 Trabalhos relacionados

O ZigBee está a revelar-se cada vez mais promissor a cada dia, tornando-se alvo de estudo e desenvolvimento em diversas áreas. Esta secção tem o intuito de fornecer uma visão geral de alguns trabalhos efetuados com o uso de redes ZigBee.

2.6.1 HM4All - Health Monitoring for All

Hoje em dia, o mundo enfrenta um desafio constante no sistema de saúde, com o aumento dos custos com cuidados de saúde. Segundo a Organização Mundial de Saúde, os custos de saúde estão atualmente motivados principalmente pela mudança tecnológica, que corresponde de 50 a 75% do crescimento dos custos. Outras causas incluem o envelhecimento da população, que é responsável por aproximadamente 10% do crescimento dos custos [35] [36].

As tecnologias de comunicação emergentes nesta área tendem a ser projetadas especificamente para ter baixo custo e baixo consumo de energia, sendo exemplos o IEEE 802.15.4 e o ZigBee. Estas têm o potencial de proporcionar alta qualidade de atendimento ao paciente sem aumentar consideravelmente os custos.

Neste sentido, o HM4All, Health Monitoring for All é um sistema baseado em ZigBee para monitorização simultânea de vários pacientes em ambiente clínico que foi desenvolvido para superar algumas das deficiências de sistemas de monitorização de pacientes existentes, como a complexidade e os altos custos.

Na Figura 2-11 é possível observar o funcionamento deste sistema, onde, com o auxílio de dispositivos *wearable*, a informação recolhida dos pacientes percorre os routers e coordenadores, sendo depois enviada pela Internet para armazenamento num servidor, ficando assim disponível para análise por prestadores de cuidados de saúde.

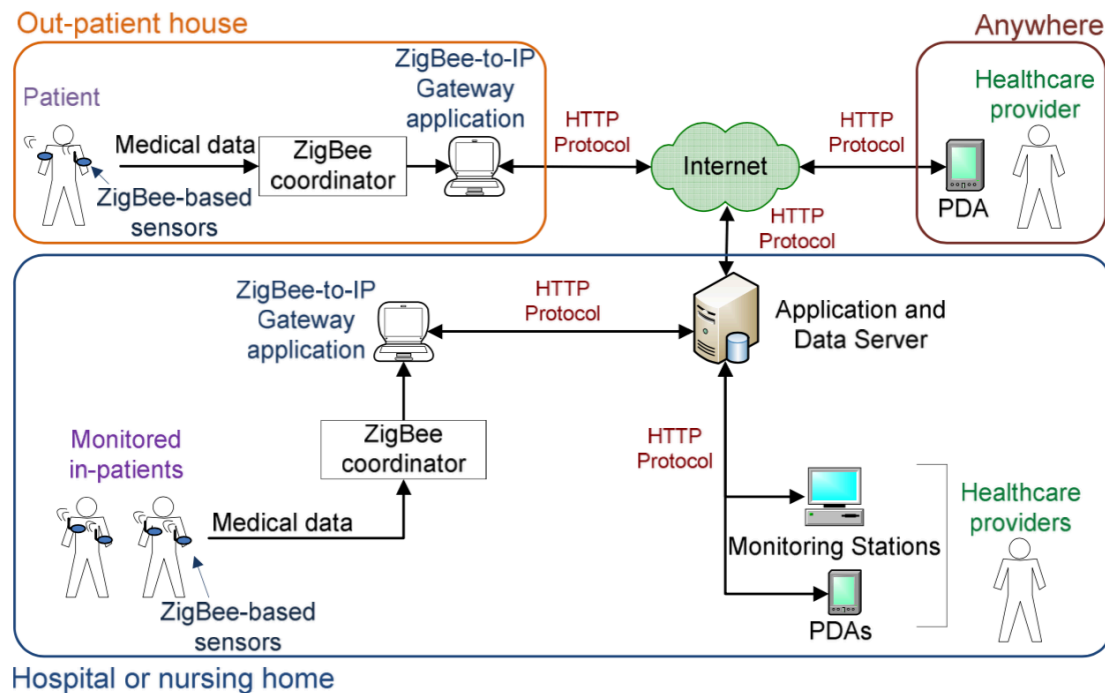


Figura 2-11 - Diagrama HM4All [37].

Este sistema foi implementado e testado num cenário hospitalar real, a partir do qual foi possível obter informações relevantes sobre o desempenho da rede de comunicação sem fios em ambiente hospitalar [37].

2.6.2 Comunicação ad hoc com ZigBee

No Instituto de Sistemas e Robótica de Coimbra foram desenvolvidos robôs móveis com módulos que utilizam a tecnologia ZigBee como protocolo de rede, possibilitando a comunicação entre os robôs. O objetivo deste trabalho consiste em implementar a comunicação *ad hoc* sem fios entre membros de uma equipa de robôs, utilizando a tecnologia ZigBee.

Este projeto proporciona uma ferramenta útil de investigação, nomeadamente em *swarm robotics*, patrulhamento, busca e salvamento, entre outros [38]. Neste trabalho foram comparadas tecnologias como Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee, onde a capacidade do ZigBee para formar redes usando a topologia em árvore aumenta a cobertura da rede *ad hoc* de forma significativa, tornando-a uma escolha mais adequada para a aplicação.

Nos testes de desempenho da comunicação foi medido o Received signal strength indication (RSSI) (...) das mensagens recebidas pelos companheiros, estimando a distância aos mesmos. Utilizando a estimação da distância, procedeu-se à estimação da posição do robô.

2.6.3 Body Sensor Networks

Uma rede de sensores corporal (BSN - Body Sensor Network) consiste num grupo de dispositivos com comunicação sem fios distribuídos pelo corpo humano. BSNs podem ser utilizadas para monitorizar vários sinais fisiológicos, como o eletroencefalograma (EEG), eletrocardiograma (ECG), a temperatura, a pressão arterial, eletromiograma (EMG) e oximetria.

A monitorização baseada em BSNs pode proporcionar benefícios no diagnóstico e tratamento de pacientes sem restringir as suas atividades normais. Ela permite que o paciente se mova livremente, dentro ou fora do ambiente hospitalar, proporcionando a monitorização contínua. Esta pode ser muito útil quando é requerido um longo período de monitorização, como por exemplo, doenças cardíacas, picos transitórios na pressão sanguínea ou arritmias.

Este trabalho apresentou uma análise de desempenho experimental do ZigBee e do IEEE 802.15.4 para aplicações BSN, com particular ênfase para as condições de carga de tráfego elevado. Os resultados confirmam a importância do mecanismo de reconhecimento para a fiabilidade do sistema e, no geral, o desempenho da topologia em estrela ZigBee foi boa, mesmo nas piores condições testadas [39].

3. Desenvolvimento do sistema

Este capítulo aborda como é feita a implementação de sistemas de domótica sem fios utilizando uma plataforma de desenvolvimento de redes ZigBee. O *hardware* utilizado é baseado no circuito integrado CC2530, da Texas Instruments. No que concerne ao *software*, foram testadas diferentes versões da pilha protocolar ZigBee disponíveis para esta plataforma de desenvolvimento, com o objetivo de analisar as características de cada versão tendo em vista a sua aplicação no âmbito da domótica sem fios. Primeiramente é feita uma descrição geral dos componentes e plataformas de *hardware* e *software* utilizadas. De seguida aborda-se os procedimentos necessários para a implementação.

3.1 Plataforma de desenvolvimento

A plataforma utilizada para desenvolvimento do projeto é baseada no circuito integrado CC2530, da Texas Instruments, que integra um microcontrolador baseado no 8051 e um *transceiver* compatível com as normas IEEE 802.15.4/ZigBee para a banda de frequências de 2,4 GHz. Este dispositivo oferece vantagens como: baixo ruído, boa relação qualidade/preço e operação de baixa tensão. Além disso, o CC2530 fornece amplo suporte para manipulação de pacotes, *buffers* de dados, criptografia, autenticação, avaliação do estado do canal, e indicação da qualidade da ligação [30].

O *kit* de desenvolvimento CC2530DK inclui *hardware* que oferece uma plataforma básica para desenvolvimento. Os componentes principais deste *kit* podem ser visualizados na Figura 3-1, sendo que os módulos maiores são as placas SmartRF05EB (Evaluation Board) e os mais pequenos são os módulos CC2530EM (Evaluation Module) e o *dongle* USB CC2531.

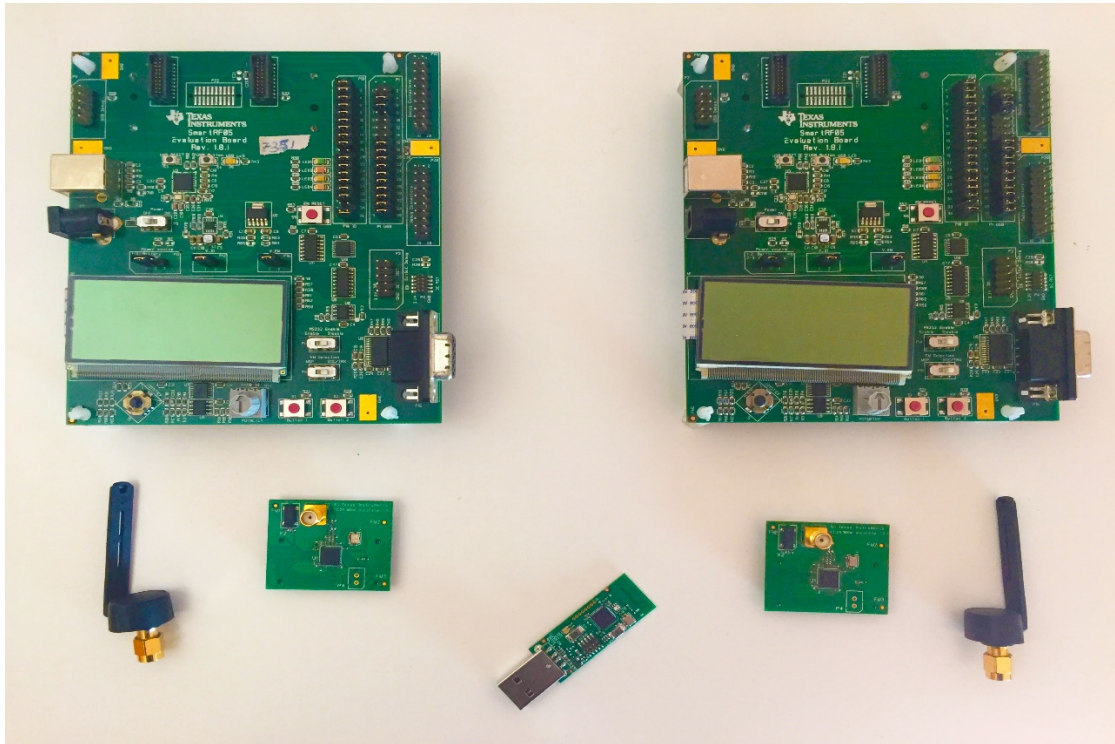


Figura 3-1 - Conteúdo do Kit de desenvolvimento.

Este kit de desenvolvimento é constituído por:

- 2 x SmartRF05EB;
- 2 x CC2530EM;
- 2 x antenas;
- 1 x *dongle* USB CC2531;
- Cabos;
- Baterias;
- Documentos.

3.1.1 SmartRF05EB

A placa SmartRF05EB atua como uma placa de auxílio ao desenvolvimento, com uma vasta gama de interfaces com o utilizador:

- 3x16 LCD;
- Interface USB 2.0;

- UART;
- LEDs;
- Flash Serial;
- Potenciômetro;
- Joystick;
- Botões.

A SmartRF05EB é a plataforma de teste para um EM (Evaluation Module), sendo acoplada ao mesmo pelo uso de 2 conectores. Esta placa também pode ser conectada ao PC via USB para programar e controlar o EM. A Figura 3-2 mostra os principais componentes deste módulo e identifica os principais barramentos de comunicação.

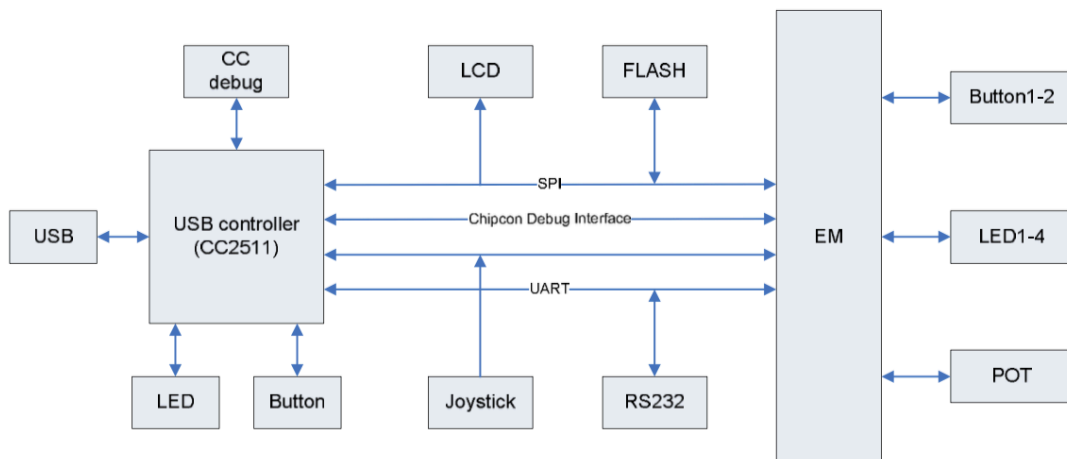


Figura 3-2 - Arquitetura do SmartRF05EB [31].

Um dos principais componentes da placa é o controlador USB. Ele comunica com o PC via USB e traduz os pedidos de várias ferramentas de *software* do PC. O controlador USB comunica com o CC2530EM utilizando SPI, UART e/ou uma interface de depuração.

É possível notar que nem todos os periféricos na placa são acessíveis a partir do controlador USB. Este tem acesso ao UART (interface RS232), LCD, um LED, joystick e ao botão USB. Já o módulo CC2530EM tem acesso a todos os periféricos da SmartRF05EB: acesso total ao LCD, memória *flash*, quatro LEDs, 2 botões, joystick e interface UART RS232.

Uma vez que muitos dos periféricos podem ser acessados a partir do controlador USB e do CC2530EM, alguns pinos de entrada e saída podem, potencialmente, ser conduzidos por duas fontes diferentes. O *firmware* padrão em execução no controlador USB está preparado para lidar com isso, evitando conflitos. Na Figura 3-3 é possível obter uma visão geral de onde se encontram os componentes da SmartRF05EB Rev. 1.8.1.1.

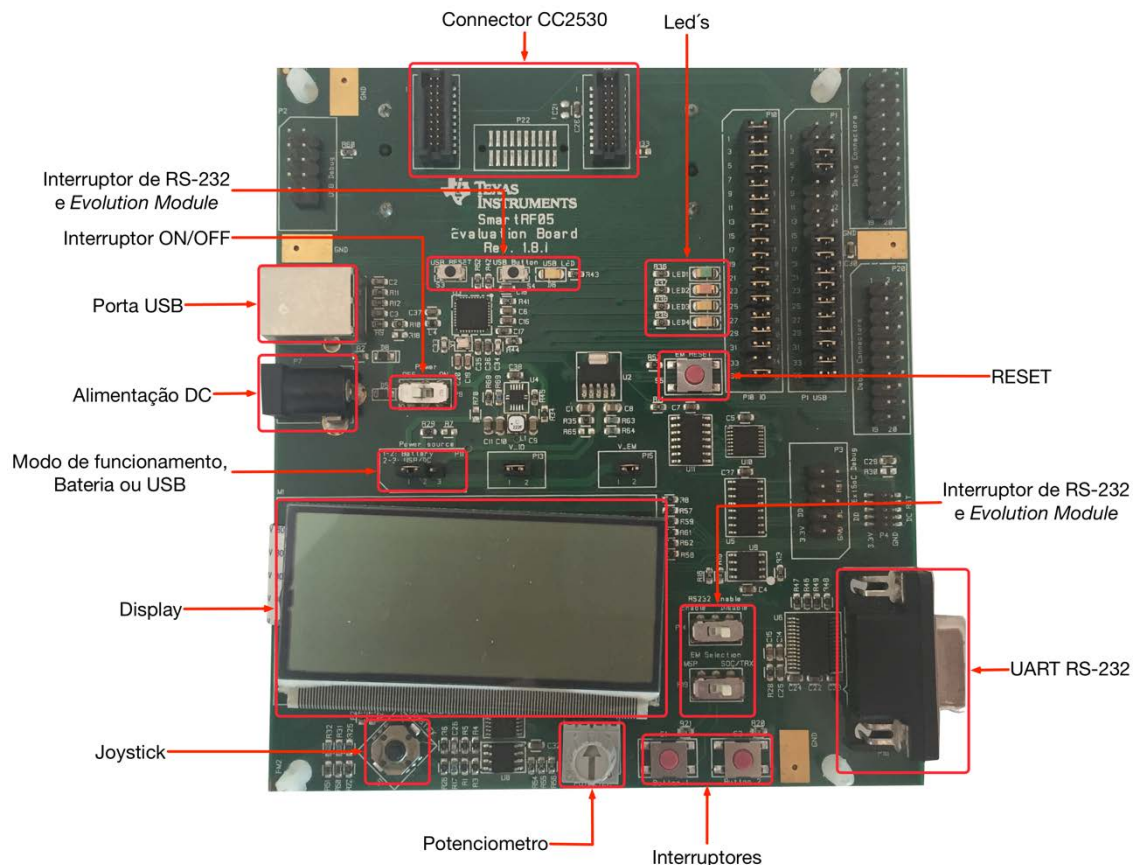


Figura 3-3 - Visão geral da SmartRF05EB Rev. 1.8.1.

3.1.2 CC2530EM

O módulo CC2530EM contém o circuito integrado CC2530, o conector para a antena externa e componentes auxiliares. Este módulo é ligado por cima da SmartRF05EB utilizando dois conectores.

O CC2530EM é uma solução baseada na norma IEEE 802.15.4 que permite construir com um custo relativamente baixo infraestruturas de rede de grandes

dimensões. O CC2530EM combina um microcontrolador 8051 melhorado, com 8 KB de RAM, entre outras características. O CC2530 está disponível em quatro versões diferentes de memória *flash*: CC2530F32/64/128/256, com 32/64/128/256 KB de memória, respectivamente, sendo que a versão do CC2530 usada no *kit* é a de 256 KB.

O CC2530EM tem vários modos de operação, tornando-se altamente adequado para sistemas onde é necessário o consumo de energia ultrabaixo. A combinação do CC2530EM com a pilha protocolar ZigBee da Texas Instruments, denominada Z-Stack, permite fornecer uma solução robusta e completa ZigBee. Este módulo pode ser observado na Figura 3-4.

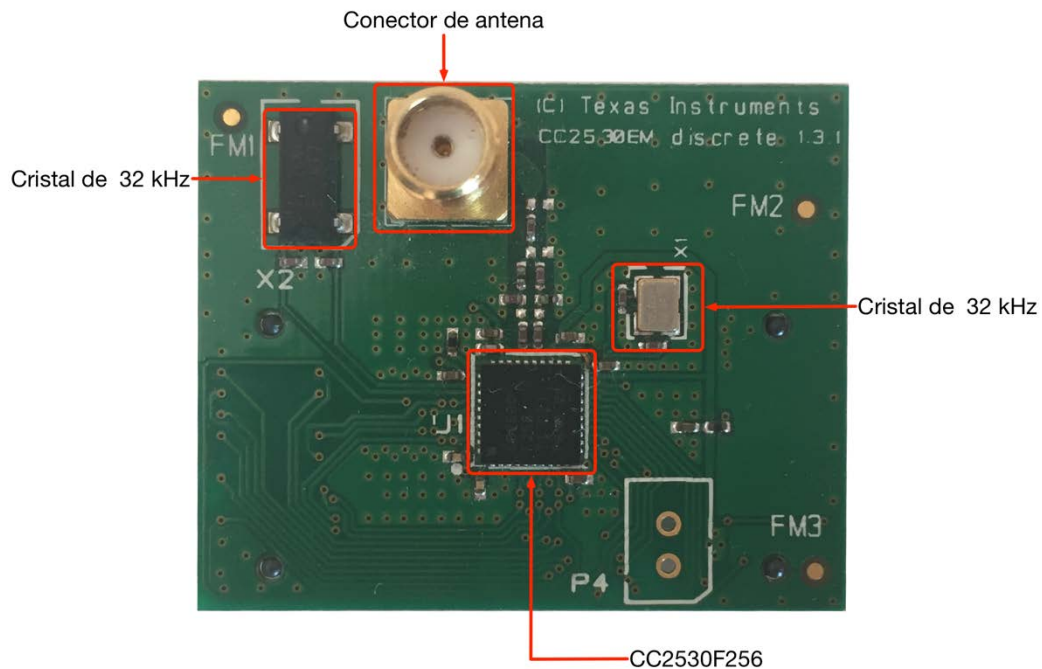


Figura 3-4 - Visão geral do CC2530EM.

O diagrama de blocos do CC2530 é observado na Figura 3-5. Os módulos podem ser divididos em três categorias: CPU e módulos relacionados à memória; módulos relacionados com periféricos, relógios e gerenciamento de energia; e módulos relacionados com rádio.

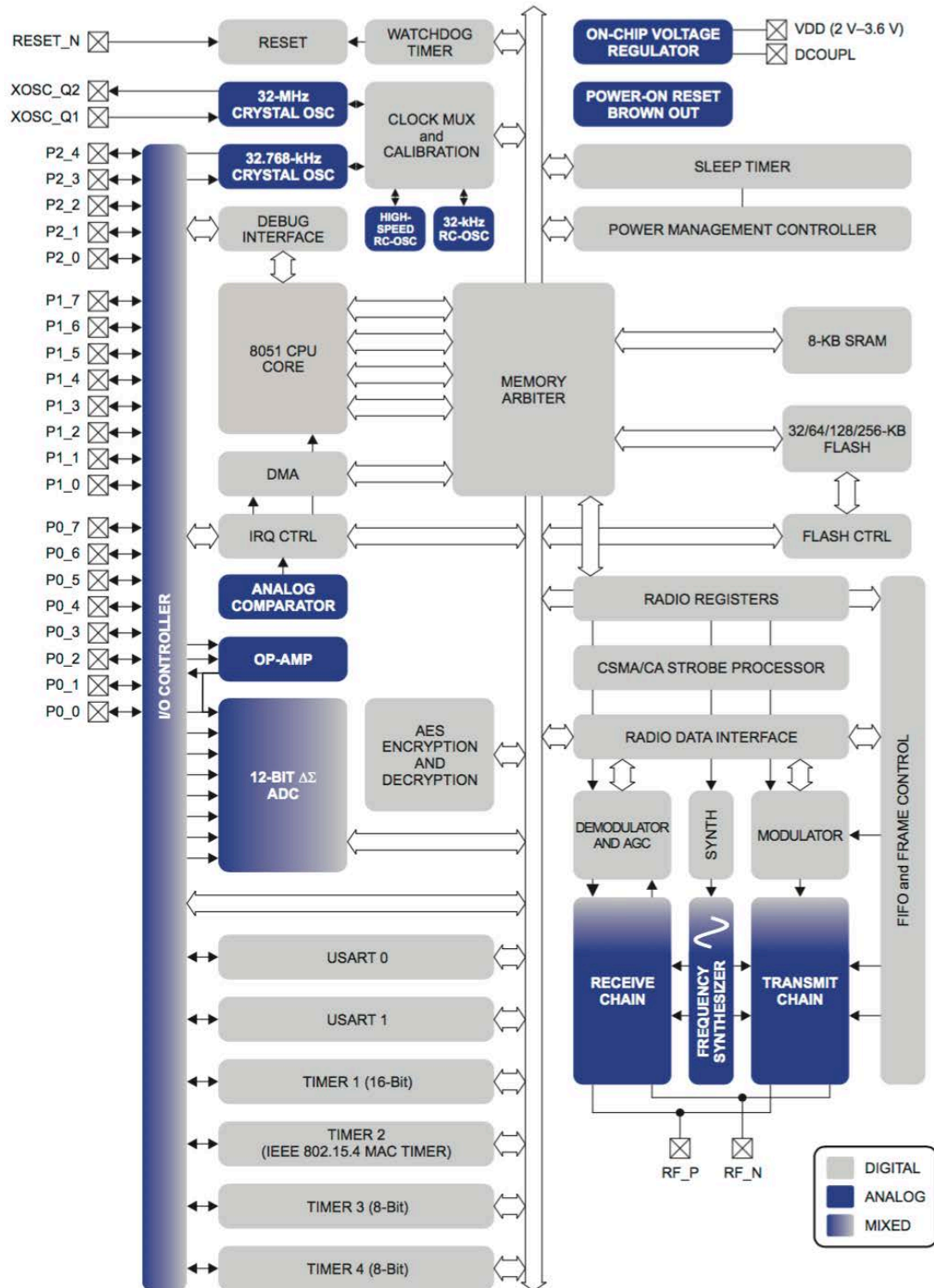


Figura 3-5 - Diagrama de blocos do CC2530EM [31].

3.1.3 CC2531 USB *dongle*

O *dongle* USB que está incluído no *kit* vem programado para que possa ser usado para capturar pacotes transmitidos através do ar. Para usar o *dongle* como um *sniffer*, basta instalar o aplicativo Packet Sniffer, conectar o *dongle* USB e começar a capturar pacotes. A Figura 3-6 identifica alguns dos componentes presentes no *dongle* USB.

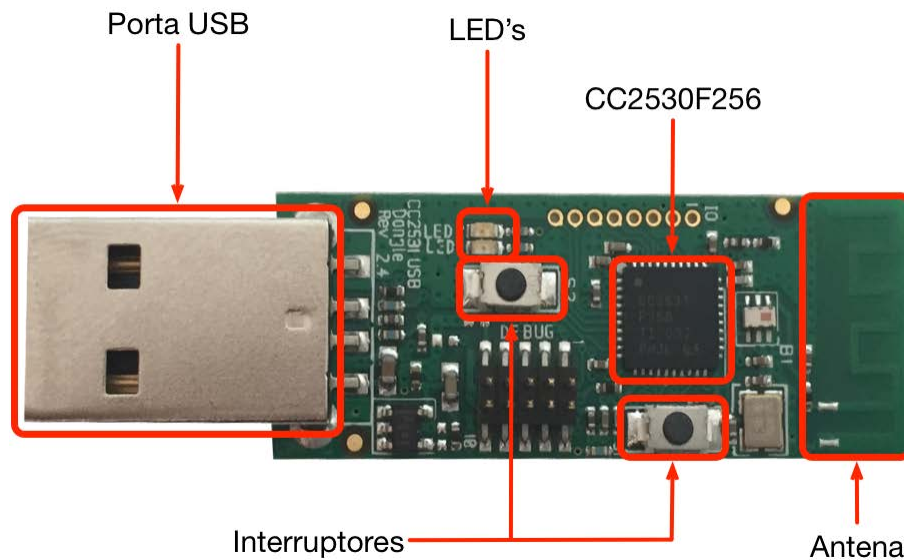


Figura 3-6 - Visão geral do *dongle* USB CC2531.

3.2 *Software* de desenvolvimento

A SmartRF Studio 7 é uma aplicação para PCs utilizada por vários *kits* de desenvolvimento de RF de Texas Instruments. Esta corre numa máquina Windows e usa uma porta USB para se comunicar com uma placa CC2530EM através da SmartRF05EB. Este programa oferece modos fáceis de operar, podendo configurar os registos do CC2530, executar testes de potência de sinal e medir pacotes perdidos.

Para desenvolver *software* e realizar depuração de código no CC2530EM é recomendado o uso de um programa intitulado IAR Embedded Workbench [32]. Este programa suporta a depuração do CC2530EM através da SmartRF05EB, de modo a que nenhum *hardware* adicional seja necessário. Na Figura 3-7 é possível observar-se o ambiente de trabalho do IAR Embedded Workbench.

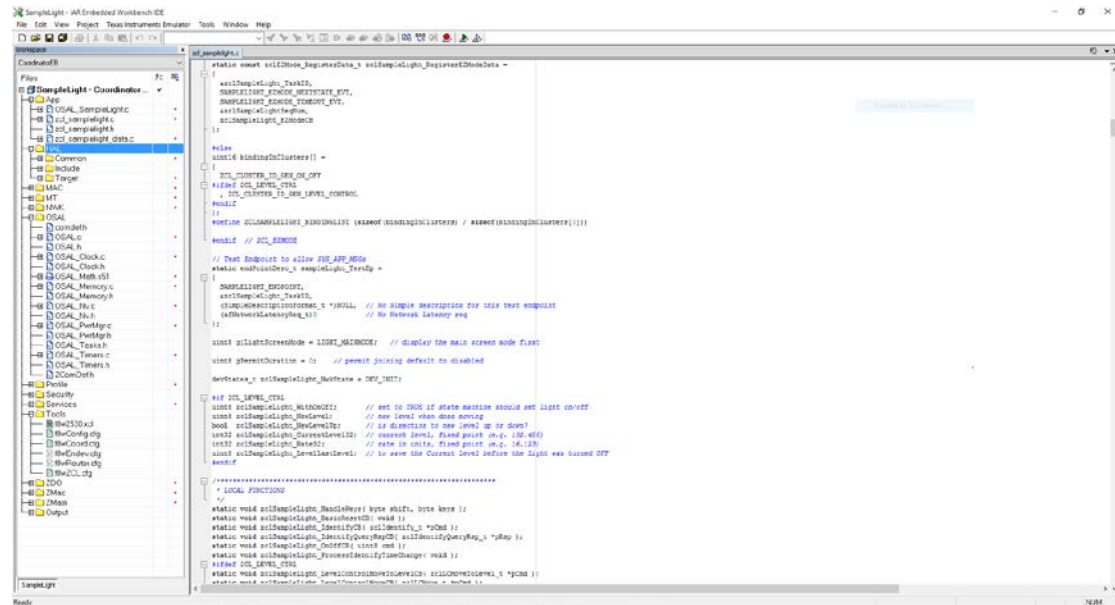


Figura 3-7 - Ambiente de trabalho do *software* IAR Embedded Workbench.

3.3 Z-Stack

A Z-Stack é uma implementação em *software* da pilha ZigBee, destinada a dispositivos baseados nos microcontroladores da família 8051 e MSP430, tendo como base a linguagem de programação C. A Z-Stack define todas as camadas da pilha ZigBee, exceto a camada PHY (Physical Layer) que está implementada ao nível do *hardware*. Para além das camadas da pilha protocolar ZigBee, foi também implementada uma camada HAL (*Hardware Abstraction Layer*) e uma camada OSAL (*Operating System Abstraction Layer*).

A camada HAL disponibiliza um vasto conjunto de funções que simplificam a configuração, utilização e gestão de energia dos periféricos do microcontrolador. Já a camada OSAL é usada para amparar os componentes do *software* Z-Stack durante o processamento. Esta fornece funcionalidades de uma forma independente do ambiente de processamento. As funcionalidades são:

- Registo, inicialização e início de tarefas;
- Troca de mensagens entre tarefas;
- Sincronização de tarefas;

- Tratamento de interrupções;
- Temporizadores;
- Alocação de memória.

Ao longo do tempo saíram novas versões Z-Stack com melhoramentos de API, entre outros, evoluindo até à Z-Stack 2.5. Após esta, o foco incidiu em perfis mais específicos e dedicados por áreas como: *Home Automation*, *Energy*, *Lighting*, *Mesh* e *Linux-Gateway*.

3.3.1 Z-Stack 2.5

A Z-Stack 2.5 foi lançada em 2011 conseguindo renovar as APIs da versão 2.4. O presente projeto foi iniciado com a versão 2.5, utilizando como base uma das aplicação exemplo que esta continha, denominada SampleApp.

A SampleApp envia mensagens periodicamente de um módulo para outro, sendo que o módulo que recebe as mensagens contém um contador que, consoante o número de mensagens recebidas, faz com que um LED acenda de forma intermitente. Isto tudo é ativado pressionando o interruptor SW1.

Na Figura 3-8 são visíveis os *includes* implementados. Existem tipos diferentes de *include*:

- de *hardware*, para se aceder à SmartRF05EB;
- de acesso a ficheiros de configurações como o "SampleApp.h";

```

/*****
 * INCLUDES
 */
#include "OSAL.h"
#include "ZGlobals.h"
#include "AF.h"
#include "aps_groups.h"
#include "ZDApp.h"

#include "SampleApp.h"
#include "SampleAppHw.h"
#include "OnBoard.h"

/* HAL */
#include "hal_lcd.h"
#include "hal_led.h"
#include "hal_key.h"

*****/

```

Figura 3-8 - *Includes* do SampleApp.

Após os *includes* são definidas as variáveis globais e as variáveis locais. As variáveis globais definem *Cluster IDs* para uma mensagem periódica. As variáveis locais são usadas para definir variáveis usadas ao longo da aplicação que podem ser uint8, uint16 e uint32. Em seguida, as funções locais, visíveis na Figura 3-9, declaram as funções que serão usadas com os parâmetros que recebem e devolvem. No caso da Figura 3-9 é visível, por exemplo, a função `SampleApp_SendPeriodicMessage` para envio de mensagens periódicas. Só depois destas declarações é que possível ser implementado o código da aplicação.

```

/*****
 * LOCAL FUNCTIONS
 */
void SampleApp_HandleKeys( uint8 shift, uint8 keys );
void SampleApp_MessageMSGCB( afIncomingMSGPacket_t *pckt );
void SampleApp_SendPeriodicMessage( void );
void SampleApp_SendFlashMessage( uint16 flashTime );

*****/

```

Figura 3-9 - Funções locais da SampleApp.

Para melhor entendimento desta programação foi iniciado um exercício. O objetivo foi a execução de procedimentos necessários para implementar uma rede de

sensores sem fios baseada na norma ZigBee. Um dispositivo terminal da rede (*end device*) efetua a recolha de dados de um sensor e encaminha através da rede sem fios até a uma estação base (coordenador ZigBee). Esta, por sua vez, encaminha os valores recebidos para um PC através da porta RS-232, para que sejam apresentados ao utilizador. Como base de desenvolvimento deste exercício foi utilizada a aplicação SampleApp e dois dispositivos (compostos pelas placas SmartRF05EB e CC2530EM, conforme mencionado na secção 3.1. As funções dos dispositivos foram:

- **Coordenador ZigBee:** Implementar a receção dos pacotes vindos do *end device*, extrair as leituras, apresentá-las no LCD da SmartRF05EB e enviá-las através da porta RS-232 para um PC.
- **End device:** Implementar periodicamente a leitura de valores de um sensor analógico, efetuando a conversão analógico-digital, e enviar os pacotes de dados através do ar até ao coordenador. O potenciómetro disponível na SmartRF05EB, que disponibiliza uma tensão ajustável, executa o papel de sensor. A leitura deste é efetuada a cada 2 segundos.

3.3.1.1 Coordenador

Aqui são descritas as alterações efetuadas na aplicação do coordenador, no ficheiro SampleApp_Coord.c.

- 1) Configuração da comunicação via UART. Foi necessário realizar *include* da porta UART e de um conversor RS-232 para USB. De seguida, configurou-se os parâmetros de comunicação da porta, que devem estar idênticos no PC uma vez que só assim os dados chegam corretamente ao PC. Foi também necessário definir a função de callback da UART e, por fim, inserir a função no código.
- 2) Sempre que um pacote é recebido, existe uma função, SampleApp_MessageMSGCB, que é executada. Esta contém vários parâmetros dos quais só interessaria a sequência do pacote recebido, os valores que foram recebidos do sensor e o endereço de quem enviou o pacote.

Para imprimir os valores no LCD foi necessária a função `HalLcdWriteStringValue`. Esta função contém 3 parâmetros: texto, variável a apresentar e a linha em que é para imprimir.

- 3) Para enviar a informação pela UART é necessária a função `HalUARTWrite`, que envia uma trama pela porta série para que o computador receba.
- 4) Na aplicação `SampleApp` original, todos os dispositivos enviam pacotes periódicos. Contudo, o objetivo pretendido era que o envio de dados fosse somente efetuado pelo *end device*. Assim, é necessário desabilitar o envio por parte do coordenador sendo a melhor forma retirar o timer `osal_start_timerEx` da callback `ZDO_STATE_CHANGE`.

3.3.1.2 End Device

A seguir descrevem-se as alterações que devem ser efetuadas na aplicação do *end device*, no ficheiro `SampleApp_ED.c`.

- 1) O primeiro passo consiste em configurar o temporizador para leitura periódica das amostras. Como supracitado, esta aplicação já contém um timer de envio de mensagens. Contudo o que se pretende é um envio a cada 2 segundos e, para isso, é necessário alterar o valor configurado num *define* no ficheiro `SampleApp.h`. Este valor é apresentado em milissegundos.
- 2) Para que a leitura do potenciômetro seja realizada é necessário descobrir onde este se encontra ligado na SmartRF05EB e saber que canal do ADC (Analog-to-Digital Converter) deve ser utilizado para a leitura. Com ajuda do documento `CC2530 Development Kit User's Guide` obteve-se:
 - Potenciômetro ligado a `IO_POT_R`;
 - `IO_POT_R` ligado a `EM_POT_R`;
 - `EM_POT_R` ligado ao pino 17 do conector P5;
 - Pino 17 do conector P1 corresponde a P0.7.

Assim conclui-se que deve ser utilizado o canal 7 do ADC.

- 3) A função `SampleApp_SendPeriodicMessage` (void) é sempre chamada quando o temporizador expira os 2 segundos. Assim, dentro desta usa-se a função `HalAdcRead`, que retorna os valores do ADC para que seja necessário guardar numa variável para nosso uso. Para que se possa utilizar esta função, é necessário fazer um *include* da `hal.adc.h`. Estes dados foram guardados num *buffer* de 3 bytes, sendo que o primeiro guarda o número de sequência do pacote e nos outros 2 bytes é enviado o valor da leitura do ADC.
- 4) No código encontra-se um comando `AF_DataRequest`. Este é responsável pelo envio dos pacotes para o coordenador. Assim foi necessário realizar alterações de modo a que o *buffer* criado com valores do ADC seja enviado. Para ser mais visível ao utilizador que o pacote está a ser enviado, é possível, com a função `HalLedSet`, fazer com que um LED da SmartRF05EB pisque ou troque de estado quando um pacote é enviado.
- 5) Na `SampleApp` os pacotes periódicos são enviados para todos os endereços - envio modo broadcast. Como só é necessário enviar para o coordenador, e este tem um endereço fixo igual a zero, basta alterar o `SampleApp_Periodic_DstAddr.addr.shortAddr` presente no código para o valor de "0x00" em vez de "0xFFFF".

3.3.2 Z-Stack Home: ZigBee Home Automation Solutions

Zigbee Home é um dos perfis de aplicação pública concebidos para a especificação ZigBee 2012. Este perfil pode ser implementado tanto para utilizadores iniciantes ou profissionais de automação residencial. Esta implementação da TI inclui aplicações exemplo para controlo de luzes, portas e temperatura.

3.3.2.1 Exemplo de um interruptor de luz

Neste exemplo é demonstrado como este sistema pode funcionar como um interruptor de luz numa habitação. Os programas usados são o `SampleSwitch` e o `SampleLight`. Tradicionalmente no ZigBee Home Automation o coordenador/*router* é configurado como luzes enquanto os *end devices* interruptores são configurados como

interruptores. Isto deve-se à necessidade de as luzes requererem uma fonte de alimentação constante e os interruptores poderem ser usados com baterias, pois só são atuados em curtos instantes.

Na Tabela 3-1 observa-se as interações com o utilizador no módulo coordenador e na Tabela 3-2 as interações do *end device*. Quando os módulos são ligados, no display aparece o endereço MAC, assim como também o nome do fabricante e nome do programa.

Tabela 3-1 - Instruções da aplicação SampleLight.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Comuta estado	Troca o estado da luz local
SW2	EZ-Mode	Inicia modo de ligação
SW4	Comuta <i>permit join</i>	Não necessário no uso de <i>EZ-Mode</i>
SW5	Modo de ajuda	Ajuda ao utilizador

Quando o coordenador forma a rede, pressionando em ambos módulos o interruptor SW2 ao mesmo tempo, inicia-se a conexão entre os módulos através do EZ-Mode. Quando esta conexão é concluída, a mensagem “EZMODE: SUCESS” aparece no display.

Tabela 3-2 - Instruções da aplicação SampleSwitch.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Comuta estado	Troca o estado da luz remotamente
SW2	EZ-Mode	Inicia modo de ligação
SW5	Modo de ajuda	Ajuda ao utilizador

Na Figura 3-10 pode-se observar o envio do comando a partir do *end device*, figura do lado esquerdo, para que o coordenador realize um “toggle”, pressionando o botão SW1, e desligue a luz. No lado esquerdo da figura pode-se encontrar informações adicionais, tais como o PAN ID que é “EEEE”, o canal usado na comunicação que é o “11” e por fim o endereço do módulo, que no coordenador por norma é zero.

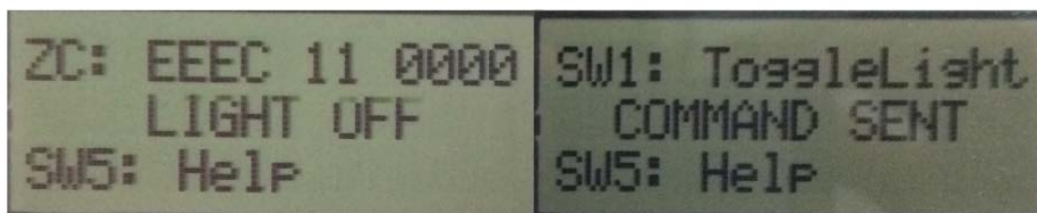


Figura 3-10 - *End device* no lado direito e coordenador no lado esquerdo.

3.3.2.2 Exemplo de uma fechadura eletrônica

Esta aplicação tem como intuito trancar ou destrancar uma porta através de um PIN de 4 dígitos. Na Tabela 3-3 é visível a interação possível com o utilizador no módulo coordenador com a aplicação SampleDoorLock. Na Tabela 3-4 consta a interação no *end device*, que contém o programa SampleDoorLockController.

Tabela 3-3 – Instruções do SampleDoorLock.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Comutação local do estado	Troca o estado da fechadura
SW2	EZ-Mode	Modo de ligação
SW3	Menu PIN	Configurador de PIN
SW4	Comuta <i>permit join</i>	Não necessário no uso de EZ-Mode
SW5	Modo de ajuda	Ajuda ao utilizador

Tabela 3-4 - Instruções SampleDoorLockController.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Comutação remota do estado	Envia remotamente o PIN para abrir ou fechar a fechadura
SW2	EZ-Mode	Modo de ligação
SW3	Menu PIN	Configurador de PIN
SW5	Modo de ajuda	Ajuda ao utilizador

Esta aplicação funciona de modo semelhante à anteriormente mencionada, SampleLight/SampleSwitch. Depois de ligados e pressionando o SW2, o EZ-Mode irá

conectar-se automaticamente. Assim que conectados, a partir do interruptor SW1 é possível enviar comandos para abrir ou fechar a porta.

A principal diferença desta aplicação é que o PIN tem de coincidir para que o comando seja aceite, e assim deve-se configurar o “master PIN” desejado no *SampleDoorLock*, ou seja, no coordenador. O PIN pode ser configurado quando é pressionado o SW3. Em seguida aparece um segundo menu com indicações de como configurar. Essas indicações estão presentes na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 - Instruções de configuração PIN.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Incrementa número	Incrementa o número selecionado
SW3	Decrementa número	Decrementa o número selecionado
SW5	Próximo número / Grava	Passa para próximo número e grava

O menu de configuração do PIN desejado é visível na Figura 3-11. Após serem definidos os 4 dígitos de PIN, automaticamente o programa volta a apresentar o menu principal no ecrã.

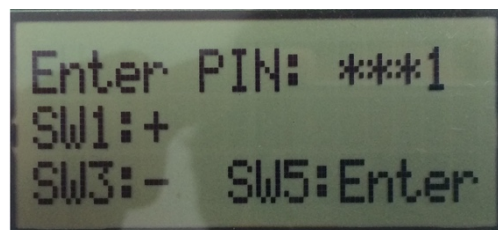


Figura 3-11 - Menu de configuração de PIN.

Caso o PIN não seja igual nos dois lados, aparece uma mensagem no coordenador, como é possível observar na Figura 3-12 do lado esquerdo. Sendo assim, obtém-se uma mensagem de erro no *end device*, como é visível na mesma figura do lado direito.

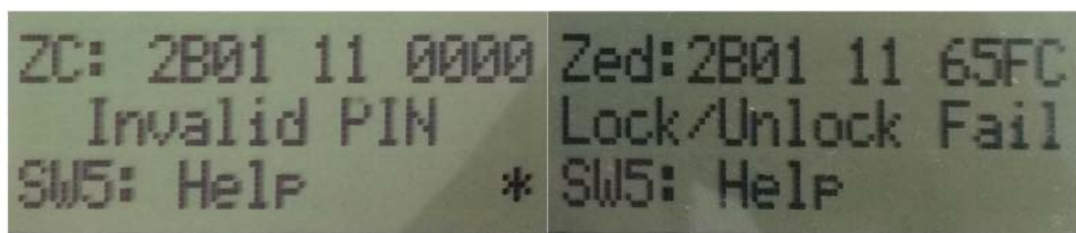


Figura 3-12 - SampleDoorLock no coordenador e SampleDoorLockController no *end device*.

3.3.2.3 Exemplo de controlo de temperatura

A aplicação SampleThermostat é usada para controlo de temperatura. O termostato é um componente que mede a temperatura e, com a definição de uma temperatura, liga ou desliga, por exemplo, um ar condicionado. O SampleThermostat encontra-se no coordenador e serve para ler as temperaturas que para si são enviadas. Na Tabela 3-6 são visíveis as interações.

Um submenu aparece ao carregar-se no SW1 ou SW3 para predefinir os limites de temperatura desejados. Quando gravado, voltamos ao menu principal.

Tabela 3-6 - Instruções do SampleThermostat.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Temperatura predefinida de aquecimento	Temperatura a que o termostato é ativado e liga o aquecimento
SW2	EZ-Mode	Modo de ligação
SW3	Definição de temperatura de arrefecimento	Temperatura a que o termostato é ativado e liga o arrefecimento
SW4	Comuta <i>permit join</i>	Não necessário no uso de EZ-Mode
SW5	Modo de ajuda	Ajuda ao utilizador

Tabela 3-7 - Instruções para definição de limites de temperatura do SampleThermostat.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Incrementa temperatura	Incrementa a temperatura com que o termostato vai ativar
SW3	Decrementa temperatura	Decrementa a temperatura com que o termostato vai ativar
SW5	Gravar	Grava a temperatura

A conexão entre estas aplicações realiza se do mesmo modo, pressionando o SW2 para ativar o EZ-Mode. Assim que conectados, o coordenador, que contém o SampleThermostat, recebe a temperatura do SampleTemperatureSensor a cada 10 segundos.

O LED1 acende para temperaturas acima de 24° C e o LED2 acende para temperaturas abaixo de 20° C por defeito. Estes LEDs simulam saídas, sendo o LED1 a temperatura em que liga o arrefecimento e o LED2 a temperatura em que liga o aquecimento. Estes valores podem ser alterados pelo utilizador com o auxílio da Tabela 3-6. Estes LEDs acendem da mesma forma em outra aplicação, no SampleHeatingCoolingUnit, pois está é uma unidade de controlo que conta com comandos enviados a partir do SampleThermostat, que incluem: ciclo de aquecimento, ciclo de arrefecimento ou sistema desligado. Por omissão, esta unidade está no estado desligado. Na Figura 3-13 pode-se observar dois estados do SampleHeatingCoolingUnit. Esta aplicação é executada por um *router*.

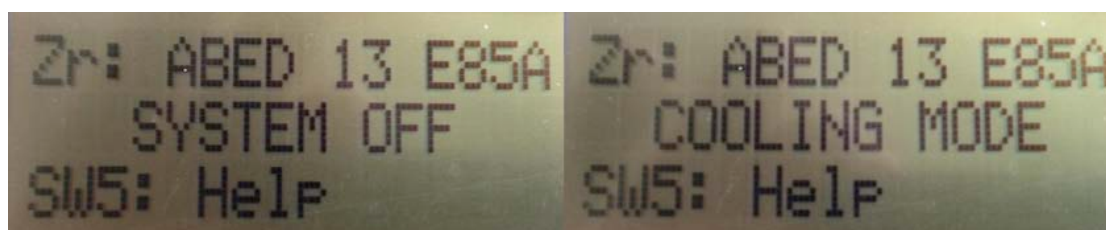


Figura 3-13 - Display SampleHeatingCoolingUnit.

3.3.3 Z-Stack Energy: ZigBee Smart Energy Solutions

Este perfil abrange quatro aplicações exemplo da Z-Stack: GenericApp, SerialApp, e TransmitApp. Cada uma das aplicações da Z-Stack é um ponto de partida para o uso da distribuição TI da pilha protocolar ZigBee, a fim de implementar uma aplicação específica. Cada aplicação exemplo usa o mínimo de subconjuntos de ZDOs (ZigBee Device Objects), interfaces públicas que seriam necessárias para implementar um dispositivo razoavelmente viável em uma rede ZigBee.

Além disso, todas as aplicações exemplo utilizam funcionalidades da API OSAL: comunicação inter e intra-tarefas, que envia e recebe mensagens, definição e recepção de eventos de tarefas, definição e recepção de *timer callbacks*, com uso de memória dinâmica, bem como outros. Estas aplicações também fazem uso das funcionalidades da API HAL, para poder controlar o *hardware*.

3.3.3.1 GenericApp

O GenericApp proporciona um exemplo simples de estrutura de aplicação e de fluxo de mensagem. Esta aplicação envia uma mensagem simples a cada 5 segundos. A mensagem, "Olá Mundo", é enviada pelo ar para outro dispositivo. A mensagem só pode ser vista com um *packet sniffer*.

Esta aplicação não é uma aplicação com grande complexidade, mas pretende ser o ponto de partida para um utilizador construir a sua própria aplicação. Na Tabela 3-8 observa-se a interação com o utilizador, sendo este que escolhe o modo de ligação.

Tabela 3-8 - Instruções do GenericApp.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW2	<i>Hand Binding</i>	Modo de ligação
SW4	<i>Auto Find</i>	Modo de ligação

3.3.3.2 SerialApp

O SerialApp é basicamente uma aplicação que permite a substituição de cabos entre dois dispositivos não ZigBee. Um PC ou outro dispositivo não ZigBee transfere dados por uma porta serial conectada a um dispositivo ZigBee que executa esta aplicação.

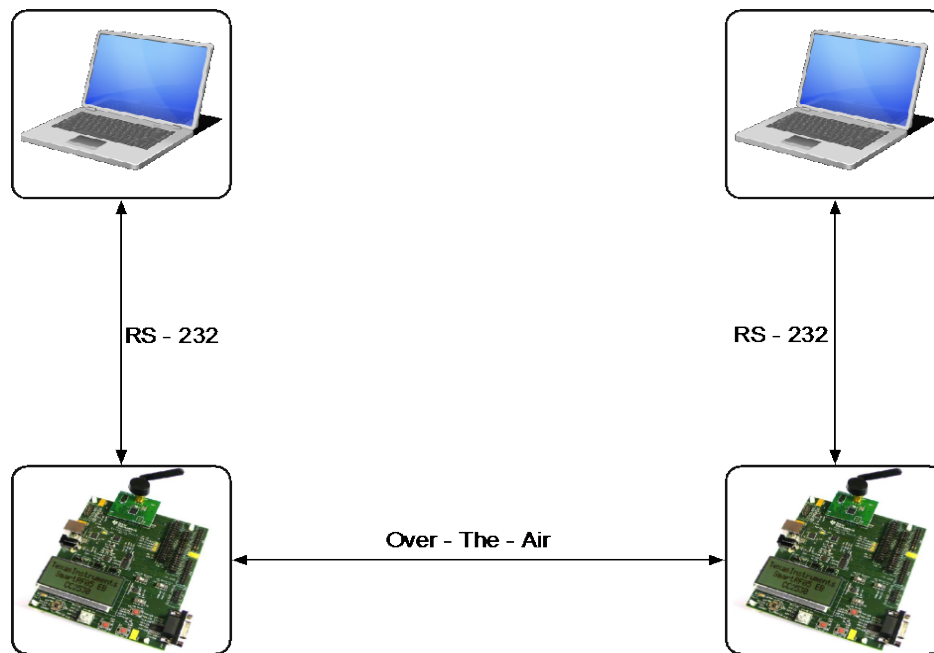


Figura 3-14 - Modo de funcionamento da SerialApp.

Esta aplicação, em seguida, transmite o fluxo de dados da porta série pelo ar. Outro dispositivo ZigBee, também correndo a aplicação SerialApp, recebe o fluxo de dados e transmite-o pela porta série para um segundo dispositivo não ZigBee. A transferência de dados em série é projetada para ser bidirecional, *full-duplex* e com controlo de fluxo por *hardware*. Na Figura 3-14 visível o modo de funcionamento da aplicação SerialApp.

Com o auxílio de um programa Terminal¹, escolhe-se a porta série a usar e as configurações usadas pela aplicação, como o *baud rate* e a paridade, entre outros, para iniciar a comunicação.

3.3.3.3 TransmitApp

A aplicação TransmitApp é usada para demonstrar o rendimento máximo da comunicação sem fios através do envio de pacotes de dados tão rápido quanto a *stack* permita. O aplicativo irá calcular tanto a taxa média de transmissão de dados, em bytes por segundo, como o número total de bytes para ambos os pacotes transmitidos e recebidos. Na Tabela 3-9 pode-se observar as instruções desta aplicação.

Tabela 3-9 - Instruções da TransmitApp.

Botão	Funcionalidade	Descrição
SW1	Comuta transmissão	Troca o estado da transmissão
SW2	<i>Hand Binding</i>	Modo de ligação
SW4	Limpar dados	Limpa os valores da transmissão
SW5	<i>Auto Find</i>	Modo de ligação

Os módulos contêm um display de três linhas, em que nesta aplicação a linha um contém os parâmetros 1 e 2 e na segunda linha os parâmetros 3 e 4. Cada parâmetro informa:

- Parâmetro 1: Média de bytes a ser recebidos por segundo;
- Parâmetro 2: Número total de bytes recebidos;
- Parâmetro 3: Média de bytes a ser transmitidos por segundo;

¹ O Terminal é um software para sistemas Windows comunicarem por porta série. O software encontra-se disponível em: <https://sites.google.com/site/terminalbpp/>

- Parâmetro 4: Número total de bytes transmitidos.

4. Resultados e discussão

Com intuito de avaliar o alcance e fiabilidade de uma rede ZigBee baseada em módulos CC2530EM num ambiente residencial e otimizar a quantidade e localização dos nós na habitação, foram realizados vários testes em ambiente real. Este capítulo descreve o código de teste implementado e os resultados obtidos.

4.1 Código de teste

Para execução de testes de alcance e fiabilidade foi implementado um código que envia tramas de 50 bytes de um *end device* para o coordenador, com o propósito de calcular a taxa de perda de pacotes. Neste teste o coordenador recebe 2000 tramas, a 10 tramas por segundo. Os dados que são processados neste teste focam-se somente no número de sequência da trama e no RSSI do sinal. Na Figura 4-1 é possível observar-se o algoritmo de funcionamento do código para o teste de perdas no coordenador, pois a função do *end device* consiste basicamente em emitir tramas periodicamente.

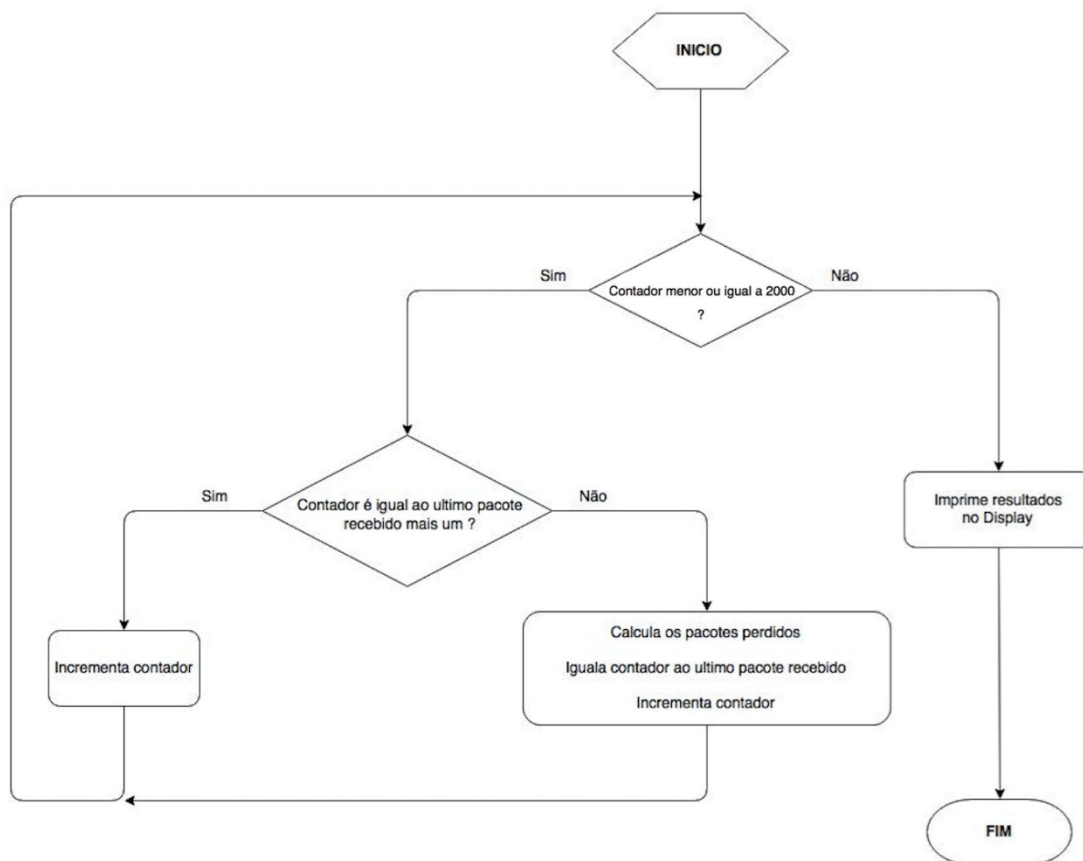


Figura 4-1 - Fluxograma do algoritmo no coordenador.

Uma variável de 16 bits, denominada sn_{16} , é usada no contador, que contém o número de sequência esperado. Assim, quando sn_{16} for igual a 2000 o programa finaliza, imprimindo os resultados no display. O coordenador recebe o número de sequência da trama acabada de chegar nos dois primeiros bytes do *payload*: `cmd.data[0]` e `cmd.data[1]`. Só um byte não chegaria para este teste, pois $2^8 = 256$ e no teste é necessário enviar 2000 tramas. Assim, com o uso de 2 bytes, consegue-se enviar até $2^{16} = 65536$ valores sem que haja *overflow*.

Caso a condição “`cmd.Data[0]x256+cmd.Data[1]==sn16`” seja verdadeira, o algoritmo só incrementa o contador de tramas recebidas, enquanto no caso contrário é calculada a diferença entre estes dois valores, que é acumulada na variável “*packetloss*”. Além disso, o a variável sn_{16} toma o valor do número de sequência atual (`cmd.Data[0]x256+cmd.Data[1]`) e, por fim, o contador é incrementado para que fique com o próximo número de sequência a ser recebido.

Para garantir que o programa funcionaria corretamente, realizou-se um teste onde o *end device*, em vez de enviar uma sequência correta, envia uma sequência de números ímpares. Assim, o coordenador obteve um PER (Packet Error Rate) de 50%, como esperado num bom funcionamento. O mesmo aconteceu quando o envio da sequência foi de três em três, em que o PER foi de 66.66%. O envio das tramas pode ser confirmado com uma aplicação denominada Packet Sniffer e com o *hardware* que acompanha este *software* – um *dongle* USB CC2531. Na Figura 4-2 são visíveis as tramas capturadas que foram enviadas entre os módulos.

P.nbr. RX 39	Time (us) +181326 =5079065	Length 50	Frame control field Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	Sequence number 0x02	Dest. PAN 0x75E4	Dest. Address 0x0000	Source Address 0x4A92	MAC payload 48 00 00 00 92 4A 1E 75 00 14 01 00 08 0F 14 08 07 01 02 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01
P.nbr. RX 40	Time (us) +1984 =5081049	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	Sequence number 0x02	LQI 102	FCS OK		
P.nbr. RX 41	Time (us) +61993 =5143042	Length 50	Frame control field Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	Sequence number 0x03	Dest. PAN 0x75E4	Dest. Address 0x0000	Source Address 0x4A92	MAC payload 48 00 00 00 92 4A 1E 76 00 14 01 00 08 0F 14 09 08 01 ED 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01
P.nbr. RX 42	Time (us) +1984 =5145026	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	Sequence number 0x03	LQI 102	FCS OK		
P.nbr. RX 43	Time (us) +38918 =5183944	Length 50	Frame control field Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	Sequence number 0x04	Dest. PAN 0x75E4	Dest. Address 0x0000	Source Address 0x4A92	MAC payload 48 00 00 00 92 4A 1E 77 00 14 01 00 08 0F 14 0A 09 01 02 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01
P.nbr. RX 44	Time (us) +1984 =5185928	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	Sequence number 0x04	LQI 102	FCS OK		

Figura 4-2 - Tramas capturadas.

Assim é possível confirmar que as tramas enviadas contêm 50 bytes e verificar o seu conteúdo.

4.2 Testes e resultados

O cenário escolhido para realizar os testes de alcance foi uma habitação, que pode ser observada na Figura 4-3. Nesta figura podem-se igualmente verificar os trajetos inicialmente definidos, usando dois módulos: um coordenador e um *end device*.



Figura 4-3 - Disposição dos nós no primeiro esquema de testes.

Os resultados obtidos através do esquema definido na Figura 4-3 podem ser observados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Resultados obtidos no primeiro teste, no canal 11.

Trajeto	Teste	Distância em Metros	Nº Pacotes Perdidos	PER	Média RSSI
1	1	4,2	0	0,0%	-80
	2		0	0,0%	-78
2	1	8,3	289	14,5%	-91
	2		315	15,8%	-92
3	1	7,5	0	0,0%	-62
	2		0	0,0%	-61
4	1	4,1	56	2,8%	-64
	2		75	3,8%	-63
5	1	6,9	731	36,6%	-95
	2		843	42,2%	-93

Este seria é um cenário favorável, uma vez que se usa um módulo por divisão; contudo, existe um excesso de perdas em certos trajetos. Em cada trajeto foi realizado dois testes idênticos. O ZigBee pode comunicar em vários canais de transmissão. O canal em funcionamento neste teste era o canal 11. Como os resultados apresentam

perdas elevadas em alguns trajetos, efetuou-se um estudo para analisar mais profundamente se este era um bom canal para a transmissão. Na Figura 4-4 é visível a comparação de canais entre ZigBee e Wi-Fi. Assim é possível obter uma comparação da localização dos canais entre dois protocolos. Cada canal Wi-Fi tem 22 MHz de espectro e sobrepõe-se sobre vários canais ZigBee.

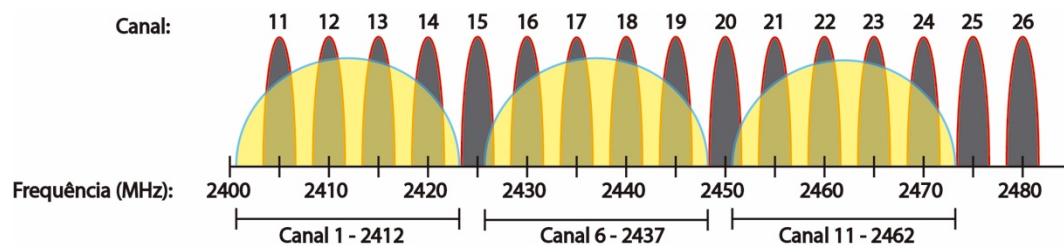


Figura 4-4 - IEEE 802.15.4 (ZigBee) vs IEEE 802.11 (Wi-Fi).

Com ajuda do *software* Wi-Fi Scanner², pode-se concluir que o canal 11 não é o canal mais apropriado para transmitir dados. Na Figura 4-5, verifica-se que existem algumas redes Wi-Fi pela habitação. A rede intitulada MEO é a rede Wi-Fi da habitação e encontra-se a transmitir no canal 1, que se sobrepõe ao canal 11 do ZigBee. O canal em funcionamento do Wi-Fi pode diferir dependendo da configuração do *wireless router*. Este é possível ser alterado ou deixar em modo automático e o *router* escolher qual o mais apropriado. Outras redes presentes usam outros canais de transmissão, mas não com a mesma intensidade, e, assim, não causam interferência tão significativa para os módulos ZigBee.

² O Wi-Fi Scanner é um software que mostra onde se encontram na banda de frequências as redes Wi-Fi. O software encontra-se disponível através em: <http://wifiscanner.com/wifiscanner.html>

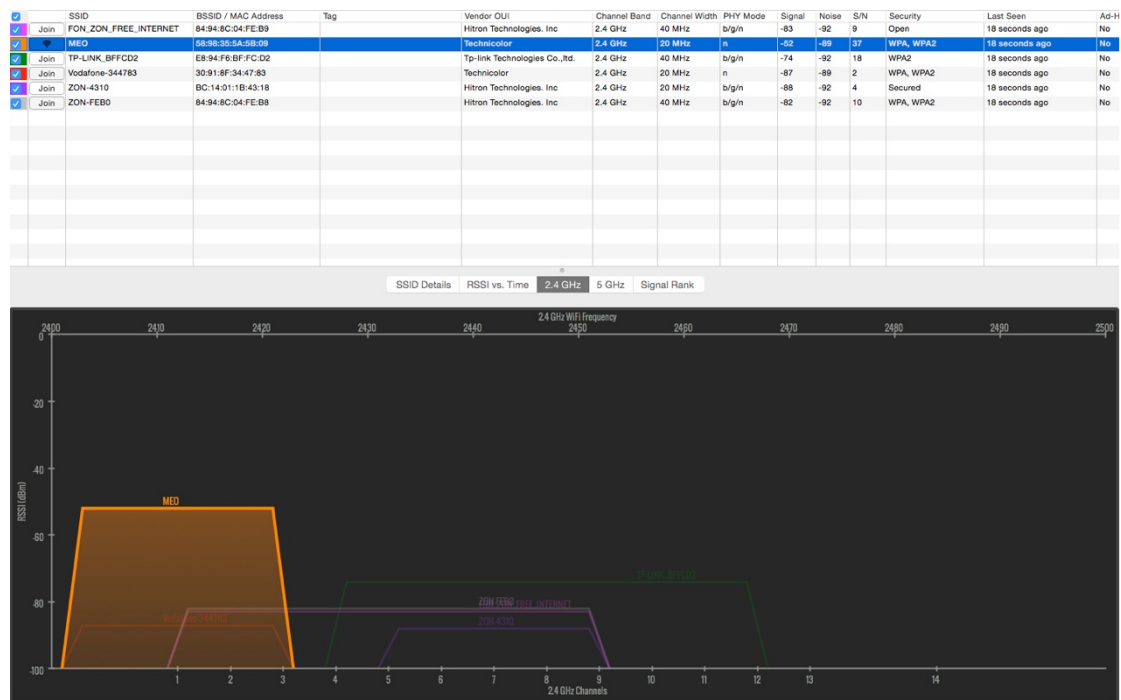


Figura 4-5 - Redes Wi-Fi presentes na habitação.

Outros aparelhos, como o forno de micro-ondas, também podem criar interferência. Com o uso do *software* Chanalyzer da Metageek e do analisador de espectro Wi-Spy 2.4x USB foi possível verificar todas as interferências e em que frequências operam. Na Figura 4-6 é possível observar-se o espectro na habitação na banda de 2.4 GHz durante o funcionamento do forno micro-ondas e da rede Wi-Fi. A janela 1 mostra onde se encontra a rede Wi-Fi, com picos que ultrapassam os 40 dBm, e na janela 2 está presente a interferência do micro-ondas quando se encontra em funcionamento. Neste momento as placas de desenvolvimento não se encontravam a transmitir. O espectro da Figura 4-6 foi recolhido na cozinha, zona do trajeto 5.

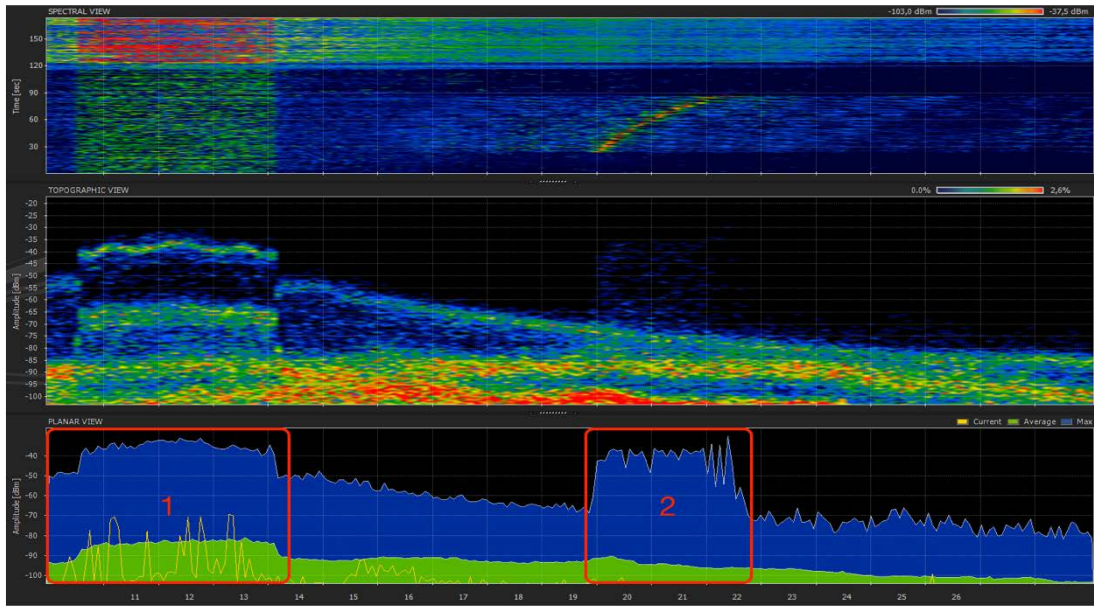


Figura 4-6 - Espectro da banda 2.4 GHz com as fontes de interferência.

Após conhecimento das interferências presentes, foi então escolhido o canal 25 para os testes seguintes. Com o mesmo esquema da Figura 4-3 e com o mesmo código de teste, obtiveram-se os resultados presentes na na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Resultados obtidos no canal 25 com o forno de micro-ondas desligado.

Trajeto	Teste	Distância em Metros	Nº Pacotes Perdidos	PER	Média RSSI
1	1	4,2	0	0,0%	-66
	2		0	0,0%	-68
2	1	8,3	0	0,0%	-71
	2		0	0,0%	-71
3	1	7,5	0	0,0%	-83
	2		0	0,0%	-78
4	1	4,1	0	0,0%	-69
	2		0	0,0%	-71
5	1	6,9	0	0,0%	-80
	2		0	0,0%	-78

É notório que os resultados foram bem mais satisfatórios com a escolha do canal 25. Conseguiu-se transmitir nos trajetos 2 e 5 com PER de 0,0%, onde no teste anterior, o PER obtido era alto. Contudo, neste teste, quando o forno de micro-ondas se encontrava em funcionamento, existiam perdas de pacotes no trajeto 5, conforme indicado na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Resultados obtidos no trajeto 5 com o forno de micro-ondas ligado.

Trajeto	Teste	Distância em Metros	Nº Pacotes Perdidos	PER	Média RSSI
5	1	6,9	11	0,6%	-90
	2		7	0,4%	-88

Sendo assim, mesmo com o ZigBee em funcionamento em frequências diferentes às do forno de micro-ondas, houve perdas de pacotes, devido ao acumular à distância e aos obstáculos no trajeto entre o *end device* e o coordenador.

No ZigBee, na banda de frequências dos 2.4 GHz, ainda existe o canal 26, mais à direita no espectro de frequências. Este canal foi testado nesta situação devido a estar mais distante da interferência produzida pelo forno de micro-ondas. Contudo, os resultados foram semelhantes não sendo necessário repetir o teste a todos os trajetos por não trazer vantagens.

Optou-se por abordar uma nova topologia, adicionando um *router* e dividindo-se o trajeto 5 em duas partes (6 e 4), como é visível na Figura 4-7.



Figura 4-7 - Disposição dos nós no segundo esquema de testes.

Com esta topologia, as perdas criadas pelo micro-ondas deixaram de existir, obtendo-se um PER nulo nos dois testes realizados. Assim, conclui-se que com esta topologia pode-se comunicar em toda a área da habitação sem quaisquer perdas.

A Figura 4-8 apresenta o espectro que se encontra na habitação com todas as fontes RF ativas, estando visível na janela inferior o espectro dos módulos ZigBee usando o canal 25.

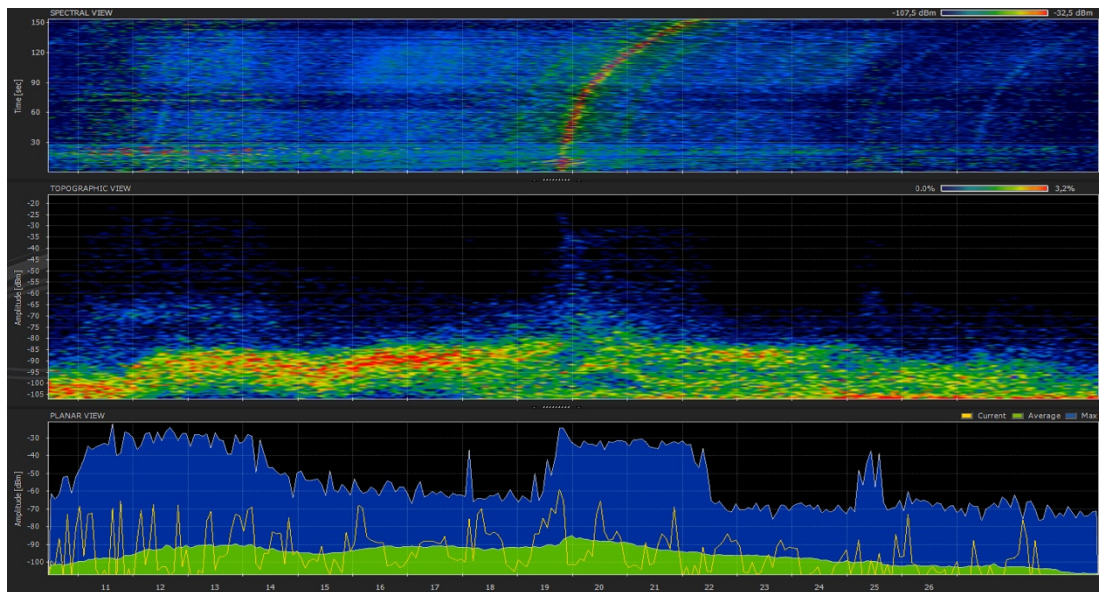


Figura 4-8 - Espectro da banda de 2.4 GHz com todas as fontes de RF ativas.

5. Conclusões

O desenvolvimento de sistemas baseado em redes de sensores sem fios tem vindo a crescer ao longo do tempo devido às necessidades do mercado. Cada vez mais se requerem sistemas que minimizem o consumo energético e que ao mesmo tempo consigam manter a fiabilidade dos dados enviados e recebidos.

Inicialmente foi proposto fazer um estudo do estado da arte do tema de modo a conhecer as diferentes tecnologias, incluindo tecnologias com fios, sem fios e *powerline*, sendo que no total foram analisadas 7 tecnologias. Foi realizado um estudo a nível de características e performance. Foi apresentado como cada tecnologia funciona, vantagens e desvantagens perante o ZigBee. Neste estudo deu para entender que existem outras tecnologias semelhantes e com bastante potencial.

O foco principal desta dissertação visava em apresentar as tecnologias de comunicação presentes no mercado com aplicação no domínio da domótica, comparar, implementar e testar o uso de uma tecnologia que vem crescendo ao longo dos anos, o ZigBee.

Após demonstrar que o ZigBee é uma das tecnologias que melhor se encaixa na área da automação residencial, foram apresentados trabalhos realizados com esta tecnologia.

Ficou claro que a Z-Stack acompanhada pelo ZigBee é bastante completa, e a parte mais fulcral é a facilidade que um simples utilizador pode implementar um sistema destes em sua própria casa. Foi documentado como pode ser realizado a integração numa habitação e executados testes.

Estes testes foram realizados para que um simples utilizador perceba o que poderá levar um sistema ZigBee a ter interferências e como as ultrapassar, como aqui foi realizado.

Como trabalho futuro, propõe-se investigação no sentido de realizar uma casa totalmente automatizada e criar uma habitação capaz de precaver problemas e resolver automaticamente pois, o ZigBee contém muitas capacidades que aqui ainda não foram demonstradas.

Referências

- [1] C. Gomez and J. Paradells, “Wireless Home Automation Networks: A Survey of Architectures and Technologies”, IEEE Communications Magazine, 2010.
- [2] A. Molina, E. G. Lázaro and A. Bonastre, “Application of Wireless Sensor Network to Direct Load Control in Residential Areas”, IEEE International Symposium on, 2007.
- [3] Gill, Khusvinder, Yang, Shuang-Hua, Yao, Fang, Lu, Xin, “A zigbee-based home automation system”, Volume: 55, Issue: 2, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009.
- [4] Electronica PT. (2015) [Online]. Página disponível em: <http://www.electronica-pt.com/content/view/67/>
- [5] Adene, agência para a energia. (2015) [Online]. Página disponível em: http://www.adene.pt/sites/default/files/guiaee_v1310.pdf
- [6] Honeywell. (2015). Smart House. Safe Home. [Online]. Página disponível em: http://homesecurity.honeywell.com/home_security.html.
- [7] Chen AH, Huang SY, Hong PS, Cheng CH, Lin EJ. “HDPS: Heart disease prediction system”, Computing in Cardiology, 2011; 38, pp. 557–560.
- [8] P. Macedo, J. A. Afonso, L. A. Rocha, R. Simões, "A Telerehabilitation System Based on Wireless Motion Capture Sensors", International Conference on Physiological Computing Systems (PhyCS 2014), Lisbon, Portugal, January 2014.
- [9] O. Gama, P. Carvalho, J. A. Afonso, P. M. Mendes, “Quality of Service in Wireless e-Emergency: Main Issues and a Case-study”, 3rd Symposium of Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence, 2009.
- [10] Imamul Arefeen, Abdus Samad and Asadujjaman Nur, “The power line home automation type communication system for voice communication and data transmission using an existing power line”, The 9th International Forum on

-
- Strategic Technology (IFOST), 2014.
- [11] Dange, H.V.; Gondi, V.K., “Powerline Communication Based Home Automation and Electricity Distribution System”, Process Automation, Control and Computing (PACC) International Conference, 2011.
- [12] Chathura Withanage, Rahul Ashok, Chau Yuen and Kevin Otto, “A Comparison of the Popular Home Automation Technologies”, IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technologies, 2014.
- [13] Joern Ploennigs, Uwe Rysse, and Klaus Kabitzsch, “Performance Analysis of the EnOcean Wireless Sensor Network Protocol”, IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010.
- [14] Thomas Gonnot and Jafar Saniie, “User Defined Interactions between Devices on a 6LoWPAN Network for Home Automation”, IEEE International Technology Management Conference, 2014.
- [15] ZigBee Alliance. (2015) [Online]. Página disponível em: <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/05/docs-05-3767-00-0mwg-zigbee-network-layer-technical-overview.pdf>
- [16] Microchip. (2015) [Online]. Página disponível em: <http://www.microchip.com/forums/download.axd?file=0;193947>
- [17] Amol Baviskar, Jaypal Baviskar, Swapnil Wagh, Afshan Mulla, Piyush Dave, “Comparative Study of Communication Technologies for Power Optimized Automation Systems: A Review and Implementation”, Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2015.
- [18] IEEE Std 802.11 2012, “IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”.
- [19] Z-Wave Alliance. (2015) [Online]. Página disponível em: http://z-wavealliance.org/z-wave_alliance_history/.

-
- [20] EnOcean Alliance. (2015) [Online]. Página disponível em: <http://www.enocean-alliance.org/en/home/>.
- [21] M. Knight, "Wireless security - How safe is Z-wave?" *Computing & Control Engineering Journal*, Volume: 17, Issue: 6, 2006.
- [22] Satoshi Kawaguchi, Masanori Kojima, Kunihiro Yamada, "Mutually Complementary Network System between Wired and Wireless Communication for Home Appliances", *The 13th IEEE International Symposium on Consumer Electronics*, 2009.
- [23] Pedro Amaro, Rui Cortesão, Jorge Landeck, Paulo Santos, "Implementing an Advanced Meter Reading infrastructure using a Z-Wave compliant Wireless Sensor Network", *3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, 2011.
- [24] P. Ferreira, H. F. López, J. A. Afonso, "Sistema de Sensorização Móvel e Controlo baseado em ZigBee para Bicicletas Elétricas", *Seminário Anual de Automação, Eletrónica Industrial e Instrumentação (SAAEI 2012)*, Guimarães, Portugal, Julho 2012.
- [25] Yiming, Zhou, et al. "A design of greenhouse monitoring & control system based on ZigBee wireless sensor network." *IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom 2007)*, 2007.
- [26] H. F. López, J. A. Afonso, J. H. Correia, R. Simões, "HM4All: A Vital Signs Monitoring System based in Spatially Distributed ZigBee Networks", *4th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth 2010)*, Munique, Alemanha, March 2010.
- [27] P. Macedo, J. A. Afonso, "Simulation Analysis of IEEE 802.15.4 for Wireless Networked Control Systems", *35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009)*, Porto, Portugal, November 2009.
- [28] Khusvinder Gill, Shuang-Hua Yang, Fang Yao, and Xin Lu, "A ZigBee-Based Home Automation System", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 55, No. 2, May 2009.

-
- [29] J. A. Afonso, “Integração de Sistemas de Comunicações”, Universidade do Minho, 2013.
- [30] Texas Instruments, “CC2530 Development Kit User’s Guide (swru208b)”, 2010
- [31] Texas Instruments, “SmartRF05 Evaluation Board User’s Guide (SWRU210A)”, 2010.
- [32] AR Systems. (2015). IAR Embedded Workbench for 8051 [Online]. Página disponível em: <http://www.iar.com/ew8051/>.
- [33] José A. Afonso, Filipe Rodrigues, Pedro Pereira, Henrique Gonçalves and João L. Afonso, “Wireless Monitoring and Management of Energy Consumption and Power Quality Events”, World Congress on Engineering (WCE 2015), July 2015.
- [34] L. A. Rocha, J. A. Afonso, P. M. Mendes, J. H. Correia, “A Body Sensor Network for E-Textiles Integration”, EUROSENSORS XX, Gothenburg, Sweden, September 2006.
- [35] World Health Organization, Rising health care costs due to technology [Online]. Página Disponível: <http://www.euro.who.int/en/who-we-are/regional-director/news/news/2011/03/rising-health-care-costs- due-to-technology2>.
- [36] The Economist, The Future of Healthcare in Europe, 2011 [Online]. Página Disponível: <http://www.eufutureofhealthcare.com/>.
- [37] H. Fernandez-Lopez, J. A. Afonso, J. H. Correia and R. Simoes, “ZigBee-based Remote Patient Monitoring”, Studies in Health Technology and Informatics, pHealth, IOS Press 2012, 2012.
- [38] Amadeu S. L. Fernandes, “Comunicação Ad Hoc em Equipas de Robôs Móveis Utilizando a Tecnologia ZigBee”, Dissertação de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, 2012.
- [39] Diogo Gomes, José A. Afonso, Helena Fernandez-Lopez, “Experimental Evaluation of ZigBee and IEEE 802.15.4 for Data-Intensive Body Sensor Networks”, Seminar on Automation, Industrial Electronics and Instrumentation, 2012.

