

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



**FEUP**

# **Sistema de Extensão de Sinais IR Usando Tecnologia ZigBee**

**Décio da Costa Macedo**

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Telecomunicações

Orientador: Prof. Hélio Mendonça (Doutor)

Julho de 2010



# Resumo

Esta dissertação tem como objectivo implementar um sistema de extensão de sinais infravermelhos, usando como meio de comunicação uma rede sem fios ZigBee.

Neste documento está apresentado o estudo realizado sobre o estado da arte das tecnologias que actualmente estão disponíveis para realizar a extensão de sinais infravermelhos e também sobre as tecnologias utilizadas na realização deste projecto.

Para iniciar o desenvolvimento deste projecto foi utilizado o kit de desenvolvimento CC2431DK da Texas Instruments.

De seguida foram criados três dispositivos, utilizando como base o módulo RC2300AT da Radiocrafts. Sendo estes: um coordenador que é responsável pela gestão da rede e comunicação com o computador, e dois dispositivos que mediante a posição de um *jumper* permitem efectuar a emissão ou recepção de infravermelhos.

A comunicação entre o coordenador e o computador é feita através de uma ligação USB, utilizando para este efeito o integrado TUSB3410 da Texas Instruments. Para o computador foi desenvolvida uma aplicação para o sistema operativo Microsoft Windows. Com esta aplicação é possível enviar comandos de infravermelhos para os dispositivos emissores através de uma interface semelhante a um controlo remoto. Além desta função, também permite obter informações sobre os vários dispositivos da rede e executar macros. Estas são conjuntos de funções definidas pelo utilizador, que permitem enviar comandos de infravermelhos em determinados intervalos de tempo. Isto permite que o utilizador possa automatizar certas funções sem que seja necessário o controlo manual, por exemplo, uma macro pode colocar um gravador de DVD em modo de gravação e terminar esta após um determinado tempo definido pelo utilizador.

Durante o desenvolvimento deste projecto foram notadas interferências entre a rede ZigBee e redes IEEE 802.11b/g. Por este motivo foi efectuado uma teste para descobrir qual seria o melhor canal a ser utilizado pela rede ZigBee para que esta pudesse coexistir com as redes IEEE802.11b/g. Também foi efectuados uma teste para apurar qual a distância máxima a que os dispositivos podem comunicar, bem como um teste para estimar a duração das baterias para o dispositivo Emisor/Receptor de infravermelhos.



# Abstract

This thesis aims to implement an extension of infrared signals, using as a media a ZigBee wireless network.

This document presents the study on the state of the art technologies that are currently available to realize the extent of infrared signals, and also on the technologies used in this project.

To begin the development of this project the development kit CC2431DK of Texas Instruments was used.

Then three devices were created, using as basis the module RC2300AT from Radiocrafts. These being: a coordinator who is responsible for network management and communication with the computer, and two devices that can emit or receive infrared signals, depending on the position of a jumper.

Communication between the coordinator and the computer occurs via a USB connection, using for this purpose the integrated Texas Instruments' TUSB3410. For the computer it has been developed an application for the Microsoft Windows operating system. With this application you can send commands to the infrared emitting devices through an interface similar to a remote control. Besides this function, it also provides information on the various network devices and can run macros. These are sets of user-defined functions, which allow you to send infrared commands at certain intervals. This allows the user to automate certain functions without requiring manual control, e.g., a macro can start a DVD recorder in record mode and finish it after a certain time set by the user.

During the development of this project, interference between the ZigBee wireless network and IEEE 802.11b/g networks were detected. For this reason a test was conducted to find out what would be the best channel to be used by the ZigBee network to enable it to coexist with IEEE802.11b/g networks. It was also carried out a test to ascertain the maximum distance that the devices can communicate, as well as a test to estimate the duration of the batteries on the infrared Emitter/Receiver device.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objectivos do trabalho . . . . .	1
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>3</b>
2.1	Extensores de infravermelhos . . . . .	3
2.2	Protocolo RC5 . . . . .	4
2.3	ZigBee . . . . .	5
2.3.1	Tipos de dispositivos . . . . .	7
2.3.2	Topologias de rede . . . . .	9
2.4	Norma IEEE 802.15.4 . . . . .	10
2.5	Endereçamento . . . . .	11
2.6	Endereçamento de mensagens . . . . .	13
2.7	Encaminhamento de pacotes . . . . .	14
2.8	Segurança . . . . .	15
2.9	Tecnologias alternativas . . . . .	17
2.9.1	Z-Wave . . . . .	17
2.9.2	Simpliciti . . . . .	18
2.9.3	6LoWPAN . . . . .	19
2.9.4	Comparação . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento dos Módulos</b>	<b>21</b>
3.1	Introdução . . . . .	21
3.2	Desenvolvimento . . . . .	22
3.2.1	CC2430 . . . . .	25
3.2.2	Problemas encontrados durante o desenvolvimento . . . . .	27
3.3	Coordenador . . . . .	27
3.3.1	Comunicação com o computador . . . . .	29
3.4	Emissor/Receptor IR . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento das Aplicações</b>	<b>33</b>
4.1	Aplicação do RC2300AT . . . . .	33
4.1.1	Desenvolvimento . . . . .	33
4.1.2	Coordenador . . . . .	35
4.1.3	Emissor IR . . . . .	37
4.1.4	Receptor IR . . . . .	40
4.2	Aplicação do computador . . . . .	42

4.2.1	Interface . . . . .	43
4.2.2	Comando . . . . .	43
4.2.3	Editor de macros . . . . .	44
4.2.4	Informação da rede . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>47</b>
5.1	Alcance . . . . .	47
5.2	Interferências com redes IEEE 802.11 . . . . .	48
5.3	Consumo energético . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>	<b>53</b>
6.1	Conclusão . . . . .	53
6.2	Trabalho futuro . . . . .	53
<b>A</b>	<b>Esquemas e PCBs</b>	<b>55</b>
A.1	Coordenador . . . . .	55
A.2	Emissor/Receptor de IR . . . . .	56
	<b>Referências</b>	<b>58</b>

# Lista de Figuras

2.1	Niles Audio RCA-HT2. . . . .	3
2.2	Powermid XL. . . . .	4
2.3	Codificação Manchester com uma portadora de 36KHz. . . . .	5
2.4	Trama RC5. . . . .	5
2.5	Arquitectura Zigbee [1]. . . . .	6
2.6	Consumo de corrente de um <i>ZigBee End Device</i> [2]. . . . .	7
2.7	Corrente consumida durante a comunicação com o dispositivo pai [2]. . . . .	8
2.8	Topologias de rede. . . . .	10
2.9	Camadas MAC e PHY.(baseada em [3]) . . . . .	10
2.10	Canais IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 [4]. . . . .	11
2.11	Endereço IEEE de 64-bit. . . . .	12
2.12	Exemplo de endereçamento. . . . .	13
2.13	Perfil de segurança padrão.(baseada em [4]) . . . . .	16
2.14	Perfil de alta segurança.(baseada em [4]) . . . . .	16
2.15	Rede Z-Wave. . . . .	17
2.16	Arquitectura Simplici [5]. . . . .	18
2.17	Redes 6LoWPAN ligadas à internet.(baseada em [6]) . . . . .	19
3.1	Projecto proposto. . . . .	21
3.2	Composição do CC2431DK. . . . .	22
3.3	Módulo RC2300AT. . . . .	23
3.4	Área sem materiais condutores [7]. . . . .	23
3.5	Adaptador para o RC2300AT. . . . .	24
3.6	Funcionalidades do CC2430 [7]. . . . .	26
3.7	Fotografia do dispositivo Coordenador construído. . . . .	27
3.8	Esquema do Coordenador. . . . .	28
3.9	Esquema do TUSB3410. . . . .	29
3.10	Fotografia do dispositivo Emissor/Receptor construído. . . . .	30
3.11	Esquema de um Emissor/Receptor baseado no <i>ZigBee End Device</i> . . . . .	31
4.1	Implementação Z-Stack. [8] . . . . .	34
4.2	Funcionamento do Coordenador. . . . .	35
4.3	Descrição da trama de dados para comandos sobre a porta série. . . . .	36
4.4	Diagrama de funcionamento do Emissor. . . . .	38
4.5	Envio de um sinal infravermelho. . . . .	39
4.6	Diagrama de funcionamento do Receptor. . . . .	40
4.7	Descodificação de um sinal de infravermelhos recebido. . . . .	41
4.8	Ícones de notificação da aplicação. . . . .	43

4.9	Comando. . . . .	43
4.10	Configuração do comando. . . . .	44
4.11	Editor de macros. . . . .	45
4.12	Informação da rede. . . . .	46
5.1	Consumo de um Emissor/Receptor durante o processo de verificação se o dispositivo pai tem mensagens pendentes. Base de tempo 1ms/div e 100mV/div. . . . .	49
A.1	PCB do Coordenador (Dimensão: 6.25cm x 6.9cm). . . . .	55
A.2	PCB de um Emissor/Receptor baseado no <i>ZigBee End Device</i> (Dimensão: 7.75cm x 4.8cm). . . . .	56
A.3	Esquema de um Emissor/Receptor baseado no <i>ZigBee Router</i> . . . . .	56
A.4	PCB de um Emissor/Receptor baseado no <i>ZigBee Router</i> (Dimensão: 7.75cm x 5cm). . . . .	57

# Lista de Tabelas

2.1	Corrente consumida e duração dos intervalos de tempo identificados na figura [2].	9
2.2	Especificações das bandas utilizadas. . . . .	11
2.3	Tabela comparativa das várias redes WPAN apresentadas. . . . .	20
3.1	Pinos do adaptador. . . . .	24
3.2	Consumos de corrente do CC2430, nos diversos modos de operação. . . . .	26
4.1	<i>Clusters</i> do <i>endpoint</i> 1 do Coordenador. . . . .	37
4.2	<i>Clusters</i> do <i>endpoint</i> 1 do Emissor. . . . .	40
4.3	<i>Clusters</i> do <i>endpoint</i> 1 do Receptor. . . . .	42
5.1	Resultados do teste com o dispositivo a utilizar uma antena externa. . . . .	48
5.2	Resultados do teste com o dispositivo a utilizar apenas a antena do módulo RC2300AT. . . . .	48
5.3	Resultados do teste de interferências. . . . .	49
5.4	Corrente consumida e duração dos intervalos de tempo identificados na figura 5.1. . . . .	50



# Abreviaturas e Símbolos

AODV	<i>Ad hoc On demand Distance Vector</i>
APL	<i>Application Layer</i>
APS	<i>Application Support</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
IR	<i>InfraRed</i>
IREDD	<i>Infrared Emitting Diode</i>
LQI	<i>Link Quality Indication</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
NIB	<i>Network Information Base</i>
NWK	<i>Network Layer</i>
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PID	<i>Product Identifier</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
SIS	<i>Static Update Controller Identification Server</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SUC	<i>Static Update Controller</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VID	<i>Vendor Identifier</i>
ZC	<i>ZigBee Coordinator</i>
ZED	<i>ZigBee End Device</i>
ZR	<i>ZigBee Router</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Actualmente a utilização de redes sem fios encontra-se em constante expansão, inclusive as WPAN. O baixo custo e consumo energético destas, tornam-nas ideais para a sua utilização em redes de sensores e de pequenos dispositivos alimentados por baterias. Estas encontram aplicação tanto em contexto industrial como para fins de domótica. Devido a este crescimento torna-se interessante o estudo deste tipo de redes, neste caso a rede sem fios ZigBee.

A inclusão da funcionalidade de extensão de sinais infravermelhos numa rede ZigBee utilizada para fins de domótica, é uma mais valia porque permite controlar vários dispositivos que se encontrem em divisões.

### 1.2 Objectivos do trabalho

Este projecto tem como objectivo o desenvolvimento de um sistema que permite aumentar o alcance de dispositivos que comunicam por meio de sinais infravermelhos, mesmo através de barreiras físicas que sejam intransponíveis para esta tecnologia. É pretendido atingir este objectivo sem realizar qualquer tipo de alteração aos dispositivos originais.

Para alcançar este fim irá ser utilizada uma rede sem fios baseada na tecnologia ZigBee em que vão estar conectados dispositivos com capacidade de recepção ou emissão de infravermelhos. Isto irá permitir a comunicação entre dispositivos que não se encontrem em linha de vista.

Para além destes existirá, também, um módulo de monitorização e gestão da rede, que estará ligado a um PC através de uma ligação USB. Este PC também terá a possibilidade de controlar os dispositivos receptores.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Para além do capítulo de Introdução, esta dissertação contém mais 5 capítulos. No capítulo 2, é descrito o estado da arte em que não só são apresentadas as soluções actuais para realizar a extensão de sinais infravermelhos, mas também é feita uma introdução às tecnologias que são utilizadas neste projecto. No capítulo 3 é descrito o desenvolvimento do *hardware* dos dispositivos criados. No capítulo 4 é apresentado o *software* desenvolvido para os dispositivos e a aplicação criada para o computador. No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos dos testes realizados ao projecto. O capítulo 6 mostra as conclusões que podem ser retiradas do projecto, e apresenta um possível trabalho futuro no âmbito deste projecto.

## Capítulo 2

# Estado da Arte

Neste capítulo é feita uma introdução às tecnologias utilizadas neste projecto.

### 2.1 Extensores de infravermelhos

Actualmente grande parte dos aparelhos de entretenimento são controlados por controlo remoto através de sinais infravermelhos, no entanto a comunicação entre ambos os dispositivos só é possível se estes se encontrarem em linha de visão. A solução para este problema passa por utilizar extensores de infravermelhos, que normalmente são compostos por dispositivos receptores e dispositivos emissores de infravermelhos, e comunicam entre si através de cabo ou por rádio.

O princípio de funcionamento dos extensores é bastante simples, quando um dispositivo receptor recebe um sinal infravermelho, envia-o para todos os emissores para que estes reproduzam o mesmo sinal em infravermelho.



Figura 2.1: Niles Audio RCA-HT2.



Figura 2.2: Powermid XL.

Os extensores sem fios são de fácil instalação e expansibilidade, é possível adicionar mais receptores ou emissores bastando apenas colocá-los no alcance dos outros dispositivos sem necessitar de qualquer tipo de configuração. Estes extensores têm um alcance médio de 30 metros em interiores. Os extensores que utilizam um cabo para assegurar a comunicação, além de serem mais complicados para instalar, também estão limitados pela quantidade de emissores e receptores de infravermelhos que estes podem ter.

Com este projecto pretende-se criar um extensor de infravermelhos que utiliza uma rede sem fios ZigBee para fazer a comunicação entre os receptores e os emissores. Além desta função, o projecto também permite que um computador possa enviar comandos para todos os emissores.

A utilização desta rede permite que possam ser utilizados uma grande quantidade de emissores ou receptores, porque o endereçamento utilizado nas redes ZigBee permite formar redes com 64000 dispositivos. Dependendo da configuração da rede, para se adicionar um dispositivo emissor ou receptor, basta colocá-lo no alcance da rede e fica pronto a ser utilizado.

Uma vez que se trata de uma rede ZigBee, também é possível adicionar facilmente outros dispositivos que efectuem funções de domótica.

## 2.2 Protocolo RC5

O protocolo RC5 [9] foi desenvolvido pela Philips, com a finalidade de possibilitar a comunicação unidireccional através de infravermelhos em ambientes ruidosos, isto torna-o ideal para ser utilizado em controlos remotos. Este protocolo utiliza codificação Manchester modulado com uma portadora de 36KHz. Cada bit tem 64 ciclos da portadora, o que resulta numa duração de

1,778ms. A portadora de 36KHz tem um *duty cycle* compreendido entre 1/4 e 1/3 para reduzir o consumo energético.

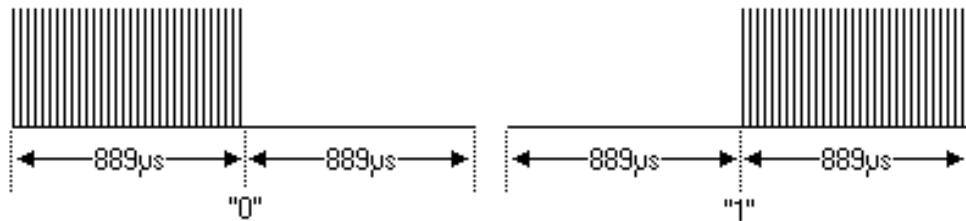


Figura 2.3: Codificação Manchester com uma portadora de 36KHz.

A estrutura da trama de dados definida no protocolo RC5 é constituída por 14 bits e tem uma duração de 24,889ms. No caso do utilizador premir uma tecla do comando e segurá-la, as tramas são repetidas a cada 113,792ms.

A trama é composta por dois *start bits*, um *toggle bit*, cinco *address bits* e seis *command bits*. Os *start bits* são compostos por dois 1s lógicos. O *toggle bit* mantém o seu valor para todas as tramas que são enviadas enquanto o utilizador mantém a tecla do comando premida, quando a tecla for solta e premida novamente, o valor do *toggle bit* comuta. Os *address bits* são utilizados para identificar o tipo de dispositivo de destino da trama. Os *command bits* servem para identificar o comando. Tanto os valores dos *address bits* como os dos *command bits* estão definidos no protocolo.

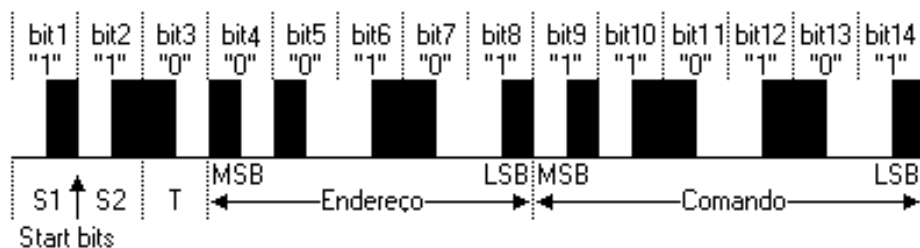


Figura 2.4: Trama RC5.

## 2.3 ZigBee

A tecnologia ZigBee [1] foi criada pela ZigBee Alliance [10], e descreve um protocolo de comunicações sem fios de baixo consumo, baixo custo, bidireccional e de curto alcance. Estas características permitem criar redes WPAN (Wireless Personal Area Network) e WSN (Wireless Sensor Network) entre pequenos objectos alimentados com pequenas baterias.

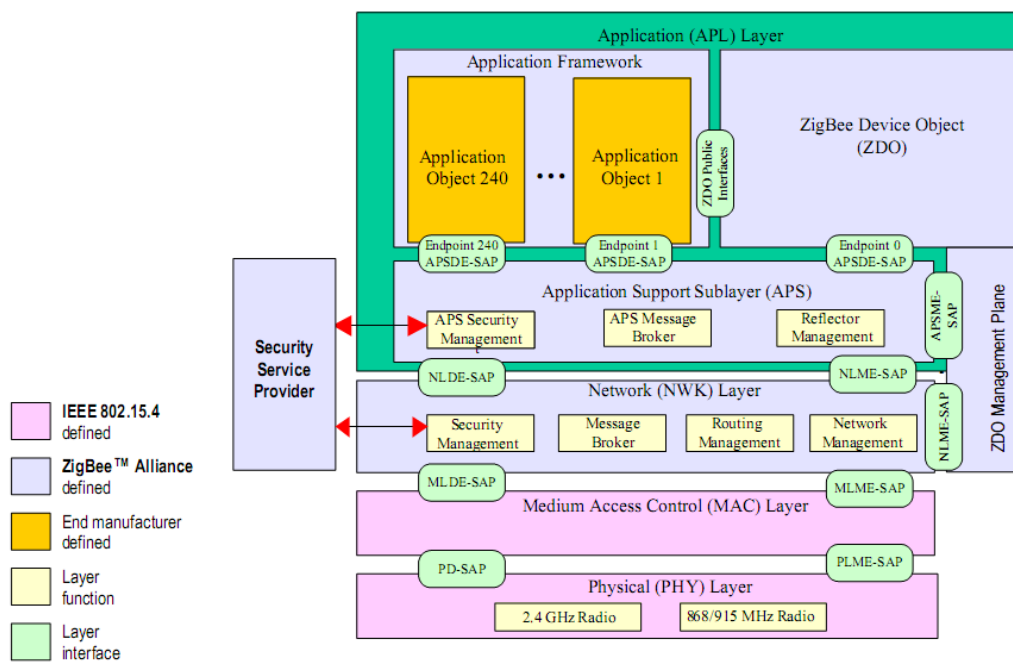


Figura 2.5: Arquitetura Zigbee [1].

O protocolo está descrito sob a forma de camadas, em que as camadas inferiores fornecem serviços às camadas superiores [1, 11].

A norma ZigBee define apenas duas destas camadas, sendo elas a APL (*Application Layer*) e a NWK (*Network Layer*). As restantes camadas MAC (*Medium Access Control*) e PHY (*Physical Layer*) são definidas pela norma IEEE 802.15.4.

A camada APL (*Application Layer*) é a camada em que está definida a aplicação do dispositivo. Esta camada permite definir até 240 *endpoints*, em que cada *endpoint* pode endereçar uma função diferente para o mesmo dispositivo. Um *endpoint* é definido por um conjunto de entradas e saídas de dados, denominadas por *clusters*. A cada *cluster* está associado um sentido (entrada ou saída) e um número de identificação de 16-bit que pode variar entre 0x0000 e 0xFFFF. Um *cluster* pode ser visto como um identificador do conteúdo da mensagem recebida, ou seja, indica ao dispositivo que recebe uma mensagem o que deve fazer com os dados nela contidos.

Esta camada também é composta pela sub camada APS (*Application Support Sublayer*), pelo AF (*Application Framework*) e pelo ZDO (*ZigBee Device Object*). O *Application Framework* (AF) fornece funções que permitem enviar e receber dados e configurar os *endpoints* da aplicação. O *ZigBee Device Object* (ZDO) está situado no *endpoint 0* e é responsável por fazer toda a gestão ZigBee do dispositivo, do tipo, iniciar o dispositivo, criar, procurar e juntar-se a uma rede, gerir a segurança, entre outras. A sub camada *Application Support SubLayer* (APS) faz a interligação entre a aplicação e a camada imediatamente inferior, a NWK.

A camada NWK (*Network Layer*) utiliza os serviços da camada MAC para fazer a gestão de rede do dispositivo, do tipo, juntar ou sair de uma rede, organização da topologia de rede, encaminhamento de dados e segurança.

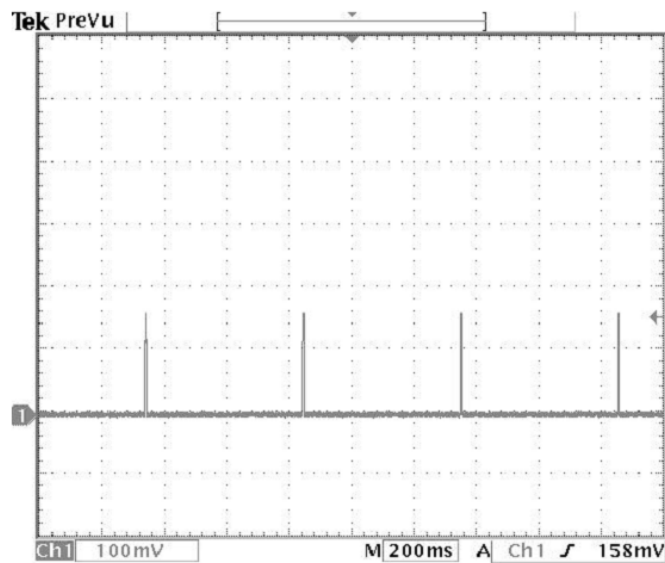


Figura 2.6: Consumo de corrente de um *ZigBee End Device* [2].

### 2.3.1 Tipos de dispositivos

Para que seja possível criar uma rede fiável de vários dispositivos, estão definidos três tipos de dispositivos ZigBee: *ZigBee Coordinator*, *ZigBee Router* e *ZigBee End Device*.

O *ZigBee Coordinator* é responsável por criar e gerir a rede ZigBee, existindo obrigatoriamente apenas um por cada rede. Quando este dispositivo é iniciado tenta criar uma rede com o PanId predefinido; se por acaso essa rede já existir, pode incrementar o PanId até encontrar uma rede livre, ou pode comportar-se como um *ZigBee Router* e conectar-se à rede já existente. Estes comportamentos são definidos na configuração do dispositivo.

O *ZigBee Router* permite fazer a interligação entre dispositivos que se encontrem fora do alcance de comunicação entre si. Este dispositivo é responsável por atribuir endereços a dispositivos que se liguem a ele e, também calcula a melhor rota entre dois dispositivos que pretendam comunicar entre si, registando-a numa tabela para que possa ser utilizada posteriormente se necessário. Se por algum motivo um ou mais nós dessa rota falharem, o *ZigBee Router* calcula uma nova rota e actualiza a que tinha sido guardada na tabela. Os dispositivos deste tipo tem de ser ligados a um *ZigBee Coordinator* ou a outro *ZigBee Router*, ou então podem ser configurados para que no caso de não existir nenhuma rede ZigBee disponível, podem tomar o papel de *ZigBee Coordinator* e criar uma.

O *ZigBee End Device* é um dispositivo terminal da rede, não desempenhando qualquer função necessária à manutenção desta, normalmente é um sensor ou um actuador. Uma vez que a manutenção da rede não depende deste dispositivo, ele pode desconectar-se da mesma, conectando-se apenas em certos intervalos de tempo para enviar ou receber dados. Durante o tempo que este dispositivo se encontra desconectado da rede, qualquer mensagem de dados que lhe é enviada, fica armazenada no dispositivo pai até que se volte a conectar. Esta capacidade permite-lhe redu-

zir bastante o consumo energético, o que torna possível ser alimentado por pequenas baterias. A Texas Instruments efectuou um teste de consumo energético de um *ZigBee End Device* baseado no SoC CC2430 com um intervalo de tempo entre ligações à rede de 500ms, este pode ser consultado em [2]. Este *system-on-chip* é constituído pelo módulo ZigBee CC2420 da Chipcon e um microcontrolador 8051.

A base de tempo do osciloscópio é de 200ms por divisão, e pelo que pode ser visto na figura 2.6, o tempo entre ocorrências de picos no consumo é de aproximadamente 500ms. Estes picos correspondem à corrente consumida quando o dispositivo se liga à rede para comunicar com o dispositivo pai. Durante o resto do tempo, o dispositivo encontra-se adormecido em que o valor medido da corrente foi de aproximadamente 0.5uA.

Na figura 2.7 é apresentada uma aproximação do momento em que o dispositivo acorda para comunicar com a rede. Neste caso não é feito qualquer envio ou recepção de mensagens, apenas é feita a verificação se o dispositivo pai contém mensagens para o *ZigBee End Device*.

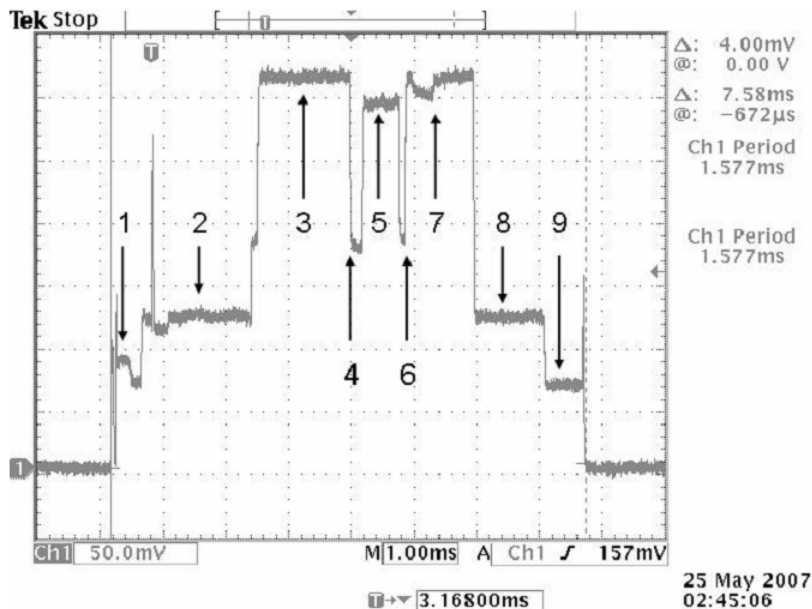


Figura 2.7: Corrente consumida durante a comunicação com o dispositivo pai [2].

A base de tempo do osciloscópio é de 1ms por divisão, então pode-se concluir que o tempo que o dispositivo se encontra activo é de aproximadamente 7.58ms.

Nesta figura é possível identificar os processos que ocorrem durante a comunicação do *ZigBee End Device* com o dispositivo pai. Na tabela 2.1 é apresentada a descrição destes processos bem como a corrente consumida e a duração dos mesmos.

A duração do intervalo de tempo 3, quando o dispositivo executa o algoritmo CSMA/CA, pode variar se o canal se encontrar muito ruidoso. Isto porque o tempo que o dispositivo espera entre verificações do estado do canal, é aleatório.

Tabela 2.1: Corrente consumida e duração dos intervalos de tempo identificados na figura [2].

Intervalo	Descrição	Corrente	Duração
1	Microcontrolador a 16MHz.	7.5mA	0.49ms
2	Microcontrolador a 32MHz.	12mA	1.8ms
3	Algoritmo CSMA/CA. Rádio em modo de recepção.	31mA	1.6ms
4	Rádio a mudar de modo de recepção para transmissão.	18mA	0.19ms
5	Transmissão de um pacote.	29mA	0.58ms
6	Rádio a mudar de modo de transmissão para recepção.	18mA	0.11ms
7	Recepção de um pacote do dispositivo pai.	31mA	1.1ms
8	Processamento do pacote.	12mA	1.1ms
9	Microcontrolador a 16MHz.	7mA	0.62ms

O consumo energético total do dispositivo, enquanto se encontra sem realizar transferências de dados com a rede é calculado pela soma dos valores apresentados na tabela 2.1.

$$7.5mA * 0.49ms + 12mA * 1.8ms + 31mA * 1.06ms + 18mA * 0.19ms + 29mA * 0.58ms + \\ + 18mA * 0.11ms + 31mA * 1.1ms + 12mA * 1.1ms + 7mA * 0.62ms = 131,995mA * ms$$

O consumo de um dispositivo *ZigBee End Device* é fortemente afectado pelo tempo que este permanece adormecido. Quanto maior este intervalo de tempo, menor é o consumo energético, mas com a consequência de aumentar a latência de resposta, pois quando o dispositivo se encontra adormecido não recebe mensagens da rede.

### 2.3.2 Topologias de rede

Estes dispositivos podem formar três topologias de rede: estrela, árvore e malha.

Na rede em estrela, o dispositivo ZigBee Coordinator está directamente conectado a todos os dispositivos ZigBee End Device, o que implica que toda a informação que circula na rede passe por ele. Esta rede é a que tem o menor alcance, isto porque os dispositivos ZigBee End Device não permitem a ligação a mais do que um router ou coordenador.

Na rede em malha, a comunicação na rede deixa de ser centralizada, podendo cada dispositivo comunicar com qualquer outro que esteja no seu alcance. Ao contrário da topologia em estrela a informação que circula na rede não passa toda pelo nó coordenador. Esta é a rede mais fiável do ponto de vista da possibilidade de um router falhar, porque o tráfego da rede pode ser encaminhado por outros routers.

A rede em árvore, é um caso particular da rede em malha, em que o dispositivo ZigBee Coordinator faz a interligação entre dispositivos ZigBee Router que não estão ligados entre si. Esta

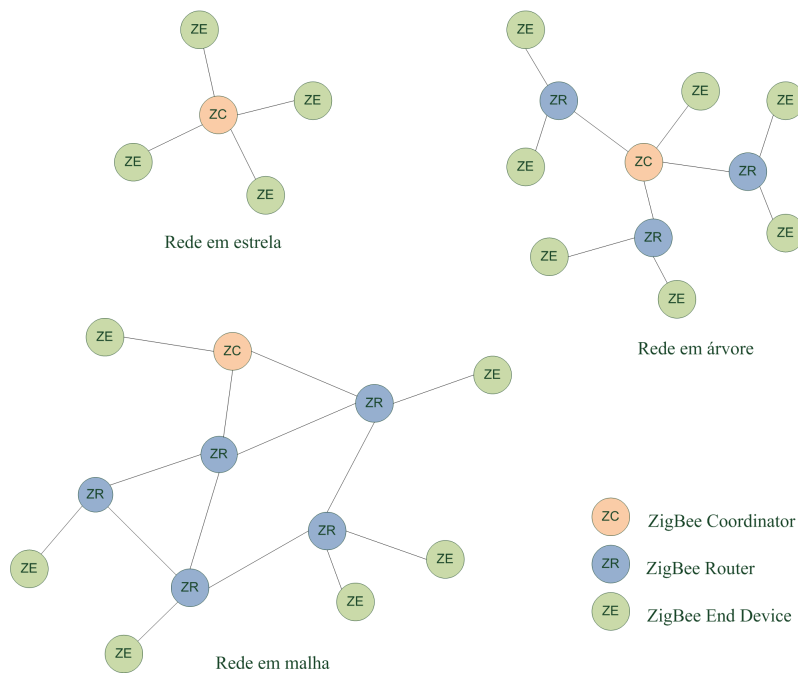


Figura 2.8: Topologias de rede.

rede pode ser facilmente estendida apenas com a adição de mais routers, mas caso um dos routers falhar pode-se perder grande parte da rede, este problema agrava-se quando o router que falha se encontra num nível mais próximo do coordenador.

## 2.4 Norma IEEE 802.15.4

A norma IEEE 802.15.4 [3] descreve as funcionalidades que definem os dispositivos de funcionalidades reduzidas (RFD) que são a base dos ZigBee End Device, e dos dispositivos de funcionalidade total (FFD) que são a base para os ZigBee Coordinator e ZigBee Router.

Esta norma também define as camadas MAC e PHY utilizadas no protocolo ZigBee.

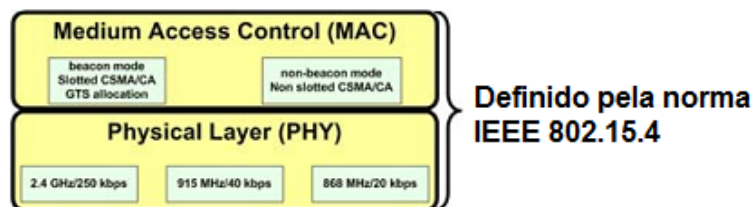


Figura 2.9: Camadas MAC e PHY.(baseada em [3])

A camada MAC é responsável por garantir uma comunicação fiável entre o dispositivo e

os seus vizinhos. Para esse fim, é utilizado o método CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) [11], que consiste em esperar que o canal esteja livre para poder enviar os dados. Esta camada também oferece dois modos de funcionamento para controlar os fluxo de dados, o modo *beacon-enabled* e o *non beacon-enabled*. No modo *beacon-enabled* o dispositivo coordenador da rede envia *beacons* com um determinado intervalo de tempo entre eles para sincronizar todos os dispositivos da rede. Os dados que cada dispositivo tem de enviar para a rede, são enviados após este *beacon*. No modo *non beacon-enabled*, os dados podem ser enviados assim que o canal se encontre disponível.

A camada PHY é responsável pela transmissão e recepção de dados através de um canal com uma determinada modulação. Esta camada oferece três bandas de operação em torno dos 2.4GHz, 915MHz e 868MHz, e também oferece técnicas de DSSS para diminuir a a quantidade de erros obtidos quando utilizado em ambientes ruidosos. As modulações e débitos para cada frequência estão descritas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Especificações das bandas utilizadas.

Frequência	Nº de canais	Débito	Modulação
2.4GHz	16	250Kb/s	O-QPSK
915MHz	10	40Kb/s	BPSK
868MHz	1	20Kb/s	BPSK

Das frequências disponíveis pela camada PHY, a mais utilizada é 2.4GHz. Isto pode ser um problema uma vez que nessa frequência também se encontram outras redes, como por exemplo redes IEEE 802.11 ou Bluetooth.

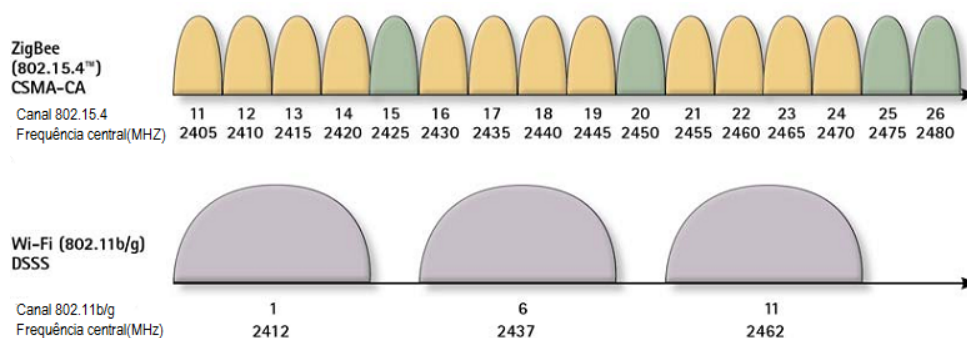


Figura 2.10: Canais IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 [4].

## 2.5 Endereçamento

Os dispositivos ZigBee possuem dois tipos de endereço, o endereço IEEE de 64-bit e o endereço de rede de 16-bit. O endereço IEEE é exclusivo para cada dispositivo, este endereço é

constituído por 24 bits do OUI(Organizationally Unique Identifier) atribuído pelo IEEE e 40 bits atribuídos pelo fabricante do módulo. O endereço de rede de 16-bit é único na rede, e é atri-



Figura 2.11: Endereço IEEE de 64-bit.

buído ao dispositivo quando este se liga a uma rede. O endereço de rede do coordenador é sempre 0x0000, e para os outros dispositivos pode ser entre 0x0001 e 0xFFFFB.

A atribuição do endereço de rede é feita pelo dispositivo pai, dependendo da configuração da rede, este endereço pode ser atribuído aleatoriamente, ou pode ser atribuído de uma forma distribuída.

No caso da atribuição aleatória de endereço [1], o dispositivo pai cria um endereço aleatório que não se encontre na sua base de informação da rede(NIB) e atribui ao dispositivo filho. O dispositivo filho mantém este endereço até que ocorra um conflito de endereços, e nesse caso o endereço tem de ser alterado.

No caso da atribuição distribuída [1, 11, 12], cada dispositivo pai possui um bloco de endereços que lhe são reservados conforme o seu endereço, a profundidade a que este se encontra na rede e a configuração da rede. A profundidade a que um dispositivo se encontra é a quantidade de ligações que este precisa de percorrer para alcançar o coordenador da rede. A configuração da rede define profundidade máxima que a rede pode atingir, a quantidade máxima de filhos por dispositivo e quantos desses filhos podem ser routers. Com base nestes parâmetros, é possível calcular quantos endereços são fornecidos a um router filho por um router que se encontre a uma profundidade  $d$  na rede através da formula

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + Cm \times (Lm - d - 1) \\ \frac{1 + Cm - Rm - Cm \times Rm^{Lm-d-1}}{1 - Rm} \end{cases} \quad (2.1)$$

, em que  $Cm$  é o número máximo de filhos por dispositivo,  $Rm$  é o número máximo de routers por dispositivo,  $Lm$  é a profundidade máxima da rede, e  $Cskip$  é a quantidade de endereços que estão reservados para cada router filho. Um router que tenha um  $Cskip(d) = 0$  não pode ter filhos e vai actuar como se fosse um dispositivo terminal.

Com base neste método de endereçamento, é possível calcular o endereço de qualquer dispositivo da rede a partir do tipo de dispositivo, a profundidade  $d$  a que este se encontra e do endereço do dispositivo pai  $A_P$ . No caso do dispositivo ser um router, o endereço pode ser calculado através da fórmula

$$A_{Rn} = A_P + 1 + (n - 1) * Cskip(d - 1), 1 \leq n \leq Rm. \quad (2.2)$$

No caso de ser um dispositivo terminal, o endereço é calculado pela fórmula

$$A_{EDn} = A_P + Rm * Cskip(d - 1) + n, 1 \leq n \leq Cm - Rm. \quad (2.3)$$

Na figura 2.12, é apresentado um exemplo de atribuição de endereços para uma rede com endereçamento distribuído e com  $C_m = 6$ ,  $R_m = 3$  e  $L_m = 3$ .

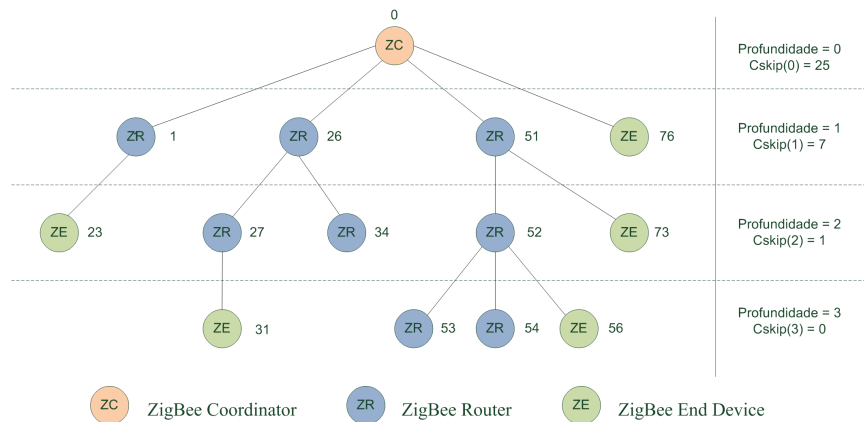


Figura 2.12: Exemplo de endereçamento.

## 2.6 Endereçamento de mensagens

Nas rede ZigBee existem quatro tipos de endereçamento para enviar mensagens entre dispositivos: Unicast, Broadcast, endereçamento de grupos e indirecto.

No caso de endereçamento unicast, para um dispositivo enviar uma mensagem, tem de conhecer o endereço 16-bit ou 64-bit do dispositivo de destino.

No endereçamento broadcast, a mensagem é enviada para vários dispositivos da rede. Para seleccionar quais os dispositivos que se pretende enviar a mensagem, estão definidos três endereços de broadcast:

- **0xFFFC** - a mensagem é enviada apenas para o coordenador e todos os routers da rede.
- **0xFFFD** - a mensagem é enviada para todos os dispositivos que se encontrem com a recepção activada.
- **0xFFFF** - a mensagem é enviada para todos os dispositivos da rede.

No endereçamento de grupos, a mensagem é enviada para todos os dispositivos que façam parte do grupo seleccionado como destino. O grupo é criado quando um ou mais dispositivos se juntam a um grupo com um determinado endereço. O endereço de grupo é de 16-bit e pode ser o mesmo que um dispositivo da rede. Isto é possível porque o tipo de pacotes utilizados para enviar mensagens de grupo é *multicast*, ao contrário das mensagens destinadas a um dispositivo que usam pacotes do tipo unicast. Os dispositivos podem juntar-se ou sair do grupo em qualquer altura, uma vez que os grupos não são definidos pela configuração de rede.

No modo de endereçamento indirecto, uma aplicação pode enviar uma mensagem sem conhecer o endereço de destino. Para utilizar este modo de endereçamento, a mensagem deve ser

enviada, tendo como destino o endereço 0xFFFFE. O destino desta mensagem vai ser determinado pela camada APS com base na tabela de *binding* que possui. Esta tabela recebe novas entradas de endereços de destino, quando dois ou mais dispositivos notificam o Coordenador da rede que pretendem estabelecer uma ligação de *binding* a outro dispositivo. Quando o Coordenador recebe estas mensagens verifica quais os dispositivos que verificam os requisitos para estabelecer uma ligação de *binding* e notifica-os, para que estes possam actualizar as suas tabelas. Para que seja possível estabelecer uma ligação de *binding* é necessário que os dispositivos se complementem, isto é, um dos dispositivos tem de ter um comando como saída e o outro tem de ter esse comando como entrada. O destino da mensagem enviada utilizando este método pode ser um ou mais dispositivos ou até um grupo. No caso de o destino da mensagem ser vários dispositivos, é enviada uma cópia da mensagem para cada um deles.

## 2.7 Encaminhamento de pacotes

O método de encaminhamento de mensagens [1] utilizado nas redes ZigBee varia conforme a topologia da rede.

No caso de uma rede em estrela, apenas o coordenador faz o encaminhamento de pacotes, uma vez que todos os dispositivos filhos actuam como dispositivos terminais da rede, independentemente se estes são do tipo router ou dispositivo terminal. Neste caso o coordenador apenas recebe o pacote e reencaminha-o imediatamente para o dispositivo de destino.

Para as redes com topologia em malha, o protocolo de encaminhamento é baseado no protocolo AODV (*Ad hoc On demand Distance Vector*) utilizado em redes ad hoc. Este protocolo permite adaptar-se a eventuais falhas de ligação entre dois dispositivos, procurando um caminho que contorna essa falha.

Os caminhos para os dispositivos de destino são guardados numa tabela em cada router, a cada dispositivo está associado o endereço do dispositivo para o qual o pacote deve ser reencaminhado.

Quando um router recebe um pacote para reencaminhar, primeiro verifica se o endereço de destino corresponde a qualquer um dos seus dispositivos vizinhos, e neste caso o pacote é imediatamente reencaminhado. Se o endereço não corresponder a nenhum dos seus vizinhos, é procurado um caminho na tabela de encaminhamento, no caso de ser encontrado o pacote é reencaminhado para o próximo dispositivo descrito na tabela. Caso contrário é feita uma procura pelo dispositivo de destino e o pacote é armazenado até este processo concluir. Após o caminho ser descoberto, o pacote é reencaminhado e este caminho é adicionado à tabela de encaminhamento.

A descoberta de um caminho consiste em contactar todos os dispositivos da rede, de modo a encontrar todos os caminhos possíveis entre os dois dispositivos. De todos os caminhos encontrados entre o router e o dispositivo de destino, é escolhido o caminho que apresenta o menor “custo do caminho”. Este “custo” é representado por  $C$  e pode ser calculado a partir da seguinte fórmula

$$C(P) = \sum_{i=1}^{L-1} C\{[D_i, D_{i+1}]\} \quad (2.4)$$

, em que  $L$  é a quantidade de dispositivos que formam o caminho, e  $C\{[D_i, D_{i+1}]\}$  é o “custo de ligação” entre dois dispositivos.

O “custo de ligação” entre dois dispositivos pode ser calculado pela fórmula

$$C(l) = \min\left(7, \text{round}\left(\frac{1}{p_l^4}\right)\right), \quad (2.5)$$

em que  $p_l$  é a probabilidade de um pacote atravessar essa ligação sem erro.

O modo como esta probabilidade é calculada não está definido, mas normalmente é calculada com base na quantidade de pacotes recebidos e perdidos, e também na qualidade de ligação(LQI).

No caso da rede apresentar uma topologia em árvore e o endereçamento do tipo distribuído, é utilizado o encaminhamento hierárquico [12]. Com este método não é necessário fazer a descoberta do caminho até ao dispositivo de destino, quando um router recebe um pacote para reencaminhar, apenas verifica se o dispositivo de destino é um dos seus dispositivos filhos. Caso não seja um desses dispositivos, verifica se o endereço de destino pertence ao bloco de endereços que lhe foi atribuído. Se isto se verificar o pacote é reencaminhado para o router filho com o endereço

$$A_r = A + 1 + \left\lceil \frac{A_{dest} - (A + 1)}{Cskip(d - 1)} \right\rceil, \quad (2.6)$$

em que  $A$  é o endereço do router que está a efectuar o reencaminhamento,  $d$  é a profundidade a que este se encontra e  $A_{dest}$  é o endereço de destino do pacote. Se o endereço de destino não se encontrar no bloco de endereços que lhe foi atribuído, o pacote é reencaminhado para o dispositivo pai e este processo repete-se até que seja alcançado o destino.

## 2.8 Segurança

A segurança nas redes ZigBee dispõe de mecanismos que permitem gerir o acesso à rede, gerir as chaves de segurança e encriptação de dados. A encriptação é baseada na cifra AES-128 no modo CCM [1, 4, 13].

Para gerir a segurança da rede existe um dispositivo que tem a função de *Trust Center*, normalmente o coordenador de rede, mas também pode ser um dispositivo dedicado apenas a esta função. Este dispositivo é responsável por controlar quais os dispositivos tem permissão para se juntar à rede, desconectar certos dispositivos, e fazer a atribuição e actualização das chaves de segurança.

As chaves de segurança utilizadas para a encriptação de dados tem um tamanho de 128-bit e estão três chave, cada uma com a sua função:

- **Chave Mestra** - esta chave é opcional e é utilizada apenas para fazer o estabelecimento de uma chave de ligação entre dois dispositivos. A chave mestra pode ser atribuída pelo *Trust Center* ou pode ser programada no dispositivo.

- **Chave de Rede** - a chave de rede é conhecida por todos os dispositivos da rede e é utilizada para encriptar a comunicação entre todos os dispositivos da rede, por exemplo, uma mensagem em *broadcast*. Esta chave pode ser actualizada periodicamente pelo *Trust Center*.
- **Chave de Ligação** - esta chave é utilizada para encriptar as mensagens *unicast* entre dois dispositivos. As chaves de ligação podem ser atribuídas pelo *Trust Center* ou podem ser estabelecidas entre dois dispositivos.

A configuração da segurança da rede pode ser feita através da selecção de um perfil de segurança, actualmente estão definidos dois: segurança padrão e alta segurança. Para o perfil de segurança padrão, a lista de dispositivos e todas as chaves de segurança da rede, podem ser mantidas pelo *Trust Center* ou por qualquer outro dispositivo da rede. Neste perfil o *Trust Center* é responsável por gerir a chave de rede e controla o acesso à rede por parte dos dispositivos.

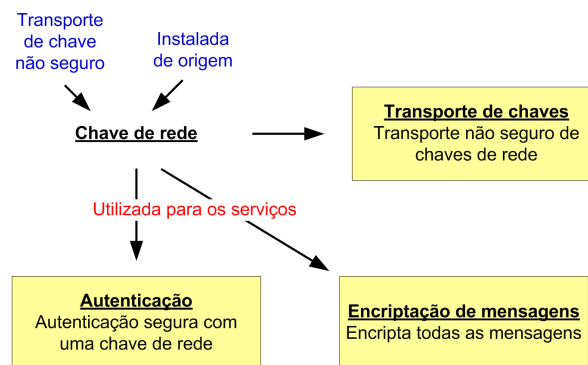


Figura 2.13: Perfil de segurança padrão.(baseada em [4])

No perfil de alta segurança, o *Trust Center* mantém a lista de todos os dispositivos da rede, controla o acesso à rede e faz a gestão de todas as chaves de rede, incluindo as chaves de ligação entre dois dispositivos. Este perfil consome bastante mais recursos que o perfil de segurança padrão, e aumenta ainda mais o consumo com o crescimento da rede.

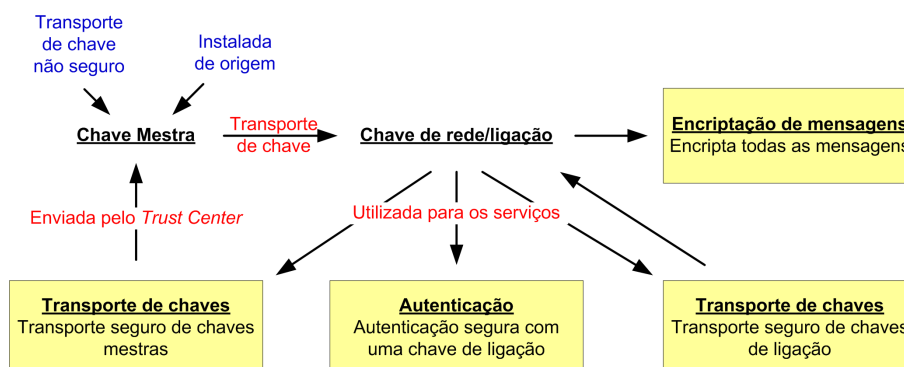


Figura 2.14: Perfil de alta segurança.(baseada em [4])

## 2.9 Tecnologias alternativas

Actualmente existem várias tecnologias disponíveis para criar redes WPAN, que também podiam ser utilizadas para realizar este projecto. De seguida é feita uma pequena introdução a algumas delas.

### 2.9.1 Z-Wave

A tecnologia Z-Wave foi desenvolvida pela *Zensys* [14], e implementa uma rede WPAN orientada para aplicações residenciais. As redes Z-Wave funcionam nas bandas 908MHz e 860MHz com uma modulação FSK, e têm um débito máximo de 40 Kb/s. Esta tecnologia apenas permite formar redes em malha com um número máximo de 232 dispositivos.

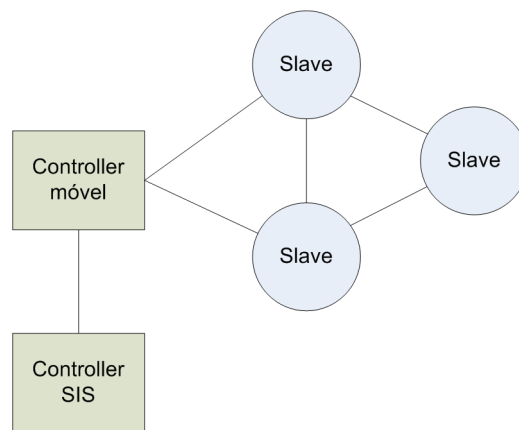


Figura 2.15: Rede Z-Wave.

Os dispositivos que formam estas redes podem ser *controllers* ou *slaves*.

O dispositivo *slave* é um dispositivo terminal da rede, que apenas executa tarefas simples ordenadas pelo *controller*. Estes dispositivos não podem iniciar uma transferência de dados, eles têm de esperar que um *controller* inicie esse processo.

O dispositivo *controller* pode ser fixo ou móvel. No caso de ser fixo, o dispositivo assume uma posição fixa na rede e é alimentado a partir da rede eléctrica. Estes dispositivos estão constantemente activos na rede, porque podem receber dados a qualquer momento. Em redes mais complexas, o *controller* fixo pode ser configurado para guardar a configuração da rede, e passa a ser um *Static Update Controller* (SUC), ou pode ser configurado como um *SUC ID Server* (SIS), e neste caso o *controller* pode utilizar os controladores móveis para adicionar ou remover outros dispositivos da rede. Os *controllers* fixos também podem ser utilizados para fazer a interligação entre uma rede Z-Wave e outras redes.

O *controller* móvel, pode mudar de posição na rede e normalmente são alimentados por baterias. Estes *controllers* estão constantemente actualizados com a sua posição na rede, isto é conseguido porque enviam *pings* para todos os dispositivos que se encontrem na sua vizinhança.

Estes dispositivos tem a capacidade de adicionar ou remover outros dispositivos da rede com base na configuração de rede guardada num *controller* SIS.

Qualquer um destes dispositivos, *controller* ou *slave*, pode ser configurado para retransmitir pacotes de dados, para aumentar o alcance da rede. No entanto existe um limite de alcance imposto pelo protocolo de encaminhamento, que limita a distância que um pacote de dados pode percorrer a quatro saltos. Isto implica que um dispositivo só pode comunicar com outro dispositivo que encontre até quatro saltos de distância.

## 2.9.2 Simplificiti

A tecnologia Simplificiti [5] foi desenvolvida pela Texas Instruments [15], e implementa um protocolo de comunicações sem fios muito simples. O protocolo de comunicação e formação da rede foi desenvolvido pela Texas Instruments. Este protocolo define as bandas de funcionamento em 480MHz, 868MHz, 915MHz, 955MHz e 2.4GHz, e permite obter uma velocidade de transferência até 250Kb/s dependendo da frequência. Nestas redes, a comunicação entre dispositivos é feita através de ligações previamente estabelecidas. Cada dispositivo possui 64 portas, mas apenas 31 estão disponíveis para a aplicação, as restantes são utilizadas para envio de mensagens *broadcast* e gestão da rede e ligações. No entanto, como nas rede Z-Wave, a distância máxima a que um dispositivo pode comunicar está limitada a quatro saltos, este limite é imposto pelo protocolo de encaminhamento.

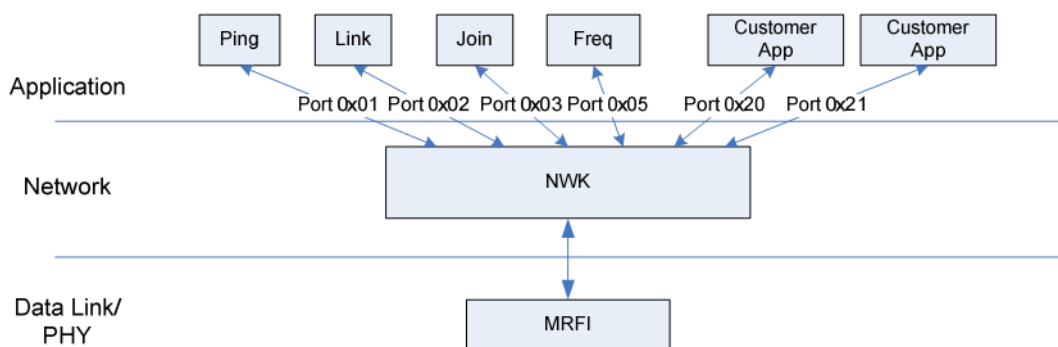


Figura 2.16: Arquitectura Simplificiti [5].

Os dispositivos que são utilizados nestas redes podem ser *Access Points*, *Range Extenders* e *End Devices*.

O dispositivo *Access Point* é responsável por gerir a rede e a segurança da mesma. Este dispositivo também guarda as mensagens a ser enviadas para os dispositivos *End Device*, até que estes o contactem a verificar se tem dados. Este dispositivo está sempre activo, e por isso deve ser alimentado a partir da rede eléctrica.

O dispositivo *Range Extender* limita-se a reenviar todas os pacotes de dados que recebe, a não ser que o pacote recebido tenha atingido o alcance limite de quatro saltos ou se o destino do pacote

seja o próprio dispositivo. Como o *Access Point*, este é um dispositivo que está sempre activo e também deve ser alimentado a partir da rede eléctrica.

O dispositivo *End Device* é um dispositivo terminal da rede e pode ser configurado para suportar envio e recepção de dados, ou apenas envio. Para os dispositivos configurados para apenas suportarem envio de dados, toda a configuração da rede tem de ser programada no dispositivo.

As topologias de rede que podem ser formadas por estes dispositivos são: estrela, árvore e malha. A única limitação imposta nestas redes é que para um dispositivo se conectar à rede, tem de se encontrar a menos de quatro saltos do *Access Point*.

### 2.9.3 6LoWPAN

A tecnologia 6LoWPAN [6] está a ser desenvolvida pela IETF [16], e implementa uma rede sem fios WPAN que utiliza o protocolo IPv6 para o endereçamento. Apesar da especificação não se encontrar terminada, já começam a surgir algumas implementações desta arquitectura. O funcionamento da rede é garantido pela norma IEEE 802.15.4, que como nas redes ZigBee, define a base dos dispositivos que formam a rede. Esta também define três bandas de funcionamento da rede em 868MHz, 915MHz e 2.4GHz, e permite atingir velocidades de transferência de dados até 250Kb/s. Uma vez que os pacotes de dados utilizados nas redes IP ocupam muito espaço para serem enviados através de redes IEEE802.15.4 [3], é utilizada uma camada adaptativa imediatamente acima da camada MAC, que faz a compressão do cabeçalho dos pacotes IPv6 e fragmenta os pacotes IPv6 em vários pacotes IEEE802.15.4. A utilização deste endereçamento permite ligar as redes 6LoWPAN a outras redes que também utilizem endereçamento IPv6, como por exemplo, WLAN, LAN e internet. A interligação entre uma rede 6LoWPAN e outra rede é feita através de um *Border Router* que faz a conversão entre as duas redes. Esta capacidade de interligação com outras redes IP, permite que duas redes 6LoWPAN que se encontrem muito afastadas comuniquem através de uma rede IP já existente.

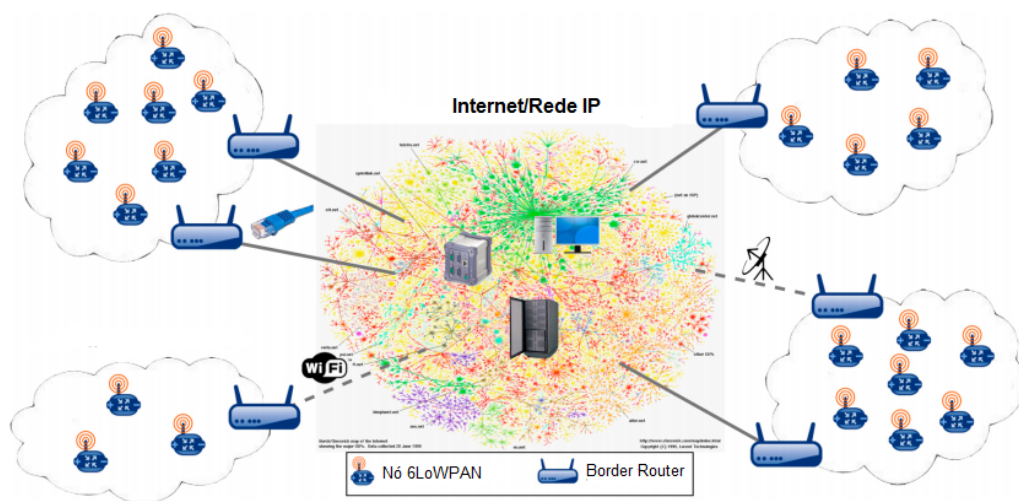


Figura 2.17: Redes 6LoWPAN ligadas à internet.(baseada em [6])

Apesar de estas redes suportarem IPv6, cada rede 6LoWPAN está limitada a 64000 dispositivos, este limite é imposto pelo endereçamento utilizado pela norma IEEE 802.15.4, pois esta utiliza endereços de 16-bit para cada dispositivo da rede.

## 2.9.4 Comparação

Na tabela 2.3 é feita a comparação entre as várias tecnologias apresentadas anteriormente.

Tabela 2.3: Tabela comparativa das várias redes WPAN apresentadas.

	ZigBee	Z-Wave	Simpliciti	6LoWPAN
Bandas	868MHz, 918MHz, 2.4GHz	868MHz, 918MHz	480MHz, 868MHz, 915MHz, 955MHz e 2.4GHz	868MHz, 918MHz, 2.4GHz
Débito	até 250Kb/s	40Kb/s	até 250Kb/s	até 250Kb/s
Nº máx. de dispositivos	64000	232		64000
Pontos fortes	Permite criar redes de grandes dimensões.	Implementação simples.	Implementação simples, Grande quantidade de bandas de funcionamento	Interligação com rede IPv6, Permite criar redes de grandes dimensões.

Qualquer uma das redes apresentadas pode ser utilizada para realizar este projecto, no entanto no caso de ser utilizada a rede 6LoWPAN, a comunicação com o computador podia ser feita através de uma rede LAN ou Wireless em vez de USB.

De certa foram as implementações deste projecto nas várias redes seriam realizadas de maneira semelhante, isto é, o módulo que comunica com o computador tomaria uma posição mais central na rede como por exemplo, o coordenador de uma rede ZigBee ou um controlador fixo para uma rede Z-Wave; os dispositivos responsáveis pela recepção e emissão de infravermelhos tomariam um papel menos activo na rede, por exemplo, o *ZigBee End Device* para uma rede ZigBee ou um controlador móvel para uma rede Z-Wave.

## Capítulo 3

# Desenvolvimento dos Módulos

Neste capítulo são apresentadas as características de *hardware* do dispositivo Coordenador e do Emissor/Receptor de infravermelhos, bem como o desenvolvimento dos mesmos.

### 3.1 Introdução

O projecto proposto tem como objectivo o desenvolvimento de um sistema que permite aumentar o alcance de dispositivos que comunicam por meio de sinais infravermelhos, mesmo através de barreiras físicas que sejam intransponíveis para esta tecnologia. É pretendido atingir este objectivo sem realizar qualquer tipo de alteração aos dispositivos originais.

Para alcançar este fim irá ser utilizada uma rede sem fios baseada na tecnologia ZigBee em que vão estar conectados dispositivos com capacidade de recepção ou emissão de infravermelhos. Isto irá permitir a comunicação entre dispositivos que não se encontrem em linha de vista.

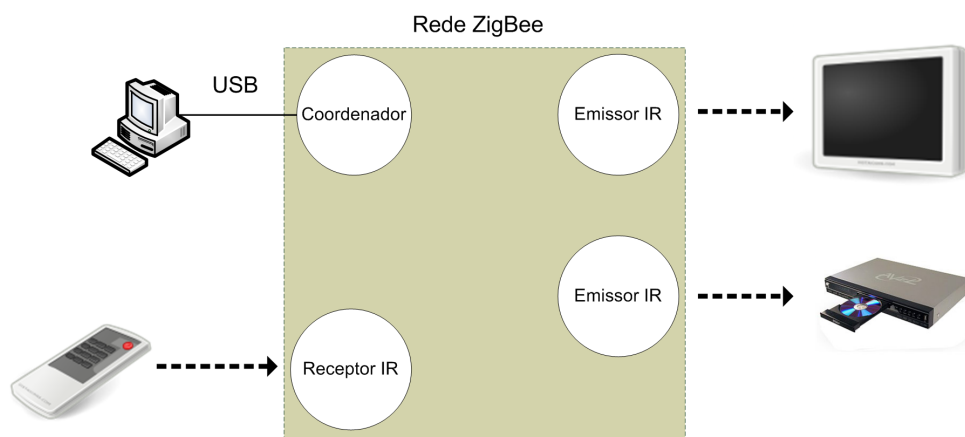


Figura 3.1: Projecto proposto.

Para além destes existirá, também, um módulo de monitorização e gestão da rede, que estará ligado a um PC através de uma ligação USB. Este PC também terá a possibilidade de controlar os dispositivos emissores.

## 3.2 Desenvolvimento

Este projecto teve como ponto de partida o kit de desenvolvimento CC2431DK [17]. Na fase inicial definiram-se a configuração da rede ZigBee e os dispositivos que a formam. Este kit é fabricado pela *Texas Instruments* e permite desenvolver aplicações para os módulos CC2430EM e CC2431EM.

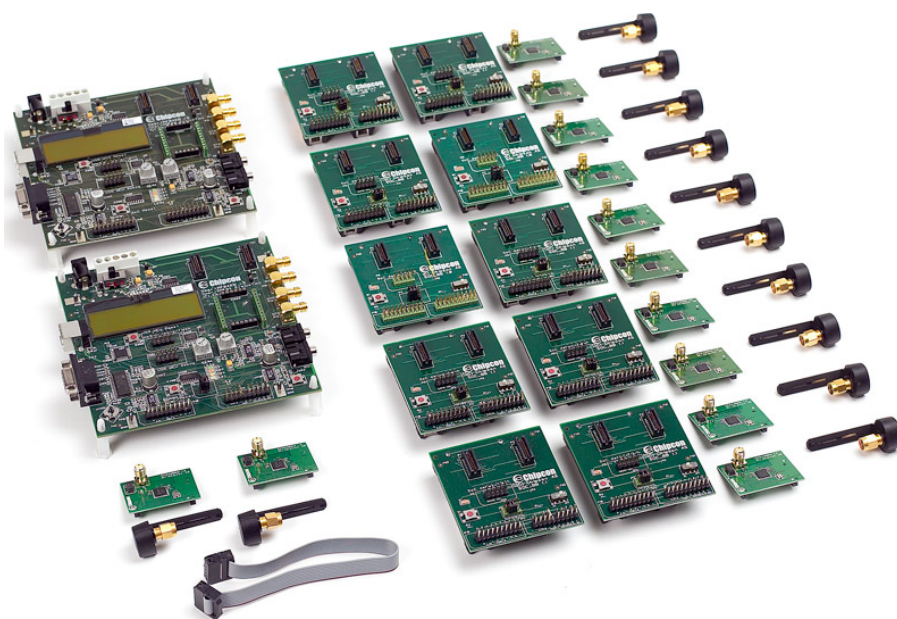


Figura 3.2: Composição do CC2431DK.

É composto por duas placas SmartRF04EB, dez placas Soc\_BB, dez módulos CC2431EM e dois CC2430EM. As placas SmartRF04EB são ligadas através de USB ao computador e permitem programar os módulos e realizar *debug* de aplicações. Além destas funções possuem periféricos para facilitar o desenvolvimento de aplicações, sendo suficientes para a maioria dos casos. Estas placas podem ser alimentadas através da ligação USB, uma pilha de 9V ou por uma fonte de alimentação externa. As placas SoC\_BB têm a finalidade de fornecer alimentação e portas de expansão para os módulos CC2430EM ou CC2431EM, sendo esta fornecida por duas pilhas do tipo AA, colocadas no lado inferior das placas. Os módulos CC2430EM e CC2431EM contêm apenas um SoC CC2430 ou CC2431, uma antena embutida na PCB e um conector para ligação a uma antena externa, caso seja necessário, para aumentar o alcance de transmissão.

Para criar uma rede de extensão de sinais infravermelhos através de uma rede ZigBee, apenas são necessários dois tipos de dispositivos: um Coordenador para fazer a gestão da rede e comunicar

com o computador, que tem como base um *ZigBee Coordinator*, porque lhe confere uma posição mais central na rede e tem o endereço de rede fixo; e um dispositivo responsável pela recepção ou emissão de infravermelhos, que tem como base um *ZigBee Router* ou *ZigBee End Device*. A selecção se este dispositivo desempenha a função de emissor ou receptor de infravermelhos é feita através de um *jumper*.

Após o desenvolvimento da rede ZigBee foram desenvolvidos os dispositivos, coordenador e o emissor/receptor de infravermelhos. A utilização dos módulos RC2300AT [18] simplificou bastante este processo, porque não foi necessário fazer qualquer alteração ao código utilizado anteriormente nos módulos CC2430EM.

Os módulos RC2300AT são produzidos pela Radiocrafts [19], sendo estes constituídos apenas por um SoC CC2430 e uma antena integrada, o que os torna totalmente compatíveis com os módulos CC2430EM.

O desenvolvimento destes dispositivos foi realizado utilizando o interface JTAG das placas SmartRF04EB do kit CC2431DK.

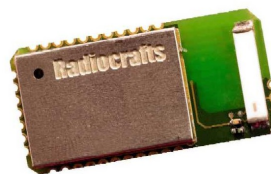


Figura 3.3: Módulo RC2300AT.

Para desenvolver o *hardware* dos dispositivos foi necessário recorrer à utilização de *breadboards*, mas visto que os módulos RC2300AT são de montagem SMD, tornou-se necessário criar um adaptador para que estes pudessem ser utilizados. Uma vez que este módulo possui uma antena incorporada, há certos aspectos a ter em conta no desenho da PCB. A parte a sombreado ilustrada na figura 3.4, define a área em que não pode estar presente qualquer tipo de material condutor, caso contrário será reduzida a eficácia da antena.

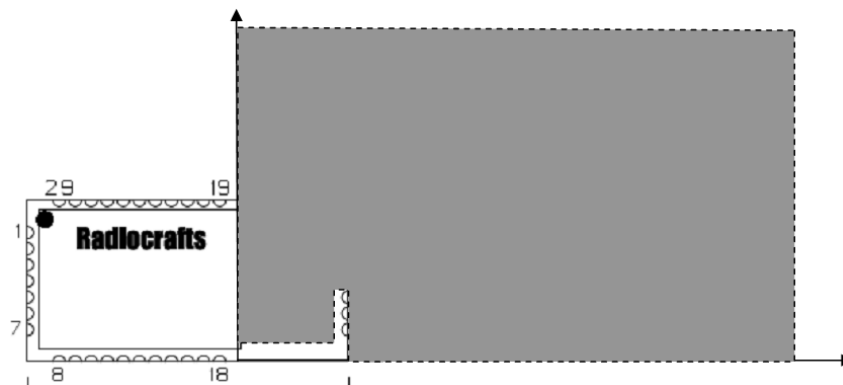


Figura 3.4: Área sem materiais condutores [7].

Para o desenvolvimento deste adaptador foi utilizada a aplicação Eagle 5.6 [20]. Esta aplicação também foi utilizada para desenvolver as PCBs e esquemas dos dispositivos Coordenador e Emissor/Receptor IR.

O adaptador projectado teve em conta este aspecto e o resultado final pode ser visto na figura 3.5. As dimensões do adaptador são 42.75mm de comprimento e 30.48mm de largura.

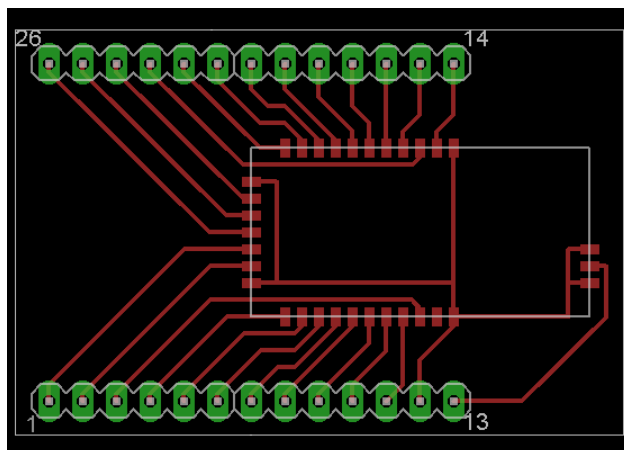


Figura 3.5: Adaptador para o RC2300AT.

As ligações existentes entre os pinos do adaptador e do RC2300AT, bem como as suas funções, estão descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Pinos do adaptador.

Pino	Pino do RC2300AT	Nome	Descrição
1	5	P2_0	Pino 0 da porta 2
2	6	RESET_N	Sinal de reset
3	16	RXTX	Sinal de controlo RX/TX
4	8	P0_0	Pino 0 da porta 0
5	9	P0_1	Pino 1 da porta 0
6	10	P0_2	Pino 2 da porta 0
7	11	P0_3	Pino 3 da porta 0
8	12	P0_4	Pino 4 da porta 0
9	13	P0_5	Pino 5 da porta 0
10	14	P0_6	Pino 6 da porta 0
11	15	P0_7	Pino 7 da porta 0
12	1,7,18,19,30,32	GND	Massa
13	31	RF	Ligação para uma antena externa

Continua na próxima página

**Tabela 3.1 – continuação**

Pino	Pino do RC2300	Nome	Descrição
14	20	32kHz_Q2	Oscilador de 32KHz interno
15	22	P1_7	Pino 7 da porta 1
16	23	P1_6	Pino 6 da porta 1
17	24	P1_5	Pino 5 da porta 1
18	25	P1_4	Pino 4 da porta 1
29	26	P1_3	Pino 3 da porta 1
20	27	P1_2	Pino 2 da porta 1
21	28	P1_1	Pino 1 da porta 1
22	29	P1_0	Pino 0 da porta 1
23	21	32kHz_Q1	Oscilador de 32KHz interno
24	2	Vcc	Tensão de alimentação
25	3	P2_2	Pino 2 da porta 2
26	4	P2_1	Pino 1 da porta 2

Após o desenvolvimento do *hardware* dos dispositivos, foram construídos um Coordenador e dois Emissores/Receptores de infravermelhos.

### 3.2.1 CC2430

O CC2430 [7] é um SoC (System-on-Chip) produzido pela Chipcon, desenhado para aplicações ZigBee, mas apenas possibilita a comunicação na frequência de 2.4GHz. Este SoC surgiu da junção entre um microcontrolador 8051 com 128 KB de memória *flash* e o CC2420, sendo este último um circuito integrado que apenas implementa a camada PHY da norma IEEE 802.15.4. Isto reduz significativamente o hardware necessário para implementar a comunicação ZigBee num projecto. As funcionalidades fornecidas pelo CC2430 podem ser vistas na figura 3.6.

Este SoC disponibiliza quatro modos de operação que permitem regular o consumo energético, sendo este conseguido através da inactivação de certos módulos do SoC. Esta característica é uma mais valia para para os dispositivos *ZigBee End Device*, uma vez que não necessitam de estar constantemente activos para assegurar a subsistência da rede. Estes quatro modos são denominados de PM0, PM1, PM2 e PM3 e cada um deles define um conjunto de módulos que se encontram activos.

O modo PM0 é considerado o modo activo do dispositivo, apresentando o maior consumo energético, uma vez que neste modo todos os módulos se encontram activos.

No modo PM1, o dispositivo entra em modo adormecido, desactivando apenas os osciladores de alta frequência, nomeadamente o de 32MHz e o de 16MHz.

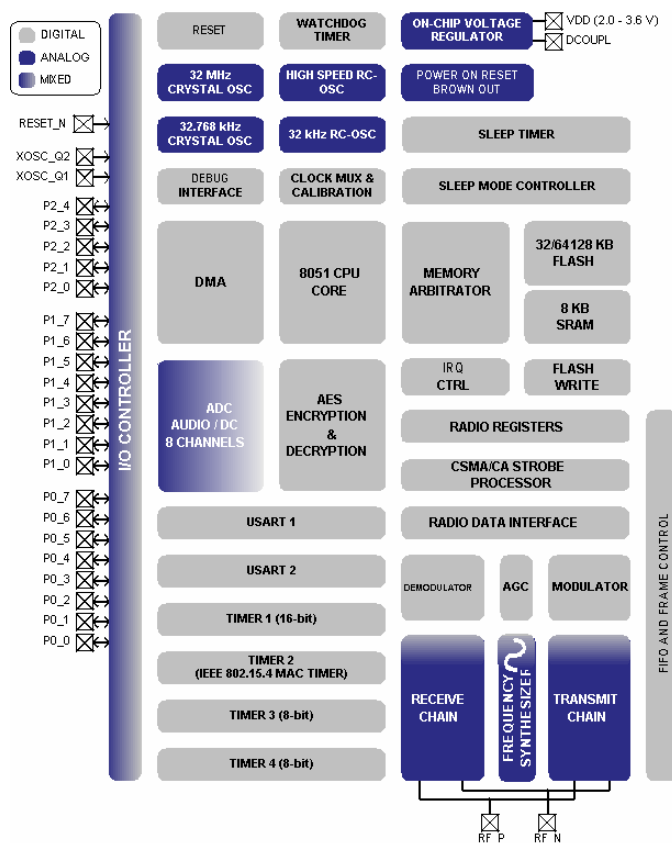


Figura 3.6: Funcionalidades do CC2430 [7].

O modo PM2 apresenta o segundo mais baixo consumo energético, apenas mantendo activo o oscilador de 31.768kHz, os temporizadores e as interrupções externas, sendo os restantes circuitos do SoC desligados. Os pinos de saída mantêm o valor em que se encontravam antes do dispositivo entrar neste modo. Neste caso, o dispositivo pode ser acordado através de um temporizador, uma interrupção externa ou *reset*.

Por fim, o modo PM3 permite obter o mais baixo consumo de todos os modos. Neste, todos os circuitos internos, com a excepção das interrupções externas, encontram-se desligados. Tal como no modo PM2, os pinos de saída mantêm o valor em que se encontravam antes do dispositivo entrar neste modo. Apenas uma interrupção externa ou *reset* podem acordar o dispositivo.

Os consumos do CC2430 em cada um destes modos são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Consumos de corrente do CC2430, nos diversos modos de operação.

Modo	Consumo
PM0	4.3mA a 26.9mA
PM1	190 $\mu$ A
PM2	0.5 $\mu$ A
PM3	0.3 $\mu$ A

### 3.2.2 Problemas encontrados durante o desenvolvimento

Durante a fase inicial de desenvolvimento do projecto, o canal utilizado era o 11, pois este estava definido por omissão no Z-Stack (ver secção 4.1.1), e foram notadas várias perdas de pacotes quando os dispositivos se encontravam na presença de redes IEEE 802.11.

Na figura 2.10 são apresentados os canais de redes ZigBee e os canais IEEE 802.11 que se sobrepõem. Nesta figura é possível ver que canal 11 da redes ZigBee encontra-se sobreposto com o canal 1 destas redes. Devido a estes factos foi efectuado um teste para verificar a ocorrência destas interferências e com base nos resultados obtidos, seleccionar o canal que apresentar menor interferência para a rede. Os resultados obtidos deste teste estão disponíveis na secção 5.2.

## 3.3 Coordenador

O dispositivo Coordenador é único na rede e desempenha a função de assegurar a rede ZigBee e realizar a intercomunicação entre a mesma e o computador, sendo este baseado no *ZigBee Coordinator*. Isto implica que a alimentação não pode ser fornecida através de baterias devido ao elevado consumo que estes dispositivos apresentam, restando assim duas opções: pode ser alimentado através da ligação USB ao computador, ou a partir de uma fonte de tensão de 5V-15V DC, sendo a selecção feita através de um *jumper*.

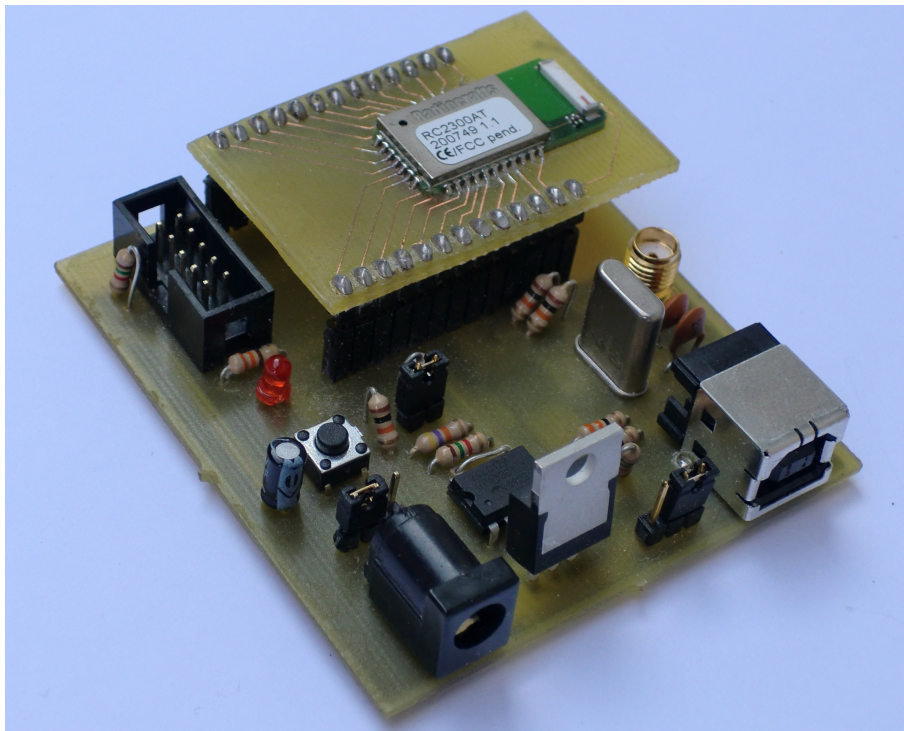


Figura 3.7: Fotografia do dispositivo Coordenador construído.

O esquema deste dispositivo é apresentado na figura 3.8.

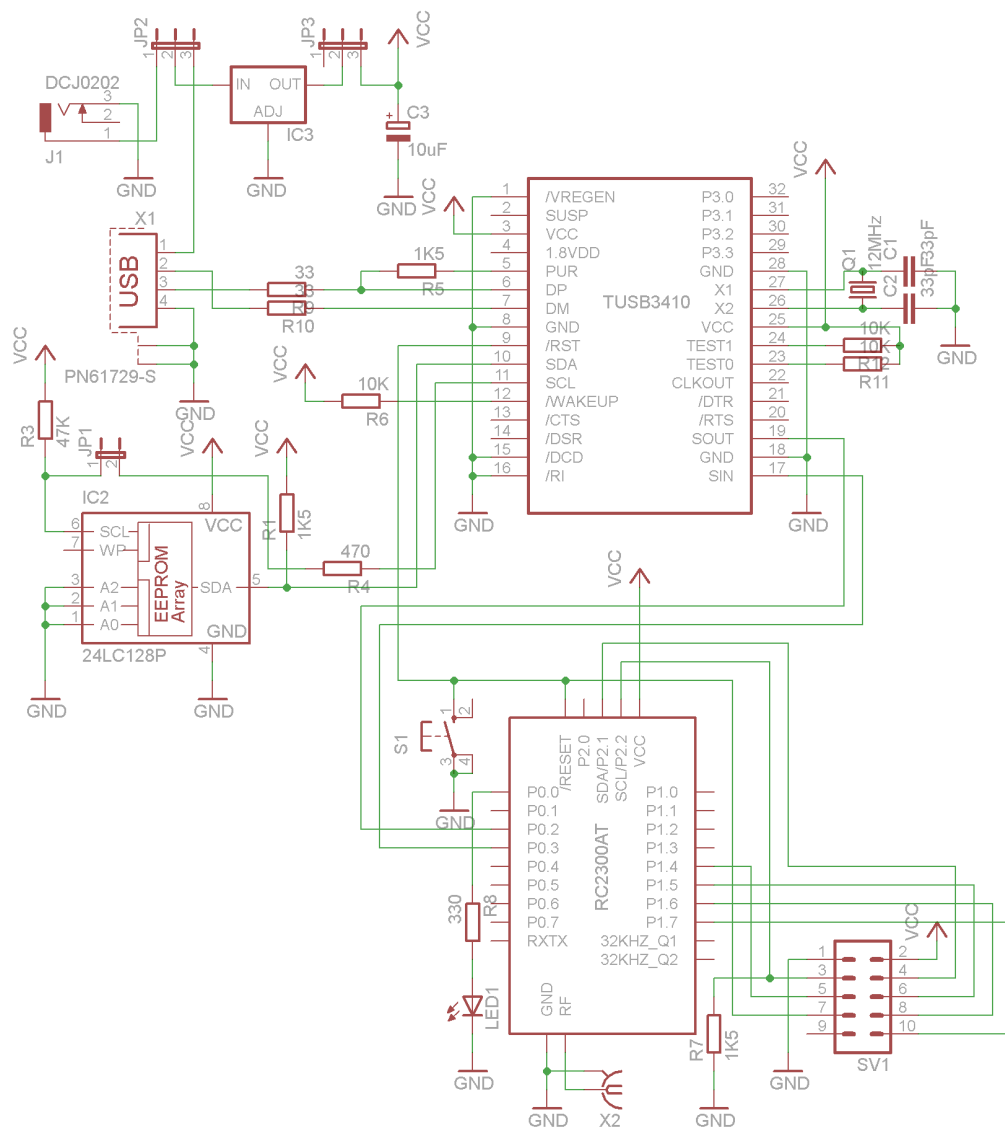


Figura 3.8: Esquema do Coordenador.

Este dispositivo possui três *jumpers* que permitem configurar certas funções deste. O *jumper* JP3 selecciona se se pretende que a alimentação seja feita por USB ou por uma fonte externa, para que o dispositivo possa ser utilizado mesmo que não se encontre ligado a um computador. Através do *jumper* JP2 é possível ligar ou desligar o dispositivo. O JP1 é utilizado para ligar ou desligar o clock da EEPROM, útil apenas para enviar um novo *firmware* para o TUSB3410.

Além destes *jumpers* estão implementados um botão de *reset*, um interface JTAG para permitir a programação do RC2300AT e um conector para uma antena externa.

O LED presente neste dispositivo permite obter informação sobre o estado do mesmo. Se o LED se encontrar aceso, o dispositivo encontra-se activo e com a rede ZigBee formada, pronta a receber novos dispositivos. Caso contrário significa que, ou o dispositivo se encontra a inicializar, ou surgiu algum problema e não foi possível a formação da rede.

O PCB deste dispositivo está apresentado no anexo A na figura A.1.

### 3.3.1 Comunicação com o computador

A comunicação com o computador é assegurada através de uma ligação USB, pois este é actualmente o interface mais utilizado em todos os computadores pessoais. Este tipo de ligação é capaz de substituir uma porta série com a vantagem de poder alimentar o periférico que se está a conectar ao computador.

A ligação USB permite que o computador detecte quando um dispositivo é conectado e consegue identificá-lo através dos identificadores VID(*Vendor ID*), que identifica o fabricante do dispositivo, e PID(*Product ID*), que identifica o dispositivo.

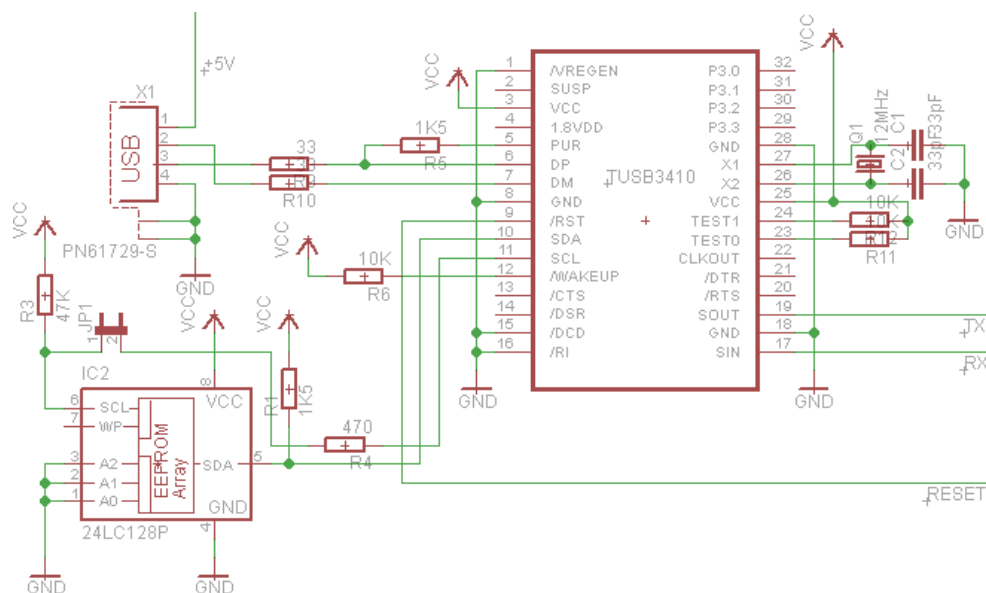


Figura 3.9: Esquema do TUSB3410.

Uma vez que o módulo RC2300AT não suporta USB, é necessário utilizar o TUSB3410 para fazer a conversão entre USB e porta série. O TUSB3410 [21] contém um microcontrolador 8052 com um interface USB, por sua vez este possui uma memória ROM com um *firmware* pré-programado, responsável por efectuar a conversão USB-porta série. Durante a inicialização do dispositivo, este carrega de uma EEPROM externa os descritores USB necessários para que o computador consiga identificar o dispositivo. No caso deste projecto a EEPROM em questão é a 24LC128.

Os identificadores utilizados são 0x0451 para o VID e 0x3410 para o PID, estes valores estão definidos por omissão no ficheiro de configuração do *firmware* da EEPROM.

A comunicação entre o Coordenador e o computador é feita através de tramas compostas por um identificador do comando, o tamanho de dados incluídos na trama em bytes, e um conjunto de dados que pode ou não ser incluído dependendo do comando.

### 3.4 Emissor/Receptor IR

O dispositivo emissor/receptor pode ter como base o *ZigBee End Device* ou o *ZigBee Router*. No caso do *ZigBee End Device* pode ser alimentado por baterias; já para o *ZigBee Router*, a alimentação terá de ser feita por uma fonte de alimentação externa. Este foi o factor decisivo para escolher o *ZigBee End Device* como base para os dois dispositivos construídos.

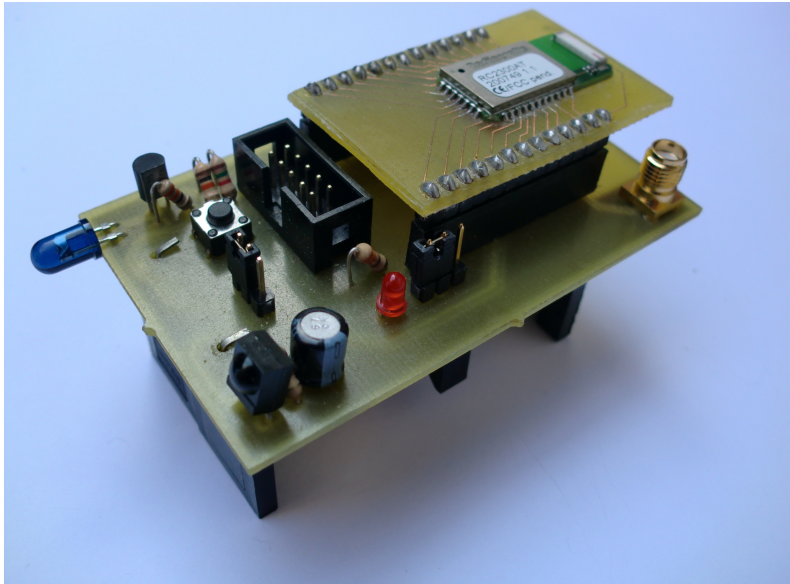


Figura 3.10: Fotografia do dispositivo Emissor/Receptor construído.

O esquema deste dispositivo baseado num *ZigBee End Device* é apresentado na figura 3.11.

Através do *jumper* JP1 é possível ligar ou desligar o dispositivo. O *jumper* JP2 permite seleccionar se este dispositivo vai actuar como um Receptor ou Emissor de infravermelhos.

Tal como no Coordenador, neste dispositivo também foi implementado um botão de *reset*, um interface JTAG para permitir a programação do RC2300AT, um conector para uma antena externa e um LED para indicar o estado do dispositivo. Uma vez que este dispositivo é alimentado através de baterias, o modo de funcionamento do LED é diferente do que no Coordenador, para reduzir o consumo energético. Se o LED se encontrar apagado e o dispositivo estiver ligado, tal significa que o dispositivo está associado a uma rede e está pronto a receber ou emitir um sinal infravermelho. Caso o LED se encontre ligado, então o dispositivo está a inicializar ou encontra-se fora do alcance da rede. Este LED também pisca sempre que o dispositivo recebe ou emite um sinal de infravermelhos, para sinalizar que este se encontra em funcionamento.

Para a emissão de infravermelhos foi utilizado um simples IRED (*Infrared Emitting Diode*) e um transístor para fornecer corrente suficiente para o mesmo. A modulação do sinal é realizada pela aplicação, ou seja, é aplicada a conversão que pode ser vista na figura 2.3.

Para a recepção de infravermelhos foi utilizado o receptor TSOP34836 [22], para desmodular o sinal. Este receptor é produzido pela Vishay Semiconductors e foi escolhido porque apresenta um baixo consumo energético, de apenas 0.7mA a 1.5mA, pode ser alimentado a partir de 3V,





## Capítulo 4

# Desenvolvimento das Aplicações

Este capítulo encontra-se dividido em duas secções. A primeira descreve o *software* que foi desenvolvido para os módulos RC2300AT utilizados em cada dispositivo. A segunda secção apresenta a aplicação desenvolvida para o computador, com a finalidade de comunicar com o Coordenador da rede.

### 4.1 Aplicação do RC2300AT

Nesta secção é apresentado o desenvolvimento e funcionamento do *software* desenvolvido para os três tipos de dispositivos que constituem este projecto. Apesar de a descrição do dispositivo Emissor e do Receptor se encontrarem em subsecções separadas, a aplicação destes dispositivos é a mesma para ambos, sendo a selecção do papel que este irá desempenhar feita durante a inicialização do dispositivo, dependendo da posição do *jumper* JP2.

#### 4.1.1 Desenvolvimento

O *software* dos dispositivos que constituem este projecto foram desenvolvidos com recurso ao Z-Stack [8]. O Z-Stack é uma implementação em *software* da pilha ZigBee desenvolvida pela Texas Instruments, destinada a ser utilizada em dispositivos baseados no microcontrolador 8051 ou MSP430.

Esta implementação é escrita em linguagem C e define todas as camadas da pilha ZigBee, à excepção da camada PHY que é implementada ao nível do hardware. Além das camadas ZigBee implementadas, está também implementada uma camada HAL (*Hardware Abstraction Layer*) que disponibiliza funções para simplificar a configuração e utilização dos periféricos do microcontrolador, bem como a gestão de energia do dispositivo no caso do *ZigBee End Device*. A aplicação de cada dispositivo foi desenvolvida no *endpoint* 1 da pilha ZigBee.

O *software* dos dispositivos começou por ser desenvolvido com o kit de desenvolvimento CC2431DK. Nesta fase foram definidos os *clusters* de cada dispositivo. Um cluster pode ser visto

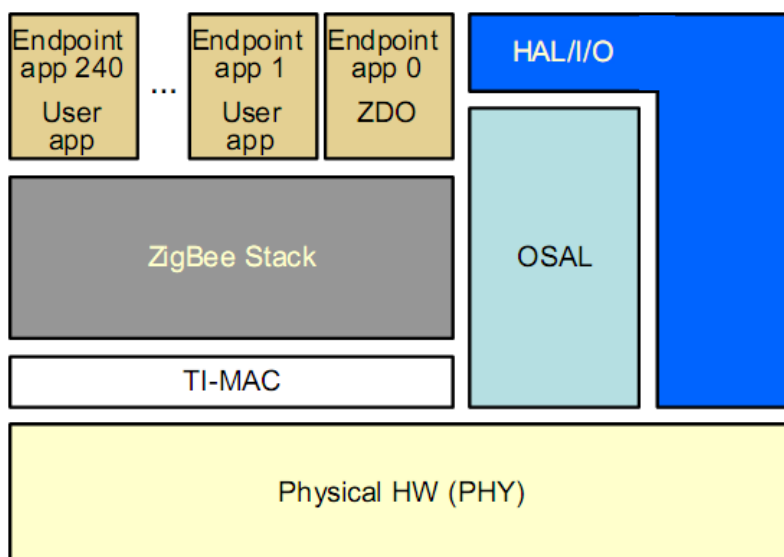


Figura 4.1: Implementação Z-Stack. [8]

como um identificador do conteúdo da mensagem, ou seja, indica ao dispositivo que recebe uma mensagem o que fazer com os dados nela contidos. Além de se definirem os *clusters*, foi também estudado um método para realizar a extensão de um sinal de infravermelhos através da rede.

Concluiu-se que esta não pode ser feita através do envio de uma mensagem por cada trama de infravermelhos recebida porque, no caso de o utilizador premir uma tecla no controlo remoto e mantê-la premida, irá haver uma repetição da mesma trama a cada 113,792ms, segundo o protocolo RC5. Isto torna-se muito pesado para a rede e conseqüentemente alguns dispositivos seriam desconectados por não conseguirem comunicar com o coordenador. Então, a abordagem passou por enviar uma mensagem para a rede quando é detectada a primeira trama, para que todos os emissores comecem a emitir essa mesma trama e a repeti-la a cada 113,792ms; quando não se receber uma trama por mais de 130ms, é enviada outra mensagem para que todos os emissores cessem imediatamente a emissão. De modo a reduzir a carga para a rede que acarreta o envio de uma mensagem por cada um dos dispositivos de destino, é enviada apenas uma mensagem *broadcast* que é recebida por todos os dispositivos da rede. Isto possibilita a utilização de vários dispositivos receptores e emissores sem que sejam notados problemas de congestionamento na rede. Também poderia ser utilizado o endereçamento de grupo (em que um grupo continha todos os emissores e o coordenador), mas neste caso os dispositivos baseados no *ZigBee End Device* poderiam não receber a mensagem, caso estes se encontrassem adormecidos quando esta fosse enviada.

Além da funcionalidade de extensão de infravermelhos, também foi implementado um método que permite ao *software* do computador obter informação sobre o estado de todos os dispositivos da rede, contendo esta os endereços e a função do dispositivo, bem como o endereço do dispositivo pai, a qualidade da ligação e a tensão das baterias. Esta informação é obtida através do envio de uma mensagem com endereçamento *broadcast* para todos os dispositivos da rede, à qual todos os

dispositivos respondem directamente para o coordenador.

#### 4.1.2 Coordenador

O Coordenador da rede é responsável pela criação da rede ZigBee e estabelecer a comunicação entre os dispositivos da rede e o computador. Uma vez que este dispositivo se baseia num *ZigBee Coordinator*, ele passa grande parte do seu tempo de funcionamento a realizar operações de gestão da rede. No entanto, como pode ser visto na figura 4.2, estas são interrompidas quando o dispositivo recebe dados pela porta série ou quando recebe dados vindos de outros dispositivos da rede.

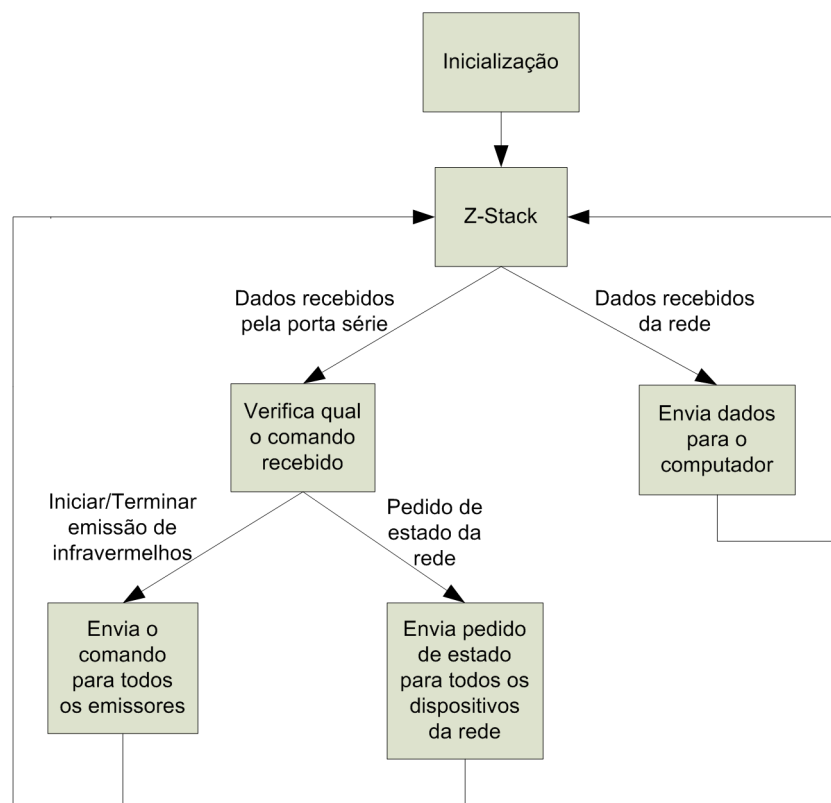


Figura 4.2: Funcionamento do Coordenador.

Os dados recebidos pela porta série representam um comando, que podem ser para enviar comandos de infravermelhos, que quando este é recebido, deve ser enviada uma mensagem em *broadcast* para todos os emissores, ou pode ser um pedido de informação dos dispositivos da rede, que quando este é recebido, deve ser enviado um pedido de estado em *broadcast* para todos os dispositivos da rede. Os dados recebidos da rede, podem ser comandos de infravermelhos ou informações sobre o estado de um determinado dispositivo. Em qualquer destes casos estes dados recebidos são reencaminhados para o computador.

A comunicação com o computador é estabelecida através da porta série 0 do módulo RC2300AT a um *baud rate* de 38400 baud e os dados são enviados em tramas, constituídas por um identificador do comando a ser enviado, o tamanho de dados incluídos na trama em bytes e um conjunto de dados que pode ou não ser incluído dependendo do comando, como pode ser visto na figura 4.3.

Comando (1 byte)	Tamanho (1 byte)	Dados (Tamanho bytes)
---------------------	---------------------	--------------------------

Figura 4.3: Descrição da trama de dados para comandos sobre a porta série.

Estão definidos seis comandos para serem utilizados através da porta série, em que os identificadores são, nomeadamente 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Os comandos com identificador de 1 a 4 são utilizados pelo computador, os restantes 5 e 6 são utilizados pelo Coordenador.

- Comando 1 - Este comando é utilizado pelo computador para enviar comandos de infravermelhos, com um tamanho de dois bytes, enviado na zona de dados da trama. Quando o Coordenador recebe este comando, envia uma mensagem para todos os emissores com a indicação de iniciarem a emissão do comando de infravermelhos.
- Comando 2 - É utilizado para marcar o fim da repetição do comando de infravermelhos, enviado anteriormente com o comando 1. Este comando é enviado sem quaisquer dados extra. Aquando da recepção pelo Coordenador, este deve enviar uma mensagem em *broadcast* para todos os emissores da rede.
- Comando 3 - Este comando é utilizado quando está a ser executada uma macro no computador, para enviar uma mensagem a todos os emissores para que estes emitam um comando de infravermelhos apenas uma vez. Tal como no comando 1, o comando de infravermelhos é enviado na zona de dados da trama.
- Comando 4 - O comando 4 é utilizado para realizar o pedido de informação a todos os dispositivos da rede. Tal como no comando 2, este também não contém quaisquer dados extra, pois a sua finalidade é de apenas ordenar o Coordenador a enviar uma mensagem em *broadcast* para todos os dispositivos da rede.
- Comando 5 - O Coordenador utiliza este comando para enviar para o computador a informação de um determinado dispositivo, que é recebida após o pedido de informação enviado pelo comando 4, sendo esta incluída na secção de dados da trama.
- Comando 6 - Este comando é utilizado pelo Coordenador quando um receptor envia para a rede uma mensagem destinada a este e a todos os emissores, indicando a detecção de um novo comando de infravermelhos. O comando de infravermelhos recebido e o endereço de rede do receptor que o detectou, são incluídos na zona de dados.

No que diz respeito à comunicação entre a aplicação e os restantes dispositivos da rede, esta é feita através de um *endpoint* constituído por seis *clusters*, dois de entrada e quatro de saída. Os *clusters* que constituem o *endpoint* do Coordenador e a sua função podem ser vistas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: *Clusters* do *endpoint* 1 do Coordenador.

Cluster	Sentido	Função
START_IR_CMD	Saída	Enviar comandos de infravermelhos a partir do computador, é enviada para todos os emissores de infravermelhos da rede, para que estes iniciem a emissão do sinal.
STOP_IR_CMD	Saída	Esta é utilizada para enviar mensagens para todos os emissores de infravermelhos da rede, para que estes parem a emissão do sinal infravermelho.
SEND_IR_CMD	Saída	É utilizada para enviar mensagens para todos os emissores de infravermelhos da rede, para que estes enviem apenas um sinal de infravermelhos.
STATUS_REQ	Saída	Permite enviar mensagens a pedir a informação sobre o estado de um dispositivo. Estas mensagens são utilizadas para que o computador tenha uma lista de todos os dispositivos da rede e do estado de cada um.
START_IR_CMD	Entrada	Recebe os dados que são enviados por um receptor de infravermelhos, quando este detecta um sinal de infravermelhos. Os dados recebidos são enviados para o computador, para que este os guarde no registo da rede.
STATUS_RSP	Entrada	Esta recebe a informação sobre o estado de um determinado dispositivo após ter sido enviado o pedido STATUS_RSP. A informação recebida numa mensagem deste tipo é imediatamente enviada para o computador.

### 4.1.3 Emissor IR

A finalidade do Emissor de infravermelhos é a de se conectar à rede ZigBee e esperar pelos comandos recebidos da rede. Tal facto permite que este dispositivo possa ter como base um *ZigBee End Device*. No entanto, como este dispositivo se encontra a maior parte do tempo em modo adormecido para reduzir o consumo energético, pode originar problemas de latência elevada entre o Receptor receber um comando de infravermelhos e o emissor começar a transmiti-lo, visto que a transferência de dados entre este dispositivo e a rede só é feita quando este se encontra activo. O tempo que o dispositivo se encontra adormecido é determinado pelo *poll rate*, definido para

150ms para reduzir a latência. Este valor foi seleccionado porque apresenta uma latência e um consumo energético aceitáveis. No entanto é possível reduzir ainda mais a latência, mas isto iria aumentar o consumo energético. Esta funcionalidade é controlada pelo Z-Stack, sendo a aplicação desenvolvida apenas responsável por responder aos comandos recebidos.

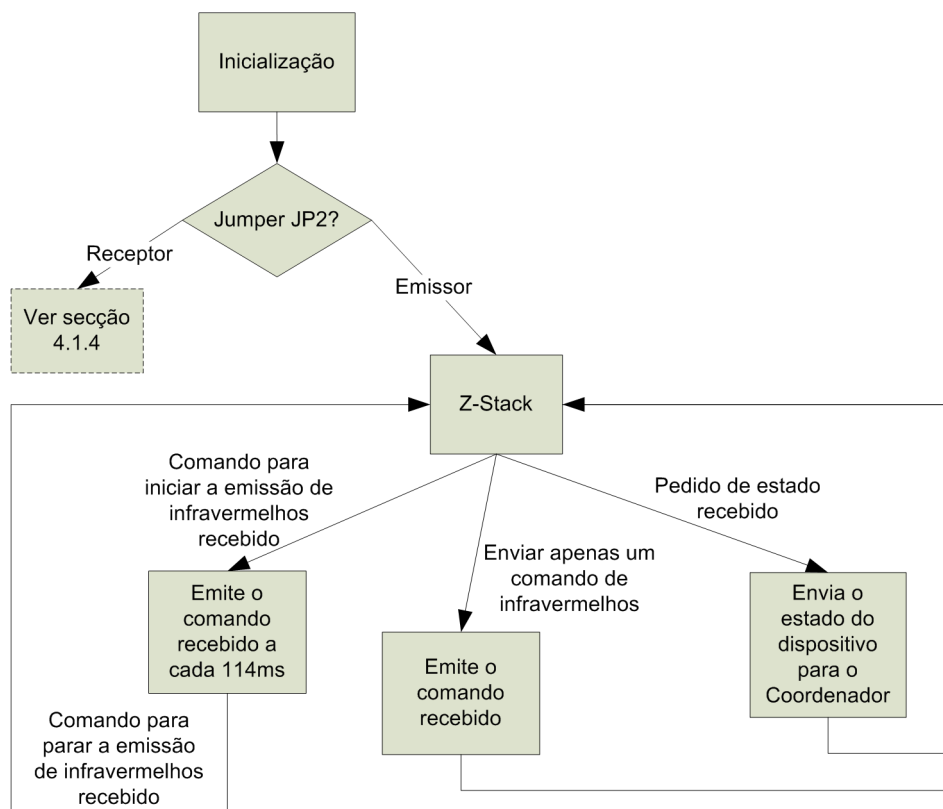


Figura 4.4: Diagrama de funcionamento do Emissor.

Como pode ser visto no diagrama de funcionamento, o dispositivo passa a maior parte do tempo a executar operações relativas ao Z-Stack, sendo apenas interrompido quando recebe comandos da rede.

Quando este dispositivo recebe um comando de pedido de informação sobre o seu estado, este as informações necessárias como o próprio endereço IEEE, o endereço de rede, a tensão da bateria, a qualidade de ligação e informação sobre a função actual do dispositivo, bem como o endereço IEEE do dispositivo pai e envia-as ao Coordenador.

Se um comando para enviar apenas um comando de infravermelhos for recebido, o dispositivo procede à emissão deste e de seguida torna a esperar por outro comando da rede.

No caso de receber um comando para iniciar a emissão de infravermelhos com repetição, este dispositivo activa um temporizador para que a emissão seja repetida a cada 114ms. A verificação se o dispositivo pai contém mensagens pendentes deixa de ser controlada pelo Z-Stack durante este processo, passando esta tarefa a ser executada imediatamente a seguir ao envio de cada sinal infravermelho. Assim evita-se que a emissão se sobreponha com esta tarefa, o que levaria a adiar

a emissão não cumprindo o requisito de repetir a emissão do sinal infravermelho a cada 114ms. Este processo de emissão do sinal infravermelho é terminado, logo que seja recebido um comando da rede que assim o indique, tornando a tarefa de verificação de mensagens a ser controlada pelo Z-Stack.

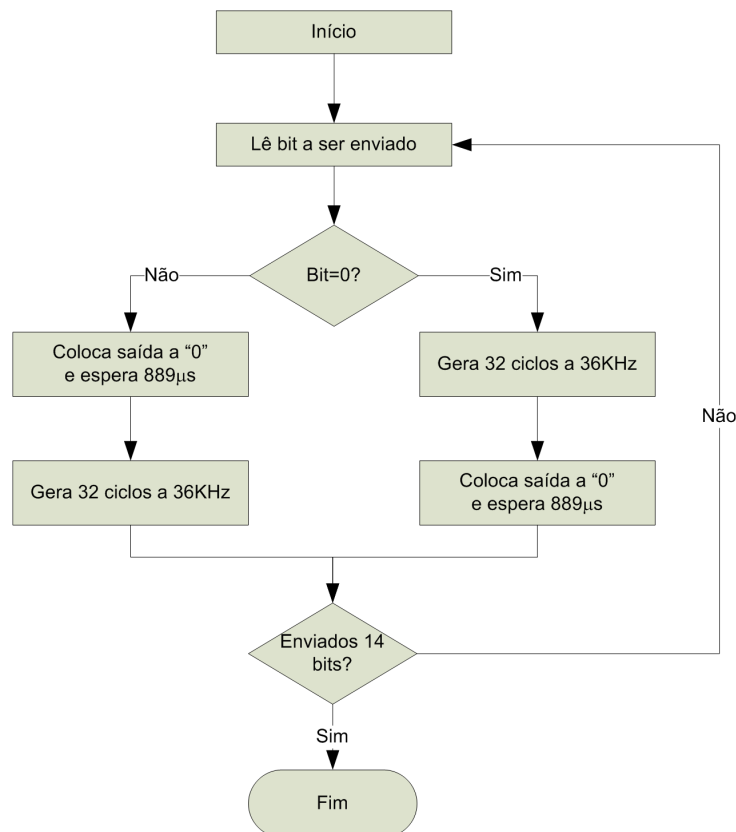


Figura 4.5: Envio de um sinal infravermelho.

Na figura 4.5 encontram-se descritos os passos necessários para enviar um sinal de infravermelhos. Para realizar este processo foi desenvolvida uma função para ler o comando a ser enviado bit a bit, codificando-o segundo a codificação Manchester. As temporizações de espera necessárias para realizar esta conversão são asseguradas utilizando uma função para este fim, fornecida pelo Z-Stack sem recorrer aos temporizadores do microcontrolador. No caso do dispositivo se encontrar a realizar a emissão do sinal infravermelho com repetição a cada 114ms, após o envio do mesmo, é chamada uma função do Z-Stack que executa a tarefa de verificar se o dispositivo pai tem mensagens pendentes. Isto é fundamental, pois neste caso esta tarefa não é executada automaticamente pelo Z-Stack.

A comunicação com os restantes dispositivos da rede é feita através de um *endpoint* constituído por cinco *clusters*, um de saída e quatro de entrada. A descrição destes *clusters* é apresentada na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Clusters do *endpoint* 1 do Emissor.

Cluster	Sentido	Função
STATUS_RSP	Saída	É utilizada para responder a um pedido de estado STATUS_REQ.
START_IR_CMD	Entrada	Quando é recebida uma mensagem START_IR_CMD, o dispositivo deve começar a realizar a emissão do comando incluído na mensagem e repeti-lo a cada 114ms.
STOP_IR_CMD	Entrada	Quando é recebida uma mensagem deste tipo, o dispositivo deve parar de enviar sinais infravermelhos.
SEND_IR_CMD	Entrada	Quando é recebida uma mensagem deste tipo, o dispositivo envia o comando infravermelhos nela contido.
STATUS_REQ	Entrada	Quando é recebida uma mensagem deste tipo, o dispositivo deve enviar uma mensagem STATUS_RSP ao Coordenador com informação sobre o seu estado.

#### 4.1.4 Receptor IR

O Receptor de infravermelhos tem a finalidade de se conectar à rede ZigBee e aguardar a recepção de comandos de infravermelhos. Tal facto permite que este dispositivo possa ter como base um *ZigBee End Device*.

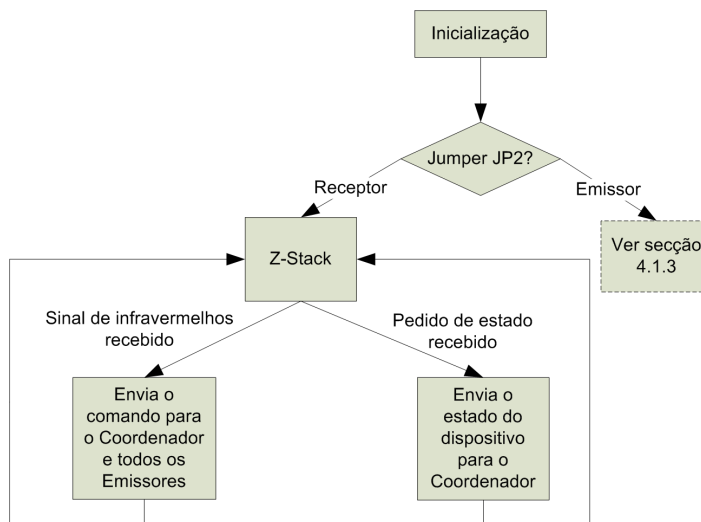


Figura 4.6: Diagrama de funcionamento do Receptor.

Uma vez que a detecção de um sinal infravermelho é feita através da interrupção externa 0, permite que o dispositivo possa estar longos espaços de tempo adormecido sem que seja afectada a latência existente entre a detecção de um sinal infravermelho pelo Receptor e o início da emissão

do mesmo por um Emissor. Isto permite reduzir bastante o consumo energético, no entanto este tempo tem de ser definido aquando a programação do dispositivo, o que implica que este seja o mesmo tanto para o Emissor como para o receptor. Sendo assim o dispositivo Receptor tem um *poll rate* de 150ms imposto pelo Emissor.

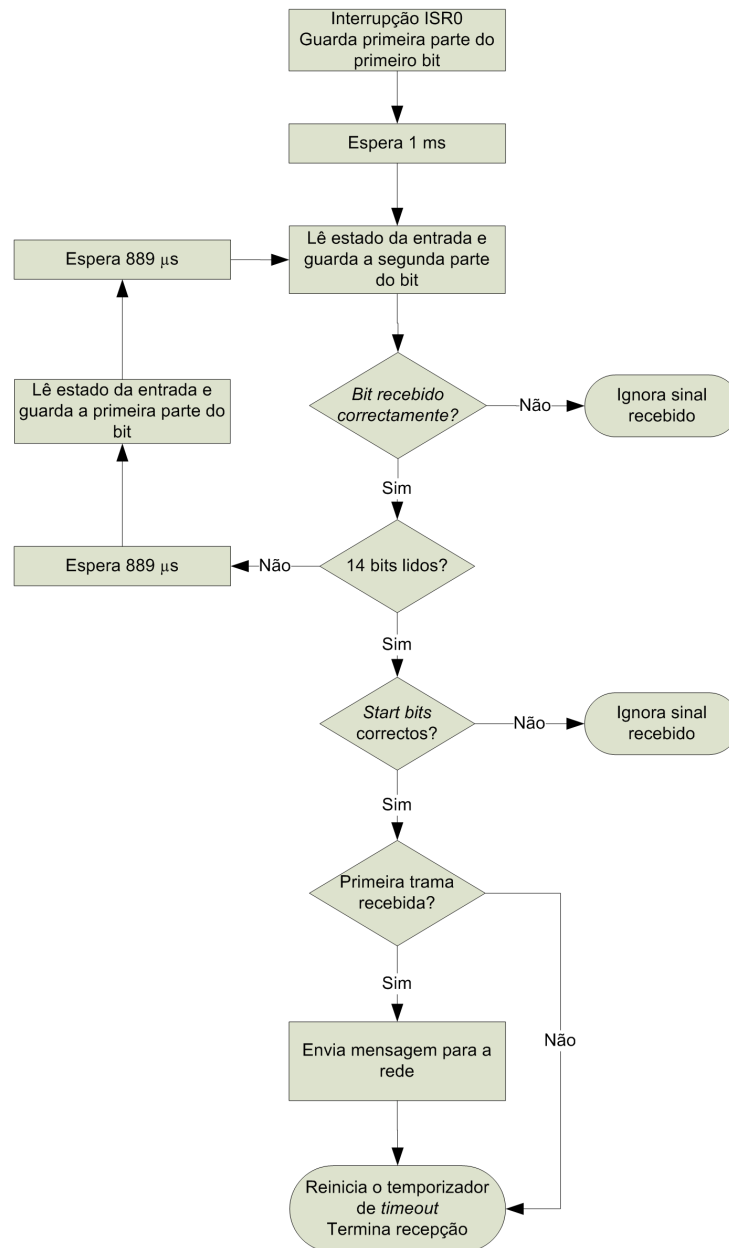


Figura 4.7: Descodificação de um sinal de infravermelhos recebido.

Quando um sinal de infravermelho é recebido, é activada a interrupção da porta 0 do RC2300AT e assim é iniciado o processo de descodificação deste sinal, que consiste em utilizar o temporizador HAL\_TIMER\_3 fornecido pela camada HAL do Z-Stack para, após a ocorrência da interrupção, fazer uma leitura periódica do valor do pino P0\_3, através do qual o sinal infravermelho é re-

cebido. O primeiro intervalo de tempo após a ocorrência da interrupção é de 1ms, para que as próximas leituras se afastem ligeiramente do instante de transição do sinal, com o objectivo de reduzir possíveis erros de leitura que daí poderiam surgir. Os restantes intervalos de tempo são de  $889\mu\text{s}$ , que corresponde a meia duração de um bit do protocolo RC5 a 36KHz. Estes intervalos de tempo são utilizados para que possa ser feita a leitura das duas metades que compõem um bit, no código Manchester. Para que o bit seja considerado válido, ambas as partes deverão ser diferentes, caso contrário o sinal recebido é ignorado.

Após a recepção do sinal infravermelho, e se este foi o primeiro sinal recebido, o mesmo é enviado numa mensagem em *broadcast* para o Coordenador e todos os Emissores, para que estes últimos iniciem a emissão do sinal recebido; também é activado um temporizador de 130ms que é reiniciado sempre que é recebida a mesma trama repetida. Se este temporizador não for reiniciado e um *timeout* ocorrer, é considerado que não se vão receber mais tramas e é enviada uma mensagem para todos os Emissores da rede para que estes também cessem a emissão desta.

No que diz respeito à comunicação entre este dispositivo e a rede, esta é feita através de um *endpoint* constituído por quatro *clusters*, três de saída e um de entrada. A descrição destes *clusters* é apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3: *Clusters* do *endpoint* 1 do Receptor.

Cluster	Sentido	Descrição
START_IR_CMD	Saída	Quando uma trama de infravermelhos é recebida, é enviada uma mensagem desta <i>cluster</i> para o grupo de emissores, para que estes iniciem a emissão.
STOP_IR_CMD	Saída	É utilizada sempre que o dispositivo deixa de receber comandos de infravermelhos durante mais de 130ms.
STATUS_RSP	Saída	Utilizada para responder a um pedido de estado STATUS_REQ.
STATUS_REQ	Entrada	Quando é recebida uma mensagem deste tipo, o dispositivo deve enviar uma mensagem STATUS_RSP ao Coordenador com informação sobre o seu estado.

## 4.2 Aplicação do computador

Nesta secção é apresentada a aplicação desenvolvida para comunicar com o Coordenador da rede, através de uma ligação USB com o Coordenador da rede.

Esta aplicação foi desenvolvida com o Microsoft Visual Studio 2008, e funciona em computadores com o sistema operativo Microsoft Windows. As funções que esta realiza são de monitorização da rede ZigBee e envio de comandos de infravermelhos para os emissores. Esta aplicação

fornece três funcionalidades, sendo estas um comando, um editor de macros e informações sobre a rede ZigBee.

### 4.2.1 Interface

Quando a aplicação é iniciada, é criado um ícone na área de notificação da barra de tarefas, que indica se o Coordenador se encontra ligado ao computador e permite aceder às funcionalidades. As funcionalidades apenas estão disponíveis quando o Coordenador se encontra ligado ao computador.

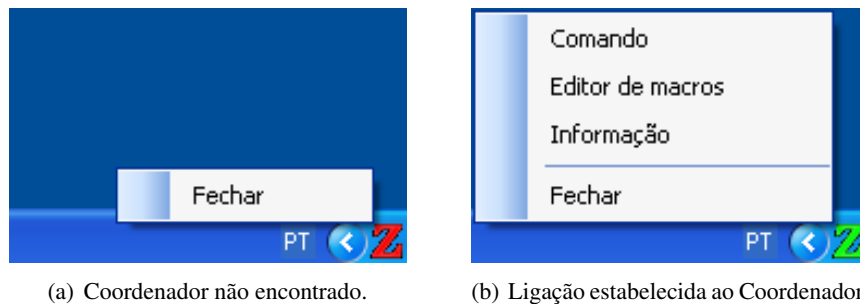


Figura 4.8: Ícones de notificação da aplicação.

A ligação ao Coordenador é estabelecida assim que este é detectado, sem que o utilizador necessite de efectuar alguma configuração. O processo de detecção consiste em verificar quais os dispositivos USB existentes no computador com os identificadores VID e PID iguais aos do Coordenador (VID = 0x0451 e PID = 0x3410). De seguida é verificado qual desses dispositivos encontrados está disponível, ao qual é estabelecida a ligação e, é disponibilizado ao utilizador o acesso a todas as funcionalidades do programa.

### 4.2.2 Comando

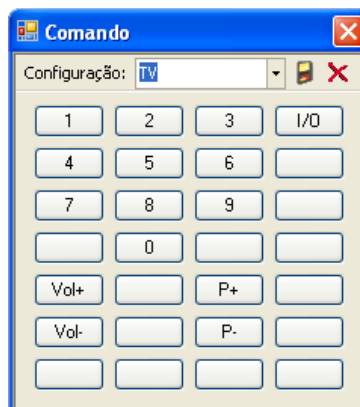


Figura 4.9: Comando.

O comando possui 28 botões que podem ser configurados para enviar comandos de infravermelhos ou executar macros. A configuração do comando que se pretende utilizar pode ser seleccionada na lista que se encontra no topo do comando. No caso de um botão estar configurado para enviar um comando de infravermelhos, este comporta-se como um controlo remoto convencional, ou seja, enquanto o botão estiver premido, são emitidos comandos de infravermelhos a cada 114ms. No caso do botão estar configurado para executar uma macro, quando este é clicado, surge uma janela a indicar o estado da execução da macro e permite cancelar a mesma a qualquer altura.

Para configurar a função de cada tecla, basta clicar com o botão direito do rato na tecla que se pretende configurar, e de seguida surge uma janela que permite configurar a tecla.

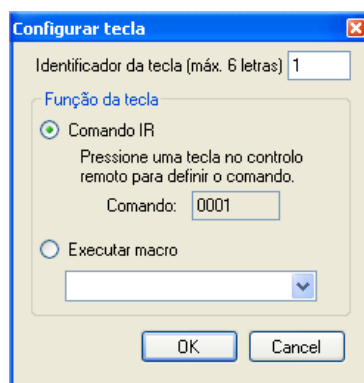


Figura 4.10: Configuração do comando.

Nesta janela pode-se definir o nome do botão, bem como a função que este vai realizar. Para se configurar o botão para enviar um comando de infravermelhos, deve ser seleccionada a opção Comando IR e de seguida deve ser pressionada uma tecla de um controlo remoto, apontando este a um dispositivo Receptor, para definir o comando utilizado pelo botão. Para o caso de se configurar o botão para executar uma macro, deve ser seleccionada a opção Executar macro e escolher a macro que se pretende executar a partir da lista de macros criadas previamente com o Editor de macros. Após a configuração do comando estar concluída, esta pode ser guardada, bastando para isso escrever o nome que se pretende atribuir à configuração e depois clicar no botão Guardar.

### 4.2.3 Editor de macros

As macros são conjuntos de funções definidas pelo utilizador. Existem apenas duas funções para criar uma macro, uma permite enviar comandos de infravermelhos que pode ser definido quantas vezes o comando é enviado e o intervalo de tempo entre repetições, e a outra permite criar tempos de espera. Esta última permite definir tempos de espera desde 1 segundo, até 9 horas, 59 minutos e 59 segundos. Isto permite que o utilizador possa automatizar certas funções sem que seja necessário o controlo manual, por exemplo, uma macro pode colocar um gravador de DVD em modo de gravação e terminar esta após um determinado tempo definido pelo utilizador.

O editor de macros permite criar novas macros, bem como editar macros previamente guardadas. A lista de macros existentes está disponível no topo do editor juntamente com os botões

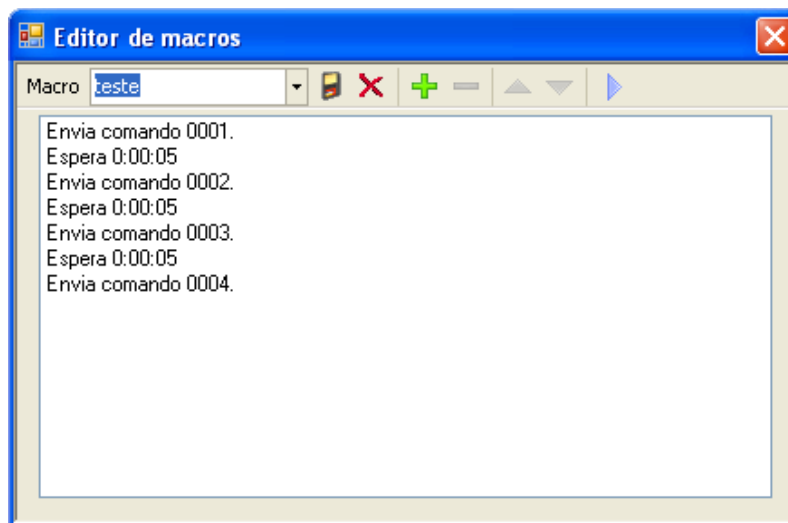


Figura 4.11: Editor de macros.

de edição da macro. Estes botões permitem adicionar ou remover uma função da macro, trocar a posição de funções já inseridas e executar a macro que se encontra a ser editada. Quando se pressiona no botão Adicionar função, é apresentada uma janela que permite seleccionar entre as duas funções disponíveis. Para o caso de se adicionar a função de enviar um comando de infravermelhos, o comando a ser enviado deve ser definido do mesmo modo que se define na configuração do comando.

#### 4.2.4 Informação da rede

A última funcionalidade da aplicação é a Informação da rede, que é apresentada na figura 4.12.

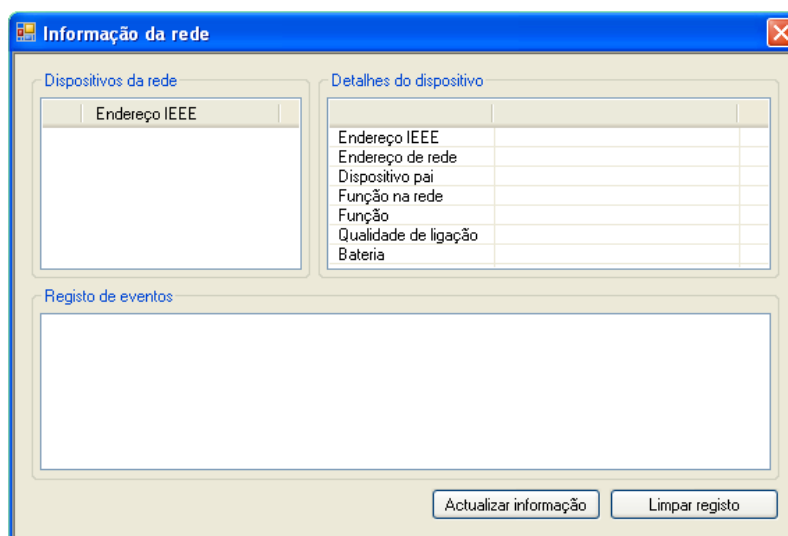


Figura 4.12: Informação da rede.

Esta funcionalidade permite visualizar o registo de eventos da rede e também o estado de cada dispositivo da rede. Para se visualizar informação sobre os dispositivos da rede, é necessário pressionar o botão Actualizar informação. Os dispositivos que apresentados na lista de dispositivos de rede são ordenados pela função que desempenham, Coordenador, Receptor de infravermelhos e Emissor de infravermelhos. Ao seleccionar um dispositivo da lista são apresentadas as informações: endereço IEEE, endereço de rede, endereço IEEE do dispositivo pai, função na rede ZigBee, tipo de dispositivo, qualidade de ligação e bateria. Esta função é útil para verificar se um dispositivo necessita de baterias novas, bem como para a qualidade da conexão entre os dispositivos, que para o caso de ser baixa pode ser introduzido um *ZigBee Router* para que esta melhore.

## Capítulo 5

# Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes efectuados aos dispositivos desenvolvidos, nomeadamente: um teste de alcance para avaliar a distância a que os dispositivos podem comunicar sem que o funcionamento da rede seja comprometido; um teste para verificar qual o melhor canal a ser utilizado para a rede ZigBee projectada; o consumo dos dispositivos Emissor e Receptor de infravermelhos, para estimar a duração das baterias que os alimentam.

### 5.1 Alcance

Este teste consiste em enviar 1000 pacotes de dados entre um *ZigBee Coordinator* e um *ZigBee Router* e contabilizar quantos desses pacotes foram perdidos e calcular o LQI médio durante este processo. O valor de LQI varia entre 0 e 255 e indica a qualidade de ligação. Para realizar este teste foi necessário desenvolver uma aplicação para os dispositivos que cumprisse estes requisitos. A aplicação do Router tem como única função enviar para o Coordenador o valor da qualidade da ligação lido quando recebe a mensagem de teste. A aplicação do Coordenador é responsável por enviar as mensagens ao Router e aguardar a confirmação de recepção das mesmas, incrementando o contador de erros por cada confirmação que não seja recebida. Por cada mensagem recebida do Router com um valor de LQI, esta é enviada para o computador, o qual é responsável por calcular a média destes valores. Quando todos os pacotes são enviados, o Coordenador envia o resultado do teste ao computador.

Estes testes foram conduzidos num ambiente que não possuía qualquer tipo de actividade de redes situada na faixa dos 2.4GHz, para reduzir a possibilidade de interferência entre estas e sem nenhum obstáculo entre os dispositivos. Foram realizados com e sem antena externa nos dispositivos, para as distâncias de 5m, 10m, 15m, 20m e 25m, sendo o teste realizado cinco vezes para cada uma destas distâncias. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas [5.1](#) e [5.2](#).

Tabela 5.1: Resultados do teste com o dispositivo a utilizar uma antena externa.

Número	5m		10m		15m		20m		25m	
	Erros	LQI	Erros	LQI	Erros	LQI	Erros	LQI	Erros	LQI
1	0	48.9	0	42.4	0	16.0	0	11.4	0	1.4
2	0	51.9	0	39.5	0	16.5	0	15.3	1	2.2
3	0	48.3	0	41.4	0	14.3	0	14.3	0	1.8
4	0	51.2	0	40.2	0	16.6	0	14.0	0	0.6
5	0	47.4	0	41.3	0	17.8	0	17.8	0	1.1

Tabela 5.2: Resultados do teste com o dispositivo a utilizar apenas a antena do módulo RC2300AT.

Número	5m		10m		15m		20m		25m	
	Erros	LQI	Erros	LQI	Erros	LQI	Erros	LQI	Erros	LQI
1	0	47.8	0	37.3	0	12.3	0	8.3	7	0.0
2	0	43.3	0	38.6	0	13.8	0	10.4	6	0.0
3	0	44.1	0	32.8	0	14.7	0	10.9	10	0.0
4	0	39.4	0	35.5	0	14.4	0	9.5	0	0.0
5	0	40.4	0	33.3	0	12.2	0	9.2	18	0.0

Com base nos resultados, pode-se concluir que as antenas embutidas nos módulos RC2300AT apresentam um bom desempenho, não ocorrendo nenhum erro de transmissão até uma distância de 20m. No entanto, para distâncias superiores a 20m é aconselhável o recurso a uma antena externa.

## 5.2 Interferências com redes IEEE 802.11

Como foi referido na secção 3.2, durante o desenvolvimento do projecto foram detectadas interferências entre a rede ZigBee, a operar no canal 11, e uma rede IEEE 802.11, a operar no canal 1. Estes canais encontram-se sobrepostos como pode ser visto na figura 2.10.

Com base nestes factos foi efectuado este teste, com o objectivo de confirmar a ocorrência de interferências entre canais IEEE 802.15.4 e canais IEEE 802.11, que se encontrem sobrepostos. Para tal foi utilizada a aplicação desenvolvida para o teste de alcance descrito na secção anterior, com os dispositivos a uma distância de 5m entre eles e sem a utilização da antena externa, visto que a antena embutida no RC2300AT demonstrou bons resultados para a distância seleccionada. O teste foi efectuado entre três canais ZigBee: o canal 11 que se encontrava sobreposto com o canal 1 da rede Wireless, o canal 15 que se encontra entre o canal 1 e o canal 6 da rede Wireless e o canal 26 que este canal é o que se encontra mais afastado dos canais de redes IEEE 802.11. O teste foi realizado cinco vezes para cada canal e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados do teste de interferências.

Número	Canal 11	Canal 15	Canal 26
1	44	0	0
2	85	0	0
3	73	0	0
4	90	0	0
5	102	0	0
Média	78.8	0	0

Após uma leitura dos resultados obtidos é possível verificar que para os testes efectuados no canal 11 ocorreu uma perda significativa de pacotes, comparativamente aos resultados obtidos nos testes dos canais 15 e 26. Tal facto permite concluir que as redes ZigBee são deveras afectadas por interferências de redes IEEE 802.11, apenas quando operam em canais que se sobreponham. Para os restantes canais, nomeadamente o 15, 20, 25 e 26, não é sofrido qualquer tipo de interferência.

### 5.3 Consumo energético

As medições de consumo foram realizadas apenas ao dispositivo baseado no *ZigBee End Device*, o Emissor/Receptor de infravermelhos, uma vez que este é o único a ser alimentado por baterias. Para determinar a corrente consumida foi introduzida uma resistência de  $10\Omega$  em série entre a bateria e o dispositivo, medindo de seguida a queda de tensão nessa resistência com um osciloscópio. Deste modo é possível obter a medição da corrente em função do tempo.

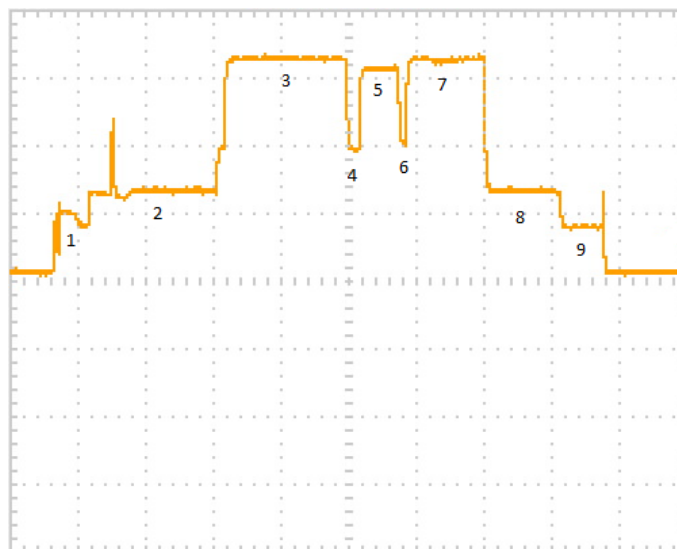


Figura 5.1: Consumo de um Emissor/Receptor durante o processo de verificação se o dispositivo pai tem mensagens pendentes. Base de tempo 1ms/div e 100mV/div.

Quando o dispositivo se encontra adormecido durante 150ms, que corresponde ao *poll rate*, a corrente consumida é de 0.8mA, desta corrente apenas 0.5μA são consumidos pelo RC2300AT, a restante é consumida pelo restante *hardware*, principalmente pelo TSOP34836. Após este tempo, o dispositivo acorda para verificar se o dispositivo pai tem mensagens pendentes. A corrente consumida durante este processo é apresentada na figura 5.1.

A corrente consumida e a duração dos intervalos de tempo marcados na figura 5.1 são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Corrente consumida e duração dos intervalos de tempo identificados na figura 5.1.

Intervalo	Descrição	Corrente	Duração
1	Microcontrolador a 16MHz.	9mA	0.5ms
2	Microcontrolador a 32MHz.	13.5mA	1.8ms
3	Algoritmo CSMA/CA. Rádio em modo de recepção.	33mA	1ms
4	Rádio a mudar de modo de recepção para transmissão.	20mA	0.2ms
5	Transmissão de um pacote.	32mA	0.6ms
6	Rádio a mudar de modo de transmissão para recepção.	20mA	0.1ms
7	Recepção de um pacote do dispositivo pai.	33mA	1.2ms
8	Processamento do pacote.	13.5mA	1.1ms
9	Microcontrolador a 16MHz.	8mA	0.6ms

A duração do intervalo de tempo 3 apresentada na tabela 5.4, quando o dispositivo executa o algoritmo CSMA/CA, não corresponde ao valor medido na figura 5.1. Isto porque a duração da execução do algoritmo CSMA/CA pode variar dependendo do ruído do canal. Devido a este facto foi efectuada uma média de 20 medições da qual se obteve uma duração média de 1ms.

O consumo total deste dispositivo é calculado através da soma dos valores apresentados na tabela 5.4, incluindo o consumo efectuado enquanto o RC2300AT se encontra adormecido.

$$9mA \times 0.5ms + 13.5mA \times 1.8ms + 33mA \times 1ms + 20mA \times 0.2ms + 32mA \times 0.6ms + 20mA \times 0.1ms + 33mA \times 1.2ms + 13.5mA \times 1.1ms + 8mA \times 0.6ms + 0.8mA \times 142.9ms = 282.8mA.ms \quad (5.1)$$

A corrente consumida por dia é dada pelo cálculo:

$$\frac{282.8mA.ms \times \left(\frac{1000}{150}\right) \times 60 \times 60 \times 24}{3600 \times 1000} = 45.248mAh/dia \quad (5.2)$$

No caso do dispositivo ser alimentado por duas baterias AA com uma capacidade de 2400mAh, a duração destas seria de:

$$\frac{2400}{45.248} \approx 53 \text{ dias} \quad (5.3)$$

Este resultado pode ser considerado bastante razoável, visto que o dispositivo TSOP34836 se encontra constantemente no estado activo.



## Capítulo 6

# Conclusão e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusão

No final deste projecto é possível afirmar que os objectivos propostos foram alcançados. Os dispositivos aparentam ser estáveis, mesmo durante longos períodos de funcionamento. Quanto ao consumo energético, pode-se afirmar que é bastante razoável apresentando uma autonomia estimada de cerca de 53 dias com apenas duas baterias AA de 2400mAh. No que diz respeito ao alcance de comunicação, foram obtidos bons resultados, atingindo cerca de 20m sem o auxílio de antenas externas.

Apesar das redes ZigBee serem susceptíveis de interferências de redes IEEE 802.11b/g em certos canais, o canal seleccionado para a rede projectada revelou ser imune a estas interferências nos testes realizados. Isto permite que esta rede possa coexistir com redes Wireless sem que ocorram problemas de interferências.

O método utilizado para realizar a comunicação entre o dispositivo que se encontra a receber o sinal infravermelho e os emissores revelou-se bastante leve para a rede. Isto possibilita a integração deste sistema de extensão de sinais infravermelhos numa rede ZigBee de domótica, sem que as restantes funções da rede sejam prejudicadas.

### 6.2 Trabalho futuro

Na sequência do trabalho desenvolvido, alguns aspectos ainda podem ser desenvolvidos.

Podia ser implementada uma *look up table*, que podia ser incluída no Coordenador ou nos dispositivos Receptores, que iria fazer a associação entre um dispositivo Emissor e o endereço presente no comando RC5 recebido. Isto iria permitir utilizar endereçamento directo nas mensagens entre o dispositivo Receptor e o Emissor e tornava este sistema mais leve para a rede. Mas a necessidade de configuração da tabela iria tornar o sistema menos flexível.

Também podia ser implementado um sistema de monitorização das baterias dos dispositivos que se baseiam em *ZigBee End Device*. Isto pode ser alcançado através de efectuar uma leitura periódica de um ADC do CC2430 que permite medir internamente a tensão de alimentação. Quando a tensão medida fosse inferior a um determinado valor, o dispositivo pode notificar o Coordenador para este enviar para o computador.

Outro aspecto que podia ser estudado, era realizar a implementação deste projecto utilizando uma das outras redes WPAN apresentadas na secção 2.9 e efectuar uma comparação entre os resultados obtidos.

## Anexo A

# Esquemas e PCBs

### A.1 Coordenador

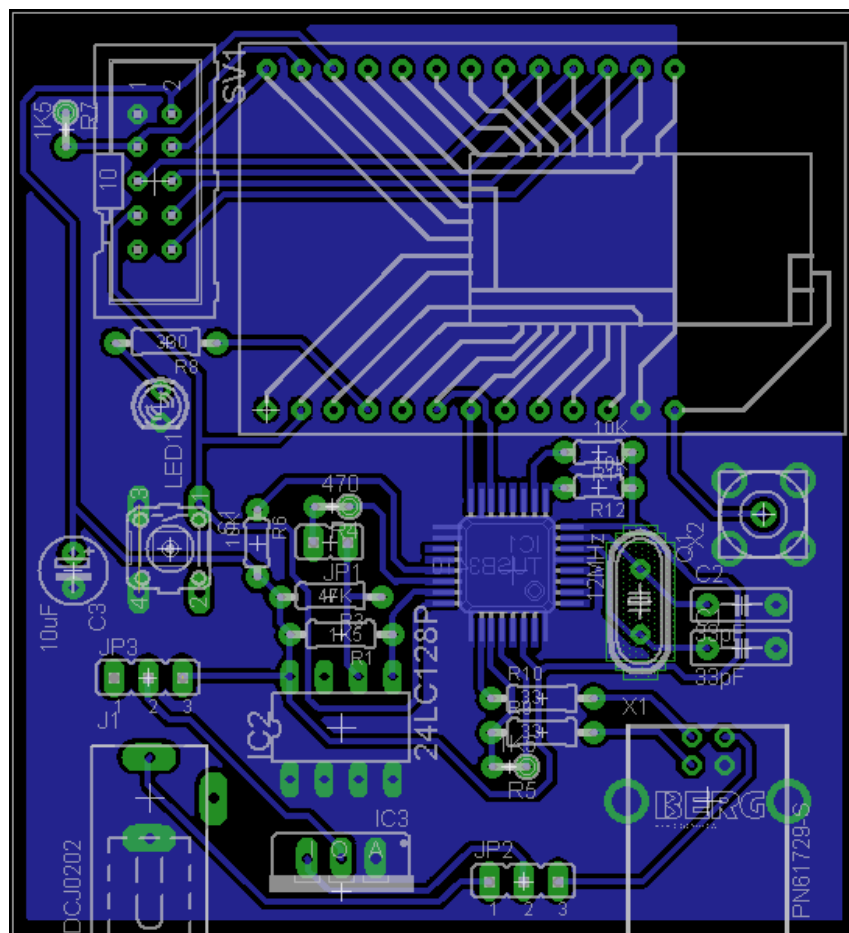


Figura A.1: PCB do Coordenador (Dimensão: 6.25cm x 6.9cm).



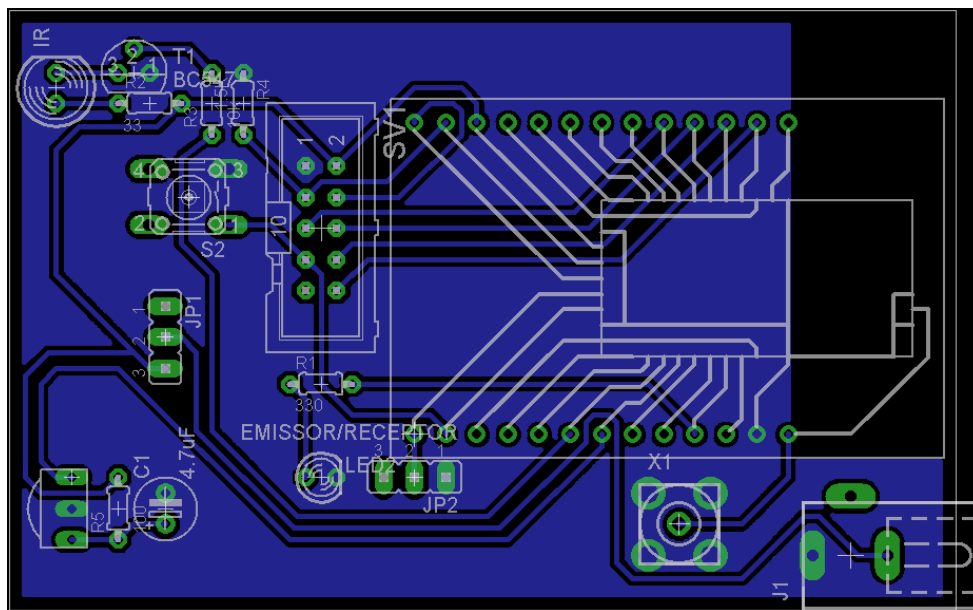


Figura A.4: PCB de um Emissor/Receptor baseado no *ZigBee Router* (Dimensão: 7.75cm x 5cm).



# Referências

- [1] ZigBee Standards Organization. Zigbee specification. Technical report, Janeiro 2008.
- [2] Texas Instruments. Measuring power consumption with cc2430 & z-stack. Technical report, Texas Instruments, 2006.
- [3] *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE Standard 802.15.4, 2008.
- [4] Daintree Networks. *Getting Started with ZigBee and IEEE 802.15.4*, Fevereiro 2008. Disponível em <http://www.daintree.net/resources/whitepapers.php>, acessido a última vez a 19 de Dezembro de 2009.
- [5] Texas Instruments. *Introduction to SimpliciTI*, Junho 2005. Disponível em <http://focus.ti.com/lit/ml/swru130b/swru130b.pdf>, acessido a última vez a 3 de Janeiro de 2010.
- [6] IPSO Alliance. *6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture*, Janeiro 2009. Disponível em <http://www.ipso-alliance.org/Pages/DocumentsAndWhitePapers.php>, acessido a última vez a 15 de Dezembro de 2009.
- [7] Texas Instruments. *CC2430 datasheet*. Disponível em <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2430>, acessido a última vez a 23 de Maio de 2010.
- [8] Texas Instruments. *ZigBee Stack*. Disponível em [http://tiexpressdsp.com/images/8/8a/08\\_-\\_ZigBee\\_Stack.pdf](http://tiexpressdsp.com/images/8/8a/08_-_ZigBee_Stack.pdf).
- [9] Altium. Philips RC5 Infrared Transmission Protocol. Disponível em <http://wiki.altium.com/display/ADOH/Philips+RC5+Infrared+Transmission+Protocol>.
- [10] ZigBee Alliance. Disponível em <http://www.zigbee.org>.
- [11] André Ribeiro e Cunha. “On the Use of IEEE 802.15.4/ZigBee as Federating Communication Protocols for Wireless Sensor Networks”. Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [12] Yung-Chih Liu e Yu-Chee Tseng Meng-Shiuan Pan, Hua-Wei Fang. Address assignment and routing schemes for zigbee-based long-thin wireless sensor networks. Disponível em <http://www.cs.nctu.edu.tw/~yctsen/papers.pub/sensor25-long-thin-vtc2008.pdf>, acessido a última vez a 9 de Dezembro de 2009.
- [13] Joseph Soma Reddy. Zigbee security. Technical report, ZigBee Alliance, 2004.

- [14] Zensys. Disponível em <http://www.zensys.com>.
- [15] Texas Instruments. Disponível em <http://www.ti.com>.
- [16] IETF. Disponível em <http://www.ietf.com>.
- [17] Texas Instruments. CC2431DK. Disponível em <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/cc2431dk.html>.
- [18] Radiocrafts. *RC2300AT datasheet*. Disponível em [http://www.radiocrafts.com/uploads/rc230x\\_data\\_sheet\\_1\\_2.pdf](http://www.radiocrafts.com/uploads/rc230x_data_sheet_1_2.pdf).
- [19] Radiocrafts. Disponível em <http://www.radiocrafts.com>.
- [20] Cadsoft. Eagle 5.0. Disponível em <http://www.cadsoft.de/>.
- [21] Texas Instruments. *TUSB3410 datasheet*. Disponível em <http://www.ti.com/lit/gpn/tusb3410>.
- [22] Vishay semiconductors. *TSOP34836 datasheet*, 2009. Disponível em <http://www.vishay.com/doc?81732>, acessado a última vez a 25 de Março de 2010.