



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Mano Brito

Eco-Smart Heat Pump

João Pedro Mano Brito Eco-Smart Heat Pump

UMinho | 2013

outubro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Mano Brito

Eco-Smart Heat Pump

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Comunicações

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Miguel Nunes Santos Cabral

outubro de 2013

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

Agradecimentos

As primeiras palavras de agradecimento vão para os meus pais, Domingos e Rosário, por todo o apoio e suporte que me deram em todas as fases da minha vida, e também para os meus irmãos, Nuno e Óscar, pelos concelhos e amizade incansáveis.

Não posso deixar de agradecer ao Professor Doutor Jorge Cabral pela oportunidade, ajuda e profissionalismo, e também, pelos conselhos e confiança que sempre depositou em mim.

Aos colegas do laboratório do *ESRG* do Departamento de Eletrónica Industrial da Universidade do Minho, pela ajuda na conceção e desenvolvimento deste projeto, com especial atenção ao Tiago Gomes, Jorge Aires e Paulo Gonçalves.

Aos meus colegas e amigos de curso que frequentavam a cozinha do bloco um das Residências Universitárias da Universidade do Minho de Azurém, responsáveis por boas recordações profissionais e boémias e que para sempre ficarão marcadas na minha vida.

Finalmente desejo agradecer à minha namorada, Isabel Vilas Boas, e à sua família que entraram na minha vida de uma forma tão especial e que sempre me ajudaram e acreditaram em mim.

Resumo

Cada vez mais as *Wireless Sensor Networks* (WSN) provocam mais impacto na nossa vida. Esta tecnologia abriu a possibilidade de criação de um novo leque de aplicações, mais inteligentes, ubíquas, interoperáveis e energeticamente eficientes, que as aplicações existentes.

Várias áreas têm apresentado inovações significativas utilizando este tipo de tecnologia levando ao aparecimento de muitos produtos neste âmbito.

O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema de controlo climatérico responsável pela interação, gestão e monitorização da temperatura e humidade em espaços fechados. O ponto central deste sistema é uma Bomba de Calor híbrida, desenvolvida pela empresa Pinto Brasil, Fábrica de Máquinas Industriais S.A. Este sistema inova no sentido em que todo o controlo climático do espaço pode ser feito remotamente. O sistema proposto pode ser utilizado em um conjunto de aplicações adicionais como deteção e prevenção de incêndios, medições CO/CO₂, detetores de presença, etc. Neste documento é discutido o desenvolvimento de todos os módulos de *Software* e *Hardware* do sistema e o estudo das tecnologias utilizadas.

O sistema desenvolvido encontra-se inserido num projeto nacional QREN/COMPETE denominado por "*Eco-Smart Heat Pump*", co-parceria entre o grupo de Sistemas Embebidos da Universidade do Minho e a empresa Pinto Brasil, Fábrica de Máquinas Industriais S.A..

Abstract

The widespread use of *Wireless Sensor Networks* (WSN) is causing a significant impact on our daily lives. This technology has powered novel applications that are more intelligent, ubiquitous, interoperable and energy efficient, than the existing ones.

Among the several domain areas that are nowadays powered by this type of technology, it is in the areas of home automation that the emergence of many innovative products is more common.

The main goal of this thesis was the development of a home automation system that controls, manages and monitors the temperature and humidity inside enclosed spaces. A hybrid heat pump developed by the company Pinto Brasil, SA Industrial Machinery Plant is used to control inside temperature. The system is innovative in the sense that all the supervisor tasks can be done remotely. The proposed system can be expanded with a set of extra features such as fire detection and prevention, CO/CO₂ measurement, presence detectors, etc. In this document all the technologies researched will be presented, as well as all the stages required for *Software* and *Hardware* development of the system.

The developed system was supported by a QREN/COMPETE project designated by "*Eco-Smart Heat Pump*" a partnership between the Embedded Systems Research Group of the School of Engineering of University of Minho and the company Pinto Brasil, SA Industrial Machinery Factory.

Índice de conteúdos

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice de conteúdos.....	ix
Lista de tabelas.....	xiii
Índice de ilustrações	xv
Lista de abreviaturas.....	xix
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Estrutura do documento.....	3
2. Estado tecnológico atual	5
2.1 Sistemas de climatização	5
2.1.1 Tibucon	6
2.1.2 Weolo.....	7
2.1.3 RedLink	7
2.2 <i>Cyber Physical System</i>	9
2.3 Wireless Sensor Networks	11
2.3.1 Características.....	11
2.3.2 Arquitetura de um nó	13
2.3.3 <i>Standard IEEE 802.15.4</i>	15

2.4	Redes móveis celulares.....	18
2.4.1	GSM	18
2.4.2	GPRS.....	19
3.	Especificação do Sistema.....	21
3.1	Sistema <i>Eco-Smart Heat Pump</i>	21
3.1.1	Bomba de Calor	22
3.1.2	Ventiloconvectores.....	22
3.1.3	Requisitos do Sistema.....	23
3.1.4	Visão global do Sistema	24
3.2	Análise do Sistema	25
3.2.1	Monitorização remota do clima	27
3.2.2	Alteração dos parâmetros de atuação	28
3.2.3	Calendário de atuação.....	28
3.2.4	Controlo local do Sistema.....	29
3.3	Estudo e seleção dos componentes.....	30
3.3.1	CC2530.....	30
3.3.1.1	<i>SmartRF05 Evaluation Board</i>	33
3.3.1.2	<i>CC2530 Evaluation Module</i>	33
3.3.2	<i>Huawei MG323</i>	35
3.3.3	SHT21.....	36
3.4	Ferramentas e tecnologias.....	38
3.4.1	<i>IAR Embedded Workbench IDE</i>	38
3.4.2	SimpliciTI.....	38
4.	Desenvolvimento.....	43

4.1	Arquitetura do Sistema	43
4.1.1	Componentes físicos do sistema	44
4.1.2	Comportamento do sistema	46
4.2	Implementação	53
4.2.1	<i>Hardware</i>	53
4.2.1.1	<i>Gateway</i>	53
4.2.1.2	<i>Zone Climate Control</i>	56
4.2.2	<i>Software</i>	57
4.2.2.1	Camada de abstração de <i>Hardware</i>	58
4.2.2.2	<i>Gateway</i>	67
4.2.2.3	<i>Zone Climate Control</i>	75
5.	Avaliação do sistema	79
5.1	Medições da potência do sinal da WPAN	79
5.2	Demonstração do sistema	81
6.	Conclusões e Trabalho Futuro	89
	Referências	91
	Apêndices	94

Lista de tabelas

Tabela 1: Comparação de alguns SoC <i>Low Power</i> disponíveis no mercado.....	15
Tabela 2: Características do nível físico do <i>standard</i> 802.15.4 [13] [14].....	16
Tabela 3: Relação entre os portos do CC2530 e os <i>EM conectores</i> P3 e P4.....	34
Tabela 4: Funcionalidades suportadas pelos pinos do CC2530 [19].	35
Tabela 5: <i>Pinout</i> entre <i>Gateway</i> e CC2530EM.....	55
Tabela 6: <i>Pinout</i> entre ZCC e CC2530EM.	57
Tabela 7: Definição e descrição dos campos do protocolo da SMS.	72
Tabela 8: Protocolo bidirecional entre Bomba de Calor e o <i>Gateway</i>	75

Índice de ilustrações

Figura 1: Arquitetura do Tibucon Project [2].	6
Figura 2: Arquitetura do sistema <i>Weolo</i> da <i>Capetti Elettronica</i> [4].	7
Figura 3: Gama de produtos da <i>RedLink™ Wireless System</i> [5].	8
Figura 4: Exemplo de instalação do produto <i>RedLink™</i> [5].	8
Figura 5: Sistemas <i>EConnect™</i> e <i>Prestige™</i> da <i>RedLink™</i> [5].	9
Figura 6: Elementos constituintes de um CPS [7].	9
Figura 7: Arquitetura de um CPS [8].	10
Figura 8: Representação lógica de uma WSN sobre um grafo[10].	12
Figura 9: Topologias suportadas pelas WSN [10].	13
Figura 10: Arquitetura típica de um nó.	13
Figura 11: <i>nRF9E5</i> Sub-1GHz da <i>Nordic™</i> [11].	14
Figura 12: <i>CC2530</i> da <i>Texas Instruments™</i> [5].	14
Figura 13: Comparação das várias tecnologias de redes sem fios [12].	16
Figura 14: Estrutura da comunicação da camada MAC [14].	17
Figura 15: Planeamento celular (FDMA e SDMA) [16].	18
Figura 16: Interligação entre os componentes do sistema de climatização.	21
Figura 17: Bomba de Calor desenvolvida pela Pinto Brasil.	22
Figura 18: Componentes de um ventiloconvector exemplo [17].	23
Figura 19: <i>Overview</i> do sistema.	25
Figura 20: Funcionalidades do sistema.	26
Figura 21: Monitorização remota do sistema.	27

Figura 22: Alteração remota dos parâmetros de atuação.....	28
Figura 23: Calendarização do comportamento do sistema.....	29
Figura 24: Controlo manual da Bomba de Calor.....	30
Figura 25: SoC CC2530 da Texas Instruments™.....	31
Figura 26: Arquitetura interna do CC2530 [19].....	32
Figura 27: <i>SmartRF05 EB 1.3</i> [20].....	33
Figura 28: <i>CC2530EM</i>	34
Figura 29: <i>Huawei MG323</i> [21].....	35
Figura 30: Sensor de temperatura e humidade SHT21.....	37
Figura 31: Topologias de rede SimpliciTI [23].....	39
Figura 32: Arquitetura da <i>stack de Software</i> SimpliciTI [23].....	40
Figura 33: Estrutura da trama em todos os níveis da Stack SimpliciTI.....	41
Figura 34: Visão global da arquitetura do sistema.....	44
Figura 35: Interações entre os componentes físicos do sistema.....	45
Figura 36: Comportamento do <i>Gateway</i>	47
Figura 37: Diagrama de classes do <i>Gateway</i>	49
Figura 38: Comportamento do <i>Zone Climate Control</i>	51
Figura 39: Diagrama de classes do <i>Zone Climate Control</i>	52
Figura 40: <i>Gateway</i>	55
Figura 41: <i>Zone Climate Control</i>	57
Figura 42: Arquitetura da HAL.....	58
Figura 43: Sessão do protocolo I2C [19].....	61
Figura 44: Rede de dispositivos SPI.....	63
Figura 45: Trama do protocolo SPI [26].....	63

Figura 46: Gestão da memória <i>Flash</i>	66
Figura 47: <i>Stack</i> completa do <i>Gateway</i>	67
Figura 48: Comportamento do <i>Gateway</i>	68
Figura 49: Comportamento da tarefa do <i>Network_Manager</i>	69
Figura 50: Protocolo aplicacional da rede <i>SimpliciTI</i>	69
Figura 51: Processo de aprendizagem e troca de chaves.	70
Figura 52: Comportamento do <i>GSM_Manager</i>	71
Figura 53: Diagrama de estados do algoritmo implementado no <i>Gateway</i> com versão modificada do I2C	74
Figura 54: <i>Stack</i> completa do <i>Zone Climate Control</i>	76
Figura 55: Comportamento do <i>Zone Climate Control</i>	77
Figura 56: Fluxo de comunicação na <i>WPAN</i>	78
Figura 57: <i>RSSI</i> medido num local aberto com linha de vista.	80
Figura 58: <i>RSSI</i> medido num local fechado com linha de vista.	80
Figura 59: <i>RSSI</i> medido num ambiente ruidoso (máquinas industriais) com linha de vista.	81
Figura 60: Ligação entre a placa controladora da Bomba de Calor e o <i>Gateway</i>	82
Figura 61: <i>Zone Climate Control</i> a simular a ligação ao ventiloconvector com lâmpada de alto consumo.	83
Figura 62: Aplicação <i>Pinto Brasil</i> , Leitura do sistema.	84
Figura 63: Aplicação <i>Pinto Brasil</i> , Menu de preferências.	84
Figura 64: Aplicação <i>Pinto Brasil</i> , Calendário.	85
Figura 65: Aplicação <i>Pinto Brasil</i> , estado das zonas.	86
Figura 66: Aplicação <i>Pinto Brasil</i> , <i>update</i> das configurações do sistema.	86
Figura 67: Resultado de um <i>Zone Climate Control</i> ativo.	87

Lista de abreviaturas

API	<i>Application Programming Interface</i>
COTS	<i>Commercial Off-The-Shelf</i>
CPS	<i>Cyber Physical System</i>
CSD	<i>Circuit Switched Data</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
FFD	<i>Full-Function Device</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
HCI	<i>Host Controller Interface</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MRFI	<i>Minimal Radio Frequency Interface</i>
RX	<i>Receiver</i>
OTA	<i>Over The Air</i>
PDU	<i>Protocol data unit</i>
RFD	<i>Reduced-Function Device</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
SoC	<i>System-on-Chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TX	<i>Transmitter</i>
USART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USSD	<i>Unstructured Supplementary Service Data</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>
ZCC	<i>Zone Climate Control</i>

1. Introdução

O projeto “*Eco-Smart Heat Pump*” visa o desenvolvimento de um sistema de domótica de controlo da temperatura, recorrendo a tecnologias de comunicação sem fios. Este, tem como principal objetivo o controlo dos vários equipamentos de climatização do sistema, permitindo fazer uma gestão inteligente do ambiente climático em espaços fechados.

Neste capítulo será abordado o enquadramento geral da dissertação, as motivações e objetivos que conduziram ao desenvolvimento do projeto e, por fim, uma breve análise da estrutura do documento.

1.1 Enquadramento

Esta dissertação enquadra-se na área das *Wireless Sensor Networks (WSN)*, focando-se no desenvolvimento de um sistema de controlo sem fios que presta auxílio a um sistema já existente de climatização baseado em Bomba de Calor.

O sistema “*Eco-Smart Heat Pump*” foi desenvolvido em cooperação direta entre o Grupo de Investigação em Sistemas Embebidos (ESRG) do Centro Algoritmi da Escola de Engenharia da Universidade do Minho e a empresa Pinto Brasil, Máquinas Industriais S.A. sediada em Guimarães.

1.2 Motivação

Atualmente os sistemas de climatização são peças essenciais para qualidade e conforto de espaços fabris, comerciais e residenciais. Cada vez mais económicos, estes tipos de sistemas tornam-se mais frequentes. Aproveitando um aumento significativo de clientes neste segmento de mercado, a Pinto Brasil S.A., decidiu apostar nesta tecnologia para os mercados do Sul da Europa e Norte de África.

Uma boa forma de entrar neste mercado competitivo é optar pela inovação. Estes tipos de sistemas, nos últimos anos, têm sido inovados maioritariamente ao nível da eficiência energética, isolamento e transporte de energia. Nos dias de hoje, novas aplicações têm surgido, especialmente soluções interoperáveis de domótica que dão suporte à climatização. Estas soluções permitem aumentar a qualidade de vida chegando mais próximo das necessidades dos utilizadores, fazendo um controlo mais eficiente, menos intrusivo e mais personalizado.

Surgem alguns problemas com esta abordagem, entre os quais, a necessidade de ter dispositivos camuflados no espaço, instalação, interoperabilidade, comunicação e eficiência energética.

A plataforma "*Eco-Smart Heat Pump*" tem como objetivo solucionar alguns destes problemas apresentados anteriormente, inovando com um sistema de transporte de energia eficiente, e uma plataforma de controlo que pretende aumentar a proximidade entre o sistema de climatização e o utilizador do serviço.

1.3 Objetivos

O objetivo desta dissertação visa o desenvolvimento de um sistema de controlo, sob a forma de *Hardware* e *Software*, que permitirão dar uma contribuição técnica e científica de um projeto QREN/COMPETE de nome "*Eco-Smart Heat Pump*" em co-promoção com a empresa Pinto Brasil S.A.

A plataforma do trabalho desenvolvido tem como objetivo principal fazer o controlo de um sistema de climatização interior baseado em Bomba de Calor. A Bomba de Calor é um dispositivo que transforma energia elétrica em calor e a transporta sobre um líquido através do bombeamento do líquido em um circuito de tubagens. A este circuito encontram-se interligados vários dispositivos terminais, chamados de ventiloconvectores, que por sua vez radiam a energia térmica conduzida pelo líquido em movimento, climatizando assim uma determinada área fechada.

O projeto desenvolvido no âmbito dissertação interliga e controla os vários dispositivos terminais à Bomba de Calor utilizando a abordagem das WSN, permitindo

este ser controlado a partir de um equipamento móvel sobre redes móveis que se liga ao sistema através da utilização de serviços fornecidos por este tipo de rede.

É requisito que os ventiloconvectores comuniquem com a Bomba de Calor utilizando uma rede económica, dedicada e sem fios, de forma a facilitar e flexibilizar a instalação e comunicação do sistema. As mensagens trocadas entre a bomba e os ventiloconvectores deverão conter informação de climatização instantânea e referencial, como a temperatura e a humidade de um determinado local.

1.4 Estrutura do documento

O primeiro capítulo deste documento tem carácter introdutório fazendo uma primeira abordagem ao tema, apresentado a sua motivação e objetivos.

O segundo capítulo apresenta algumas tecnologias referentes aos sistemas de climatização baseados em redes de sensores sem fios já existentes no mercado, assim como de redes sem fios.

No terceiro capítulo analisa-se e conceptualiza-se o sistema proposto, visando detalhar as funcionalidades e as entidades.

A apresentação em alto nível dos componentes do sistema é feita no quarto capítulo, onde também é detalhado todo o processo de desenvolvimento.

No quinto capítulo são apresentados alguns testes que foram realizados de forma individual a certos componentes do sistema, e também são apresentados e discutidos os resultados obtidos na solução desenvolvida.

Por fim, o sexto capítulo tem como objetivo apresentar as principais conclusões de todo o trabalho desenvolvido e apontar possíveis trabalhos futuros.

2. Estado tecnológico atual

Neste capítulo serão abordados vários sistemas de domótica direcionados para a climatização que utilizam o modelo das WSN de forma a interligar os vários componentes do sistema. Posteriormente será abordada a técnica *Cyber Physical Systems* que consiste na conceptualização e caracterização de sistemas distribuídos com o objetivo de efetuar o controlo de entidades físicas. A partir deste ponto vai ser apresentado o modelo de comunicações sem fios para redes de baixo consumo, WSN, sobre a qual serão debatidas aplicações, a arquitetura de cada nó da rede e o *standard* WPAN (*Wireless Personal Area Network*) IEEE 802.15.4.

Na fase final serão abordadas as redes móveis celulares, focando-se nas tecnologias de segunda geração, GSM (*Global System for Mobile Communication*) e GPRS (*General Packet Radio Service*).

2.1 Sistemas de climatização

Um sistema de climatização é uma aplicação específica da domótica. A domótica [1] define um modelo tecnológico que permite gerir recursos habitacionais através do uso de vários dispositivos, interligados entre si, de forma a criar uma plataforma que permite o controlo remoto ou programado dos equipamentos eletrónicos, tendo como objetivo de baixar os consumos energéticos, aumentando assim a eficiência da residência e a qualidade de vida do utilizador. Este tipo de sistemas pode-se subdividir, para além dos sistemas de climatização, em automação, iluminação, segurança e comunicação.

Os sistemas de climatização, permitem controlar e monitorizar os equipamentos de HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), como aquecedores, ventiladores, ar condicionados e refrigeradores.

2.1.1 Tibucon

Um sistema que se encontra atualmente desenvolvimento no âmbito do projeto europeu *Tibucon*TM [2], baseia-se no desenvolvimento de uma plataforma genérica que permite fazer a monitorização e gestão das condições térmicas de um edifício, controlado o sistema existente de HVAC. A arquitetura deste sistema apresenta-se na Figura 1.

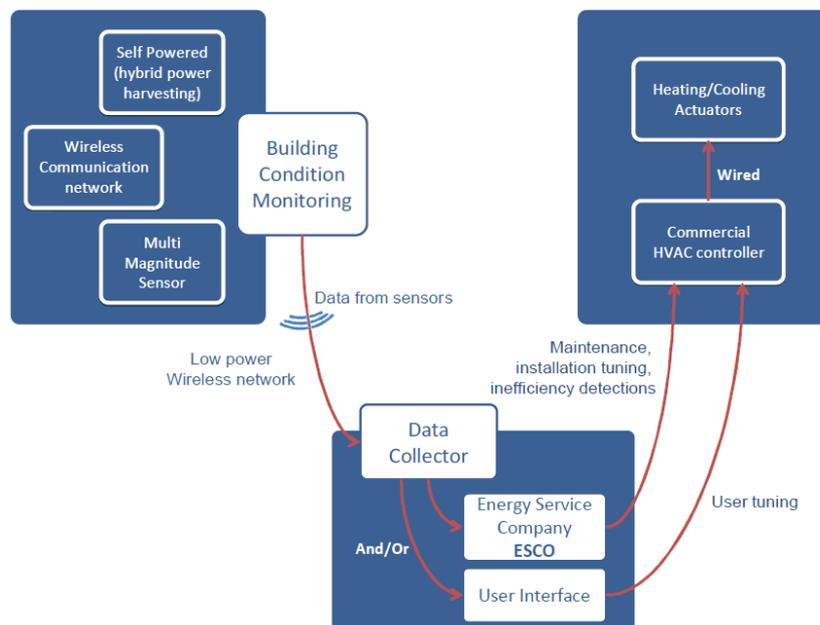


Figura 1: Arquitetura do Tibucon Project [2].

A objetivo deste projeto consiste em evitar a utilização de cabos e baterias nos dispositivos de aquisição de dados, utilizando para isso a combinação de dispositivos *ultra low power* juntamente com a tecnologia de *energy harvesting* [3]. O *Tibucon* é constituído por três camadas de abstração diferentes: o “*Building Condition Monitoring*” responsável pela monitorização dos parâmetros físicos do edifício, o “*Data Collector*” que faz o processamento dos parâmetros da monitorização e, por fim, o controlo do equipamento de HVAC do edifício, de forma a atuar sobre o ambiente.

2.1.2 Weolo

Uma aplicação que entrou recentemente no mercado é o *Weolo™*, da *Capetti Elettronica* [4]. Esta aplicação permite adquirir sem fios medições de temperatura, humidade, calor e eletricidade de uma residência. A arquitetura deste sistema encontra-se apresentada na Figura 2 e permite dar suporte à consulta remota do sistema através de uma interface *Web*, garantindo desta forma a compatibilidade com qualquer dispositivo com acesso à internet.

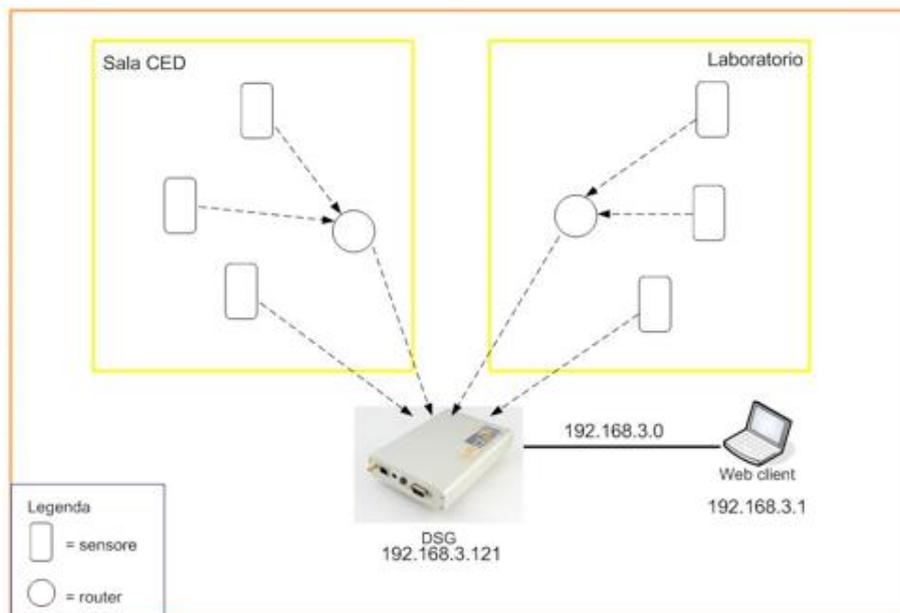


Figura 2: Arquitetura do sistema *Weolo* da *Capetti Elettronica* [4].

2.1.3 RedLink

A *RedLink™ Wireless System* da *Honeywell* [5] disponibiliza uma gama de produtos totalmente sem fios que se interligam entre si, em um modelo de WSN, com o objetivo de monitorizar e controlar o ambiente climático de uma residência, como se apresenta na Figura 3.



Figura 3: Gama de produtos da RedLink™ Wireless System [5]

Cada produto da RedLink™ é um nó na rede, sendo possível criar uma solução inteligente e interoperável, pois além de cada nó ser de fácil instalação e sem fios, permite, também, personalizar o sistema de monitorização muito facilmente. Com este modelo, o utilizador decide quais e quantos componentes precisa, tendo assim a liberdade de escolher a solução adequada para si. A Figura 4 apresenta um exemplo de uma solução de controlo de climatização utilizando os produtos da RedLink™.

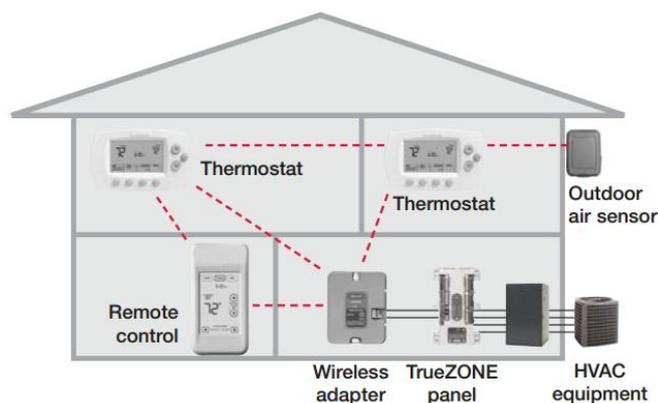


Figura 4: Exemplo de instalação do produto RedLink™ [5].

A Figura 5 apresenta dois exemplos de produtos sem fios da RedLink™, o EConnect™ e o Prestige™. O EConnect™ é um termostato que permite automaticamente controlar vários ventiladores e aquecedores em simultâneo e o

Prestige™ permite controlar sistemas de HVAC como bombas de calor ou sistemas convencionais de ar condicionado.



Figura 5: Sistemas EConnect™ e Prestige™ da RedLink™ [5].

2.2 *Cyber Physical System*

No contexto deste projeto é relevante conceptualizar e caracterizar o sistema desenvolvido. *Cyber Physical System* é uma nova abordagem que se encontra em investigação, que prevê a integração de vários sistemas diferentes diferenciando-os em níveis de abstração distintos. Esta abordagem tem como objetivo definir diferentes formas de abstração, modelação, *design* e técnicas de análise [6].

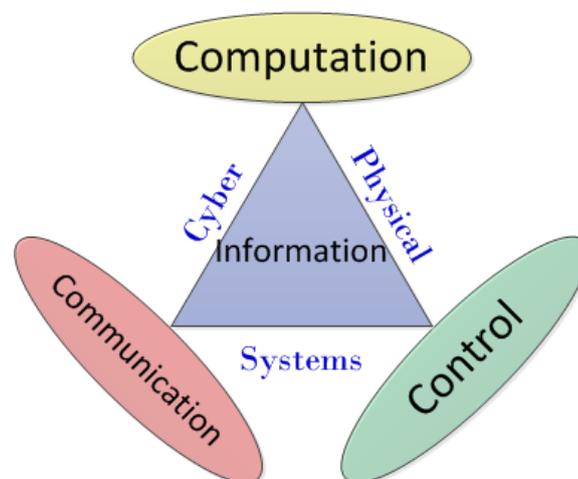


Figura 6: Elementos constituintes de um CPS [7].

A arquitetura de um CPS, como se encontra apresentado na Figura 6, define três componentes essenciais: a computação, o controlo ou processo físico e a comunicação. A computação é responsável pelo processamento da informação e inteligência do sistema, que dispõe de processamento ilimitado e não detém restrições energéticas. O controlo ou processo físico tem como objetivo fazer a interface com o meio físico, podendo deter limitações de processamento, memória ou autonomia energética. Por último, o bloco de comunicação lida com a troca de informação entre os módulos descritos anteriormente.

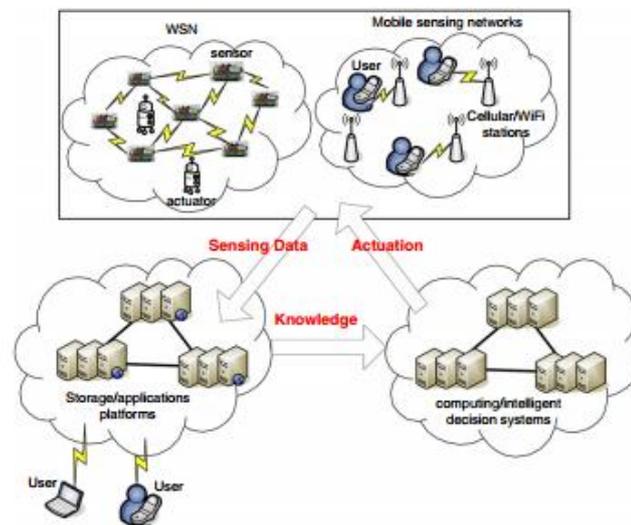


Figura 7: Arquitetura de um CPS [8].

A Figura 7 apresenta um exemplo de uma solução [8] que utiliza a abordagem CPS para descrever um sistema. Como se pode ver existem dois tipos de controlos físicos de sensorização, sendo que um utiliza o modelo de comunicações das WSN e o outro, redes móveis celulares. Estes são controlados por um processo de computação de decisão, que é excitado pelo conhecimento de uma plataforma aplicacional, sendo esta, por sua vez, excitada pelos dados de sensorização e pela interação com os utilizadores. A camada de comunicação tem um papel importante permitindo criação de abstração entre os componentes de computação e controlo.

2.3 Wireless Sensor Networks

WSN [9] define uma rede dedicada, com o objetivo concreto de monitorizar e interagir sobre um determinado meio físico. Estes tipos de redes são constituídas por vários dispositivos, chamados de nós, que comunicam entre si através de canais de comunicações sem fios. Devido à sua natureza, estes apresentam limitações tanto ao nível energético como de processamento. Habitualmente, os nós de uma WSN são distinguidos como sendo *source*, nós fonte, ou *sink*, nós destino, sendo esta tipificação relativa à topologia de rede dos nós. Os “nós fonte” têm delineada uma tarefa bem específica de monitorização ou interação no meio, como leitura da temperatura, luz, presença, entre outros, partilhando esta informação na rede para o “nó destino”, que trata a informação recebida e gere [6] a rede, no entanto, este também podem desempenhar funções de “nós fonte” em simultâneo.

Uma WSN pode ser parte integrante de um CPS, apresentado na secção 2.2), estando presente nos componentes de processo físico (nó) e comunicação (rede).

2.3.1 Características

As WSN são um tema muito estudado na comunidade académica, e como tal, as expectativas de soluções futuras deste contexto são muito altas. Estas podem ser constituídas por vários tipos de sensores [9]: aceleração, térmicos, visuais, infravermelhos, acústicos e muitos outros, permitindo avaliar de uma forma flexível, vários tipos de ambientes físicos.

Atualmente existem vários tipos de aplicações que tiram partido dos benefícios desta tecnologia, e estão presentes em diversas áreas, como militar, na saúde, em automação, entre outros.

Este tipo de tecnologia detém características bastantes ambiciosas e flexíveis. Normalmente os nós deste tipo de redes cooperam entre si, com o objetivo de atingir apenas uma única finalidade, normalmente sobre canais com taxas de transmissão baixas. Uma das características mais ambiciosas deste tipo tecnologias é possibilidade

de suportar o *multi-hopping*, sendo que desta forma, é possível dilatar a cobertura da rede utilizando apenas os próprios nós constituintes do sistema, redirecionando estes os pacotes na rede. Por exemplo, tendo como referência a Figura 8, se o nó dois pretender enviar uma mensagem para o nó seis, esta pode ser encaminhada através do nó um, quatro e, por fim, chega ao destino.

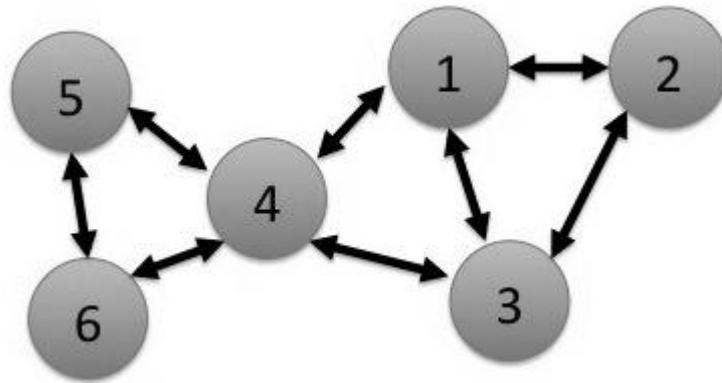


Figura 8: Representação lógica de uma WSN sobre um grafo[10].

O baixo consumo energético de cada nó é essencial de forma a aumentar a autonomia do sistema. Este, é geralmente alimentado por recurso a baterias e/ou por mecanismos de *energy harvesting*. Desta forma, os nós com problemas energéticos são adormecidos quando não realizam trabalho útil, por forma a reduzir o consumo energético. A diminuição da potência de transmissão de RF e a utilização de tramas com *overhead* e *payload* reduzidos complementam a solução tornando-a ainda mais eficiente.

A baixa complexidade e custo destes dispositivos é uma característica muito importante neste tipo de soluções, pois desta forma podem ser considerados descartáveis e de baixo valor. Desta forma é possível a criação de soluções radicais, fazendo aquisições de dados em meios de difícil acesso, sendo que o funcionamento *ad-hoc*, a escalabilidade e auto-organização dos nós aspetos críticos.

Como apresentado na Figura 9, as WSN suportam topologias em estrela, árvore e malha. O fluxo de comunicação na tecnologia em estrela faz-se apenas entre o *source* e o *sink*, por outro lado, a topologia em árvore e malha permitem o *multi-hopping*,

sendo que na topologia em árvore a comunicação flui de forma hierárquica entre os nós constituintes da rede.

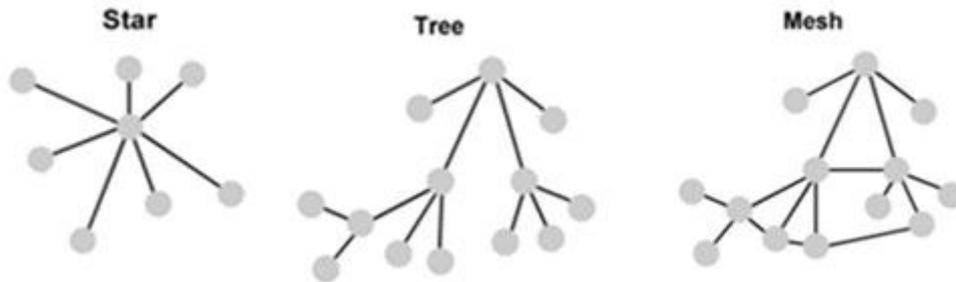


Figura 9: Topologias suportadas pelas WSN [10].

2.3.2 Arquitetura de um nó

Um nó de uma WSN é normalmente um sistema dedicado com uma tarefa bem definida. A Figura 9 apresenta a arquitetura usual deste tipo de dispositivos.

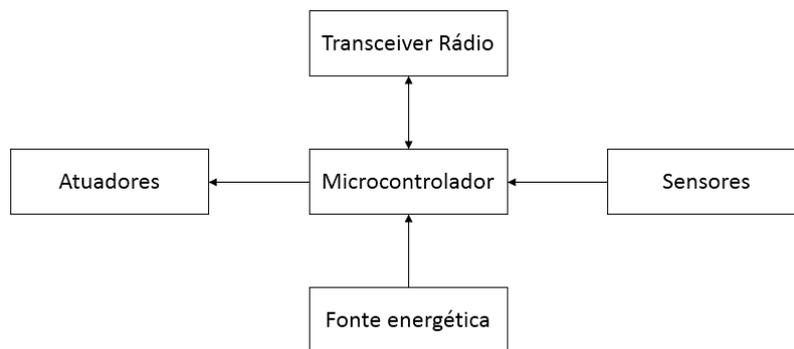


Figura 10: Arquitetura típica de um nó.

O microcontrolador é o ponto central de um nó. Este é composto por processador, memória e periféricos de entrada e saída no mesmo *chip* de silício. A fonte energética do sistema pode ser constituída por uma bateria, um transformador ou até mesmo um mecanismo de *energy harvesting*, dependendo dos requisitos da aplicação.

Os atuadores e sensores permitem fazer interação direta do meio, através da leitura e/ou atuação dos parâmetros físicos existentes no ambiente.

O *transceiver* de rádio frequência permite, ao nível aplicacional, comunicar com outros dispositivos, possibilitando assim a interoperabilidade e comunicação com outros sistemas independentes. Se este módulo se encontrar integrado junto com o microcontrolador, diz-se então que a combinação de ambos é um *System-on-Chip* (SoC).



Figura 12: CC2530 da Texas Instruments™ [5].



Figura 11: nRF9E5 Sub-1GHz da Nordic™ [11].

Existe um leque enorme deste tipo de dispositivos no mercado, desde o SoC CC2530 apresentado na Figura 12, com um *transceiver* que funciona na gama dos 2,4GHz, até ao *nRF9E5* da *Nordic Semiconductor™* [11] apresentado na Figura 11, que suporta várias gamas de frequência *sub-1GHz*. Na Tabela 1 encontram-se apresentados alguns SoC analisados no contexto desta dissertação, apresentando algumas das características mais importantes assim como os seus preços.

Tabela 1: Comparação de alguns SoC *Low Power* disponíveis no mercado.

Empresa	Nome	Memória de código (KB)	Memória de dados (KB)	Gama de funcionamento do transceiver RF	Sensibilidade/Potência máxima de envio (dBm)	Consumo em modo sleep	Preço
Texas Instruments	CC1110	8/16/32	1/2/4	300-348 391-464 782-928	-110/10	0.3uA	5.40€
Texas Instruments	CC2530	256	8	2.4Ghz	-97/4.5	1uA	5.95€
Nordic	nRF9E5	4	8	300-348 391-464 782-928	-100/10	2.5uA	4.70€
Nordic	nRF24LE1	16	256	2.4Ghz	-100/3	3uA	5.70€
FreeScale	MC12311	32	2	300-348 391-464 782-928	-120/17	0.1uA	4.10€
FreeScale	MC13233	82	5	2.4Ghz	-94/3	0.29uA	4.57€

De reter que os dispositivos da *Texas Instruments*[™] comparativamente aos da *Nordic*[™] e *FreeScale*[™] além de estarem dentro na mesma gama de preços, possuem mais memória e consumos reduzidos.

2.3.3 Standard IEEE 802.15.4

Este *standard* do IEEE especifica a camada física (*PHY*) e a camada de acesso ao meio (*MAC*) de redes pessoais de baixo débito (*LR-WPAN*). Este tipo de redes são dedicadas, e destacam-se pelo baixo custo de implementação, protocolos simples e orientados a baixos consumos energéticos. A Figura 13 faz uma comparação entre o débito e o custo/consumo entre as diferentes tecnologias de redes sem fios existentes, destacando as *LR-WPAN* (a azul) pelo baixo custo, consumo energético e débito.

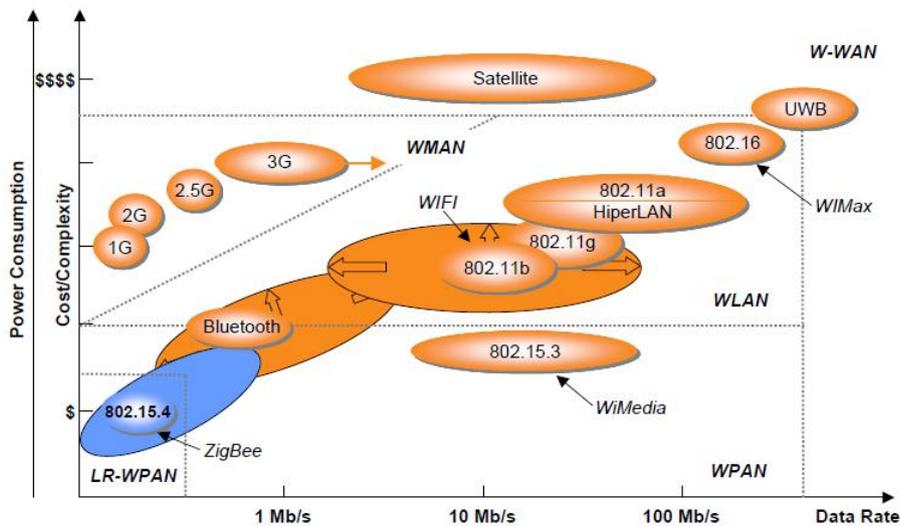


Figura 13: Comparação das várias tecnologias de redes sem fios [12].

A camada física do 802.15.4 define o modo como a informação vai ser representada analogicamente sobre a forma de ondas eletromagnéticas. Este *standard* foi desenhado para operar sobre as bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) que são de uso livre, sendo também muito suscetíveis ao ruído e interferências de máquinas ou outros sistemas que operam nesta banda.

A Tabela 2 apresenta algumas das características do nível físico do 802.15.4. É importante referir que na Europa este *standard* apenas especifica o funcionamento na banda dos 2,4GHz e 868MHz, no entanto o uso desta última não é muito vulgar derivado ao baixo débito suportado pela rede.

Tabela 2: Características do nível físico do *standard* 802.15.4 [13] [14].

Frequency Band (MHz)	Number of channels	Modulation	Spreading chip Rate (Mchip/s)	Available throughput (kB/s)	Region
868–868.6	1	BPSK	0.3	20	Europe
902-928	30	BPSK	0.6	30	USA
2400	16	O-QPSK	2.0	250	Global

A camada MAC do 802.15.4 permite gerir de forma eficiente e controlada o acesso ao meio, dando assim a possibilidade de ter vários sistemas a utilizar o mesmo canal de comunicações em simultâneo. O controlo de acesso ao meio pode ser feito de duas formas, utilizando o mecanismo de CSMA/CA [13] (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) ou pelo envio de tramas regulares, enviadas pelo coordenador da rede, chamadas de *beacon*.

O *beacon* inicia o tempo das comunicações enviando informações acerca do acesso ao meio, como por exemplo alocações de tempos para o mecanismo de *schedule-based* ou o período de tempo utilizados nos mecanismos de contenção. Após o *beacon*, é iniciado o período de contenção utilizando um mecanismo concorrente de acesso ao meio, CSMA/CA. No final do período de contenção, é iniciado o mecanismo de GTS (*Guaranteed Time Slot*) que arbitra o acesso ao meio através de um mecanismo *Time Division Multiple Access* (TDMA), no entanto, a reserva dos *time slots* é efetuada no período de contenção.

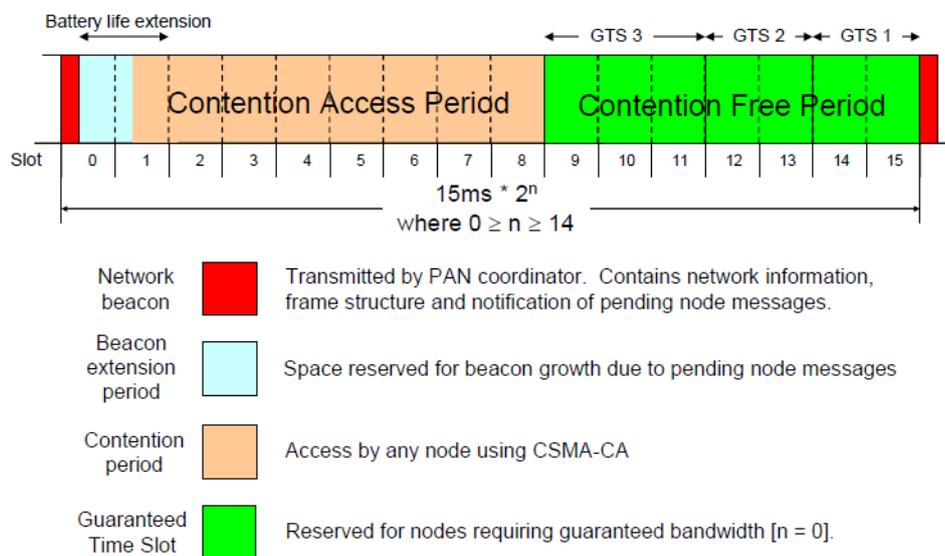


Figura 14: Estrutura da comunicação da camada MAC [14].

O 802.15.4 define dois tipos de “nós” da rede, *Full-function devices* (FFD) e *Reduced-function devices* (RFD). Um FFD é um nó da rede e pode assumir o papel de coordenador da WPAN. Um RFD apenas pode assumir o papel de utilizador da rede, sincronizando-se e seguindo as políticas enviadas no *beacon*.

2.4 Redes móveis celulares

As redes celulares cobrem uma grande parte do planeta e como tal são intensivamente utilizadas por equipamentos móveis. Nos últimos anos assistimos à utilização desta tecnologia em vários tipos de sistemas embebidos onde a necessidade de comunicação e portabilidade é essencial, como por exemplo, em sistemas de alarme, pagamentos multibanco, entre outros. Atualmente esta tecnologia começa a ser um ponto de flexibilidade na integração entre WSN e sistemas IP (*Internet Protocol*) permitindo acoplar estes sistemas sem o uso de cablagem.

2.4.1 GSM

A tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communication*) [15] faz parte da segunda geração da tecnologia móvel mais utilizada em todo o mundo. Ao contrário da primeira, esta utiliza sinais digitais flexibilizando assim as comunicações.

Uma rede celular é constituída por um conjunto de células sendo que cada uma destas faz cobertura de uma área utilizando uma determinada banda de frequência.

As células adjacentes funcionam em bandas diferentes utilizando assim um mecanismo de FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) [16] para reduzir as interferências entre células. De forma a reduzir os recursos espectrais é utilizado um mecanismo de SDMA (*Space Division Multiple Access*) [16] que garante que duas células possam utilizar a mesma banda desde que estas estejam a uma distância onde a interferência é praticamente nula. De forma a gerir as ligações numa célula, são utilizados mecanismos de TDMA (*Time Division Multiple Access*) [16] que permitem policiar o acesso ao meio.

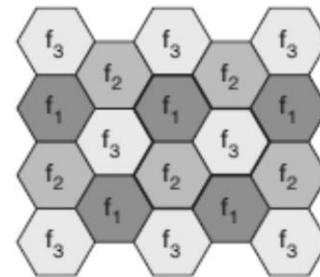


Figura 15: Planeamento celular (FDMA e SDMA) [16].

Esta tecnologia disponibiliza serviços de voz, SMS (*Short Message Service*) e transferência de dados através de comutação de circuitos com um débito médio de 12kbps.

2.4.2 GPRS

A transferência de dados no GSM é muito limitada e ultrapassada, no entanto de forma a ultrapassar este problema foi criado o GPRS que funcionará de auxílio ao GSM, explorando esta limitação. Esta tecnologia é normalmente situada entre a segunda e terceira geração de redes móveis celulares e permite enviar dados utilizando comutação de pacotes a velocidades máximas de até 144Kbps.

O GPRS introduz novos serviços orientados à transferência de dados como a MMS (*Multimedia Messaging Service*), P2P (*Point-to-Point*), PPP (*point-to-point protocol*), X.25 e P2M (*Point-to-Multipoint*).

3. Especificação do Sistema

O presente capítulo descreve os elementos constituintes do sistema “*Eco-Smart Heat Pump*”. Neste, serão apresentadas os vários módulos constituintes do sistema, Bomba de Calor, ventiloconvectores e o sistema de comunicação e controlo. Sucessivamente é feita uma análise ao sistema que se pretende desenvolver, detalhando as suas funcionalidades, como: a monitorização remota da temperatura e humidade, alteração dos parâmetros de atuação, configuração do calendário de atuação e o controlo local do sistema. Finalmente este capítulo termina com a apresentação dos componentes, ferramentas e tecnologias escolhidas para desenvolvimento do projeto.

3.1 Sistema *Eco-Smart Heat Pump*

O sistema “*Eco-Smart Heat Pump*” tem como principal objetivo gerir de forma eficiente a climatização em zonas fechadas. Esta climatização, tal como mencionado anteriormente, é baseada no uso de uma Bomba de Calor que permite transferir energia térmica através de canal de água que está ligada a vários equipamentos ventiloconvectores, que libertam esta energia sobre uma determinada área. A Figura 16 apresenta o circuito do fluxo de água entre os vários componentes do sistema.

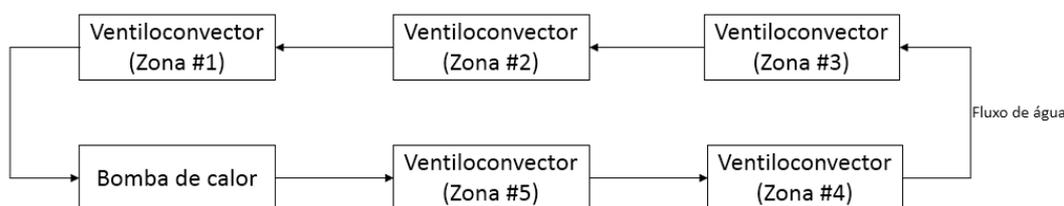


Figura 16: Interligação entre os componentes do sistema de climatização.

3.1.1 Bomba de Calor

Uma Bomba de Calor permite gerar energia térmica que irá aquecer/arrefecer um líquido (normalmente água) que posteriormente circulará dentro de um circuito de tubagens. Durante o inverno este sistema absorve o calor do ambiente exterior, mesmo a baixas temperaturas e aproveita-o para aquecer a divisão e, durante o verão, este, absorve o calor em excesso no interior do edifício e transfere-o para o exterior.

A Bomba de Calor desenvolvida pela Pinto Brasil, apresentada na Figura 17, contém um sistema inovador de transferência de calor de alta eficiência, permitindo a instalação deste sistema em locais que necessitem de aquecimento, ar condicionado e águas quentes sanitárias (AQS).



Figura 17: Bomba de Calor desenvolvida pela Pinto Brasil.

3.1.2 Ventiloconvectores

Um ventiloconvector é constituído por dois elementos, um permutador em tubo de cobre com alhetas em alumínio e um ventilador, como se encontra descrito na Figura 18. O princípio de funcionamento deste sistema baseia-se pela passagem de água bombeada por uma Bomba de Calor a uma determinada temperatura (quente para aquecimento e fria para arrefecimento) dentro de um acumulador de calor (bateria). A energia térmica radiada pela água em movimento é conduzida e direcionada por um ventilador para o ambiente.

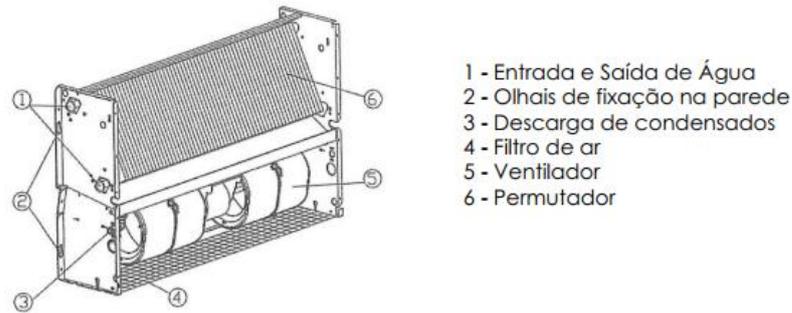


Figura 18: Componentes de um ventiloconvetor exemplo [17].

As principais vantagens deste tipo de soluções de climatização são a movimentação do ar de forma silenciosa, a rapidez a atingir a temperatura referencial de funcionamento e a não existência de necessidade da água a uma temperatura tão alta como acontece nos radiadores.

3.1.3 Requisitos do Sistema

Para alcançar os objetivos enunciados foram estabelecidos os seguintes requisitos funcionais e não funcionais sobre o qual o sistema deverá cumprir. Os requisitos funcionais refere-se às funcionalidades sobre as quais o sistema fornece ao utilizador e os não funcionais referem-se a aspetos do comportamento interno do sistema, não perceptível aos olhos utilizador.

Requisitos Funcionais:

- Configuração local dos parâmetros de funcionamento da Bomba de Calor, permitindo deste modo alterar o modo e valores de funcionamento para aquecimento, arrefecimento, AQS ou desligado;
- Configuração local de cada ventiloconvetor, permitindo ligar ou desligar a emissão de energia térmica;
- Consulta remota da temperatura e humidade instantânea de todas as zonas do sistema;
- Definição remota da temperatura referencial de cada zona;

- Consulta e definição remota dos parâmetros de funcionamento da Bomba de Calor;
- Programação de um horário de eventos, de forma a controlar todo o sistema de climatização automaticamente;

Requisitos Não Funcionais:

- O controlo e monitorização do sistema de climatização (Bomba de Calor e ventiloconvectores) devem ser feitos utilizando canais de comunicação sem fios;
- Os nós da WSN devem trocar mensagens cifradas de forma a garantir a segurança do sistema;
- A interação entre o sistema de climatização e a aplicação remota deverá ser feita utilizando serviços das redes móveis celulares;
- Cada zona de climatização deve ser configurada localmente com um identificador único;
- Um sistema de climatização é composto por uma Bomba de Calor e um máximo de cinco zonas de atuação;

3.1.4 Visão global do Sistema

O sistema “*Eco-Smart Heat Pump*” vai ser constituído pela interligação da Bomba de Calor com os vários ventiloconvectores através de um único sistema de controlo. Este sistema de controlo será uma aplicação móvel *Android/iOS* que permitirá interagir remotamente com o sistema de climatização. A Figura 19 pretende apresentar uma visão geral desta solução, apresentando a interação entre os diferentes componentes do sistema.

O *Gateway* será o ponto central da solução pois irá permitir trocar informações com a Bomba de Calor, os vários Ventiloconvectores espalhados pelas diferentes zonas da habitação e uma aplicação móvel de controlo que permite ao utilizador fazer o controlo do sistema. O *Zone Climate Control* controla o estado do Ventiloconvector, através da informação de atuação enviada assincronamente pelo *Gateway*.

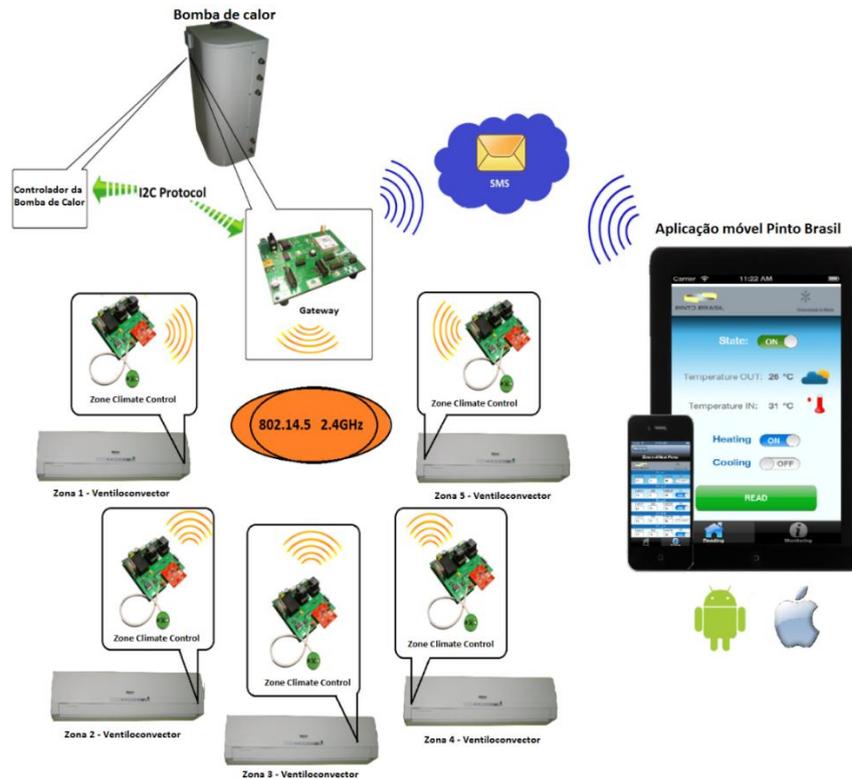


Figura 19: *Overview* do sistema.

3.2 Análise do Sistema

O sistema foi desenvolvido com base nos requisitos descritos na secção 3.1.3. Este, foi dividido em quatro subsistemas, como pode ser constatado na Figura 20, suportando dois tipos distintos de utilizadores: local e remoto. O utilizador local encontra-se fisicamente perto da instalação e pode alterar os parâmetros de funcionamento do sistema através de uma interface disponibilizada na própria Bomba de Calor desenvolvida pela empresa Pinto Brasil S.A.. O utilizador remoto interage com o sistema através de um equipamento (*Android/iOS*) comunicando diretamente com o *Gateway*.

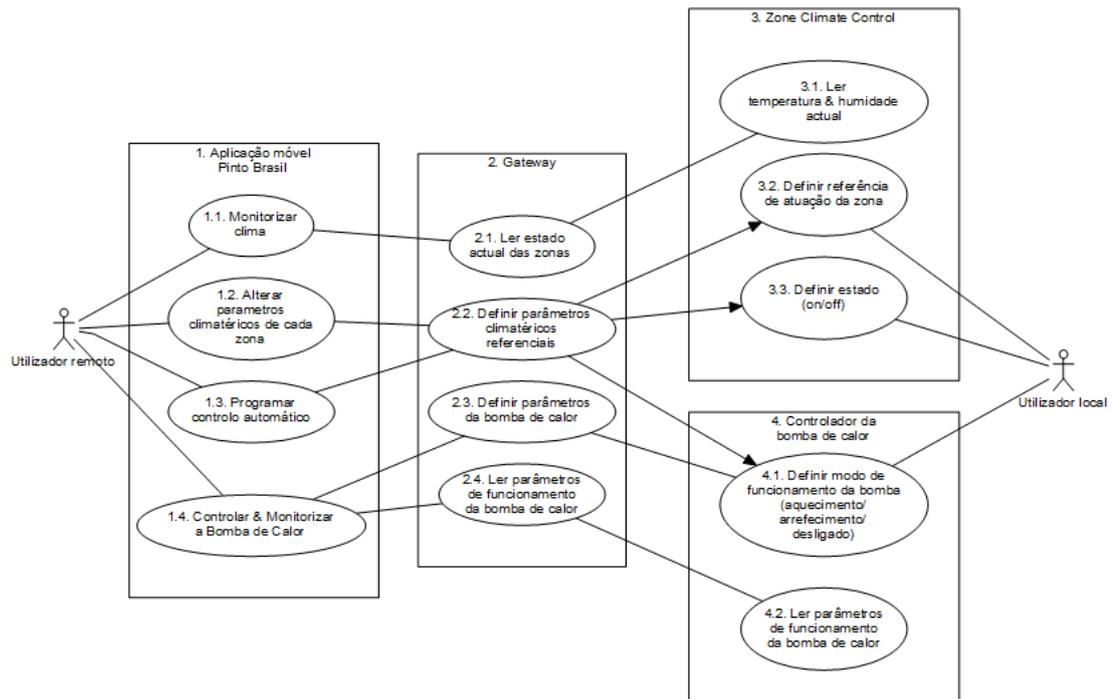


Figura 20: Funcionalidades do sistema.

O *Gateway* é uma placa eletrónica que terá como objetivo interligar, controlar e permitir a interação remota à Bomba de Calor e aos vários ventiloconvectores.

O *Zone Climate Control (ZCC)* é também uma placa eletrónica, no entanto, responsável pela monitorização e controlo da temperatura e humidade numa determinada zona através do controlo da alimentação do ventiloconvector, ativando/desativando em conformidade com as instruções enviadas pelo *Gateway*.

3.2.1 Monitorização remota do clima

A monitorização do sistema é uma das principais funcionalidades da aplicação Pinto Brasil. Esta tem como objetivo recolher a informação de todo o sistema, ou seja, os parâmetros de funcionamento da Bomba de Calor, a temperatura e humidade atual de cada zona e também os seus parâmetros de atuação.

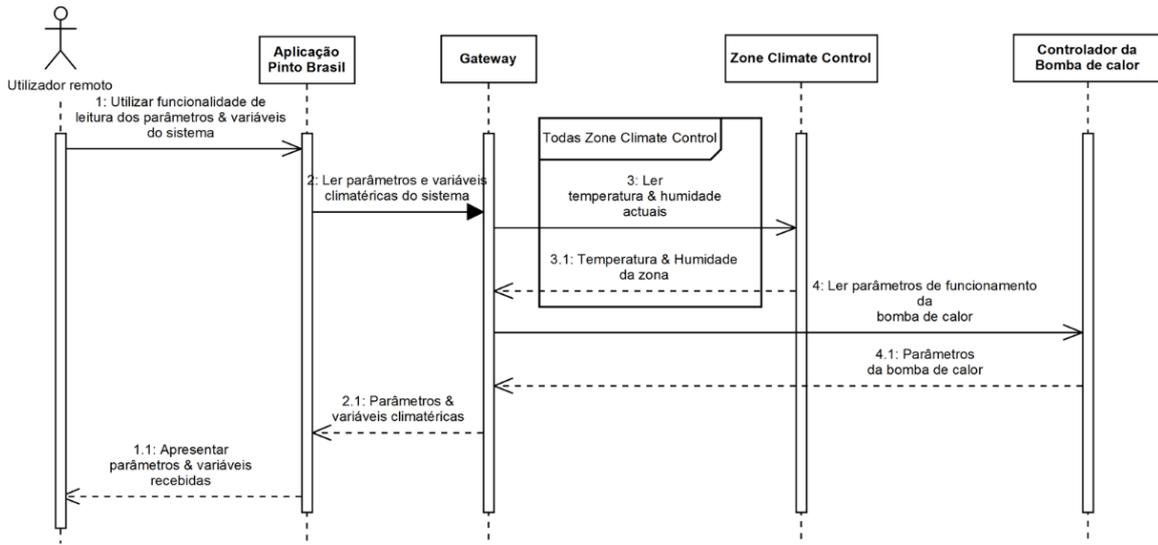


Figura 21: Monitorização remota do sistema.

Como é apresentado no diagrama de sequência da Figura 21, o *Gateway* é responsável por interpretar a mensagem enviada pelo utilizador remoto, recolher a informação em tempo real da temperatura e humidade de todos os ZCC (ligação 3 e 3.1) e os parâmetros de funcionamento da Bomba de Calor (ligação 4 e 4.1), e por fim, enviar esta informação para a aplicação móvel (ligação 2.1).

3.2.2 Alteração dos parâmetros de atuação

O sistema deverá permitir a alteração aos parâmetros de atuação de cada zona (como requerido na secção 3.1.3), para que remotamente seja possível interagir com o clima. O diagrama de sequência apresentado na Figura 22 apresenta as mensagens trocadas entre os vários atores do sistema.

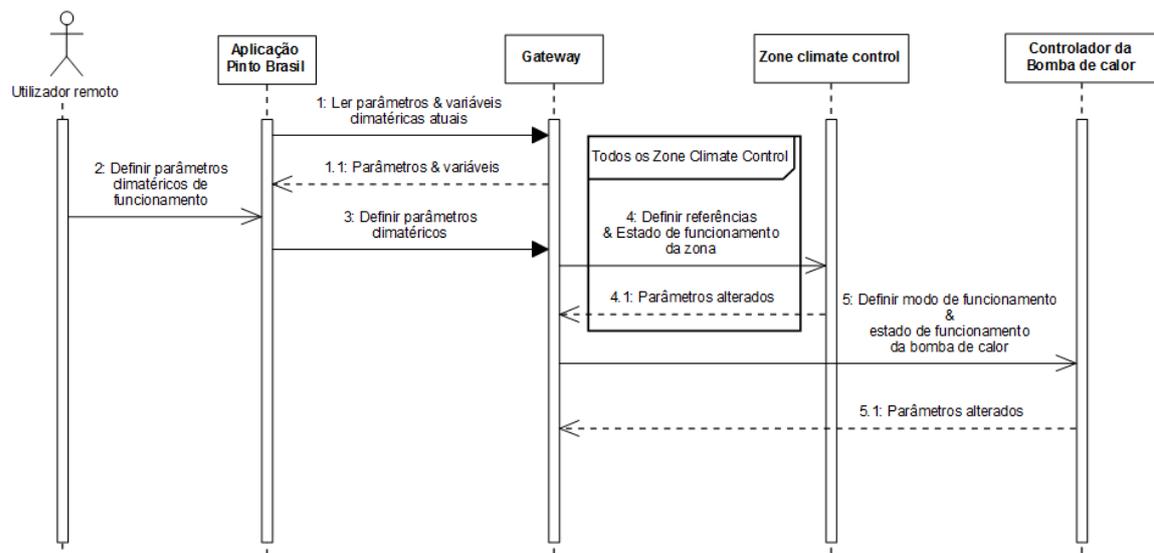


Figura 22: Alteração remota dos parâmetros de atuação.

A utilização desta funcionalidade requer que previamente, tenha sido efetuado o processo descrito em 3.2.1 (ligação 1), de forma a serem apresentados todos os parâmetros do sistema na aplicação (condição inicial).

Possuindo a aplicação todos os valores de funcionamento da bomba, esta, desbloqueará todas as funcionalidades de configuração da Bomba de Calor e dos ZCC, podendo a partir deste momento o utilizador definir os parâmetros de funcionamento do sistema (ligação 2 da Figura 22).

3.2.3 Calendário de atuação

Um dos objetivos do produto é dar a possibilidade ao utilizador de criar um calendário de atuação de controlo ao sistema, permitindo assim automatizar o comportamento deste ao longo do tempo. Este calendário baseia-se na programação

de um conjunto de comandos de *update* que são enviados pela aplicação móvel sempre que um evento ocorra. A aplicação móvel Pinto Brasil irá correr sempre em *background* no dispositivo móvel de forma a garantir que todas as mensagens são enviadas automaticamente.

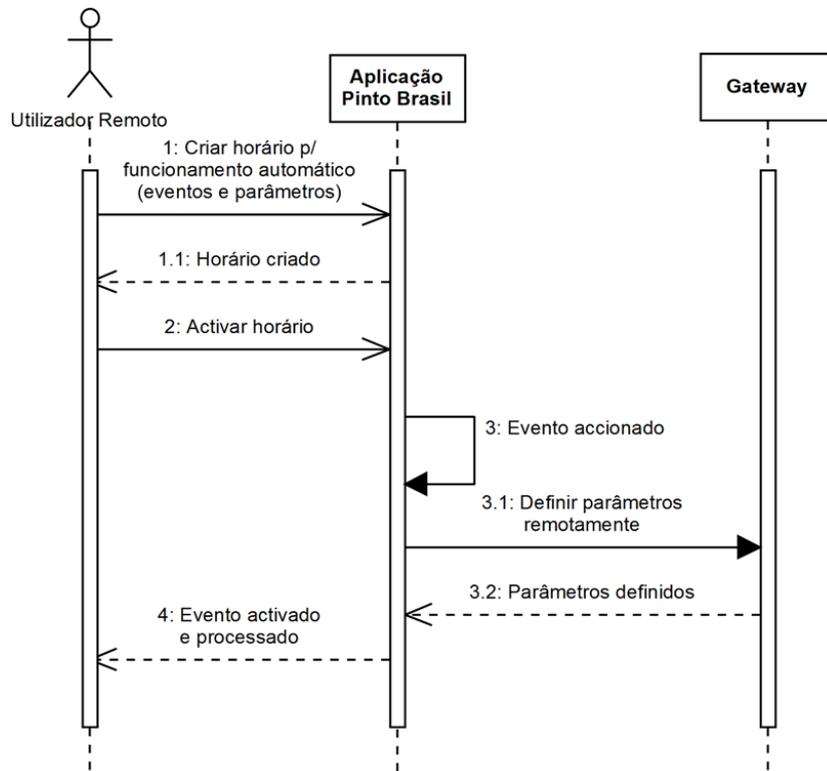


Figura 23: Calendarização do comportamento do sistema.

Cada evento é composto pelos parâmetros de funcionamento da bomba e das zonas. Quando um evento é desencadeado a aplicação utiliza o processo descrito na secção 3.2.2, apresentado na ligação 3.1 da Figura 23.

3.2.4 Controlo local do Sistema

O controlo do sistema pode ser feito localmente, tanto numa consola presente na Bomba de Calor como em qualquer zona de atuação. A implementação desta funcionalidade é da responsabilidade da empresa Pinto Brasil, não sendo portanto abordada nesta dissertação.

No entanto, a Figura 24 descreve o processo de interação entre o utilizador local e o sistema. Neste caso o utilizador interage diretamente com a Bomba de Calor através de um *display* LCD e um conjunto de botões.

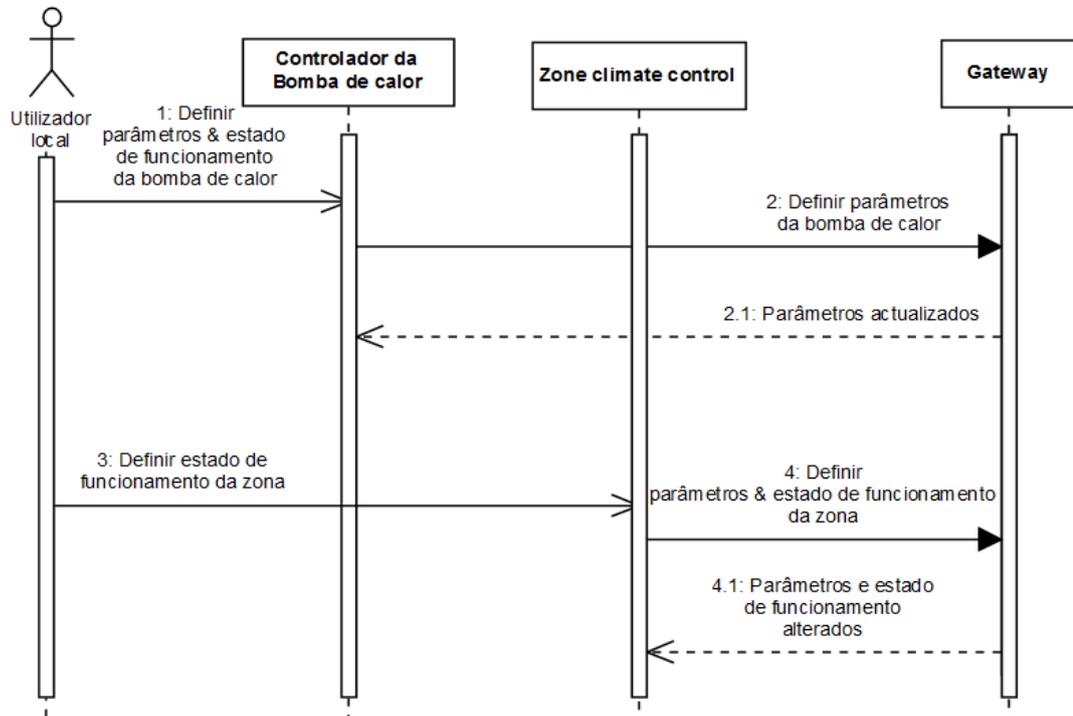


Figura 24: Controlo manual da Bomba de Calor.

3.3 Estudo e seleção dos componentes

Nesta secção serão apresentadas os principais componentes de *Hardware* utilizados na conceção e desenvolvimento do *Gateway* e do *ZCC*.

3.3.1 CC2530

O *Gateway* e o *ZCC* são os nós da rede WPAN deste sistema, e estes, serão implementados no SoC CC2530 da Texas Instruments™, apresentado na Figura 25.



Figura 25: SoC CC2530 da Texas Instruments™.

Este chip de silício combina o poder de um pequeno microprocessador da arquitetura Intel 8051 [18], com um *transceiver* de rádio frequência que funciona na banda dos 2,4GHz compatível com a norma IEEE 802.15.4. Esta combinação de tecnologias permite criar um novo tipo de soluções miniaturizadas, com *time-to-market* reduzido, e com custos e consumos energéticos mais baixos que outras soluções existentes no mercado.

O microprocessador do CC2530 contém uma memória *flash* que é utilizada para armazenar a *firmware* da aplicação ou até mesmo dados não voláteis. Existem versões com 32, 64, 128 ou 256 kB de memória *flash*, dependendo da versão do SoC selecionada (por exemplo, uma versão com 128kB de memória tem a referência CC2530-F128), no entanto, a memória de dados é igual em todas as versões sendo esta de 8kB.

Como se pode ver na Figura 26, o CC2530 possui ainda vinte e um pinos configuráveis que podem assumir a funcionalidade de GPIO (*General Purpose Input/Output*) ou podem ser utilizadas como parte integrante de um periférico. A existência de duas USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver/Transmitter*) configuráveis permite ter combinações de UART e SPI (*master* e *slave*) criando facilmente a interligação de periféricos e/ou o acoplamento de outros sistemas. Este sistema disponibiliza, ainda, um LS-ADC (*low-speed Analog to Digital Converter*) de oito canais para aquisição de sinais analógicos.

3.3.1.1 SmartRF05 Evaluation Board

A *SmartRF05*, apresentada na Figura 27, é uma placa de desenvolvimento de protótipos que permite programar, depurar e testar vários SoCs da família CC da *Texas Instruments™*, como por exemplo, o CC2530. Esta placa dispõe ainda de um conjunto de periféricos, como LCD, *leds*, *Joystick*, potenciômetro, entre outros.

Os módulos de teste (*Evaluation Modules*) serão inseridos nos *EM* conector apresentados na Figura 27, fazendo assim ligação com a placa de desenvolvimento.

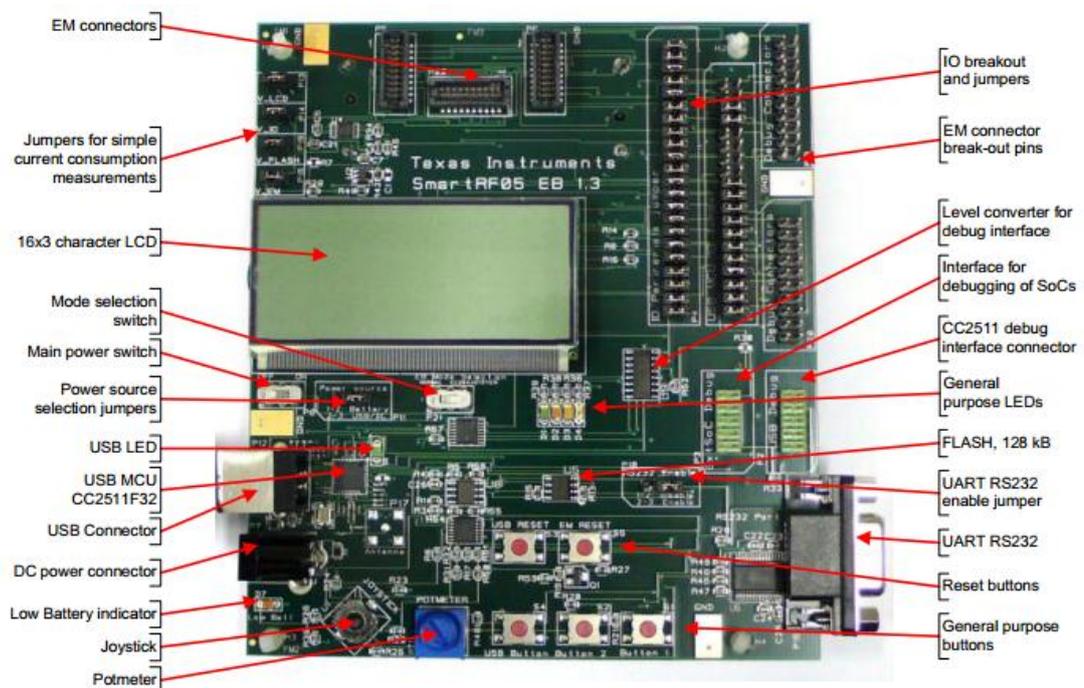


Figura 27: *SmartRF05 EB 1.3* [20].

3.3.1.2 CC2530 Evaluation Module

O CC2530EM, apresentado na Figura 28, foi desenvolvido no Grupo de Investigação em Sistemas Embebidos da Escola de Engenharia Universidade do Minho. A sua utilização neste projeto visou não só a reutilização dos recursos desenvolvidos no grupo de Sistemas Embebidos, mas também, o teste nos sistemas a serem concebidos.



Figura 28: CC2530EM.

Este módulo constitui um COTS (*Component of the Shelf*), pelo que é relevante apresentar as suas interfaces de entrada e saída. A Tabela 3 apresenta o *pin out* deste dispositivo a partir dos conectores P3 e P4 que irão encaixar nos *EM connectors*, como o apresentado no dispositivo da Figura 27 da secção anterior.

Tabela 3: Relação entre os portos do CC2530 e os *EM conectores* P3 e P4.

P3				P4		
Pin	SoC Port	Pin	Pin	SoC Port	Pin	
1		2	1		2	
3	PO_4	P1_3	4		4	
5	PO_5	P1_0	6		6	
7	PO_2		8		8	
9	PO_3	P2_1	10		10	
11	PO_0	P2_2	12		12	
13	P1_1	p1_4	14		14	
15	PO_6	P1_5	16		16	
17	PO_7	P1_6	18	P1_2	PO_5	
19		P1_7	20	P2_0		

De forma a saber quais as funcionalidades suportadas por cada pino deve ser consultada a Tabela 4 que apresenta o mapeamento das funcionalidades do SoC. Por exemplo, se quiser utilizar o porto PO_7, este pode assumir função de ADC ou *Chip select* no protocolo SPI, ou RX no protocolo UART e assim sucessivamente.

Tabela 4: Funcionalidades suportadas pelos pinos do CC2530 [19].

Periphery/ Function	P0								P1								P2					
	7	6	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0	4	3	2	1	0	
ADC	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0													T	
Operational Amplifier						O	-	+														
Analog Comparator			+	-																		
USART 0 SPI			C	SS	MO	MI																
Alt. 2											MO	MI	C	SS								
USART 0 UART			RT	CT	TX	RX																
Alt. 2											TX	RX	RT	CT								
USART 1 SPI			MI	MO	C	SS																
Alt. 2									MI	MO	C	SS										
USART 1 UART			RX	TX	RT	CT																
Alt. 2									RX	TX	RT	CT										
TIMER 1			4	3	2	1	0															
Alt. 2			3	4											0	1	2					
TIMER 3													1	0								
Alt. 2									1	0												
TIMER 4															1	0						
Alt. 2																		1			0	
32-kHz XOSC																	Q1	Q2				
DEBUG																			DC	DD		
OBSSSEL											5	4	3	2	1	0						

3.3.2 Huawei MG323

O módulo Huawei MG323, apresentado na Figura 29, vai desempenhar um papel importante no sistema pois irá estabelecer um canal de comunicações entre o Gateway e a aplicação móvel Pinto Brasil.



Figura 29: Huawei MG323 [21].

Este módulo é um HCI (*Host Controller Interface*), isto é, é controlado através do envio de comandos de controlo “AT” pelo MCU sobre uma interface série UART.

O Huawei MG323 deve ser alimentado com uma tensão LVTTL (*Low-Voltage TTL*) com uma capacidade de corrente transitória de pelo menos 2.5A, uma vez que existem picos de corrente aquando do envio de mensagens para a rede móvel. Este é um módulo de baixo custo que suporta as tecnologias GSM, GPRS e *EDGE*, podendo funcionar nas bandas dos 850, 900, 1800 e 1900 MHz.

O Huawei MG323 permite fazer processamento de voz analógica no estabelecimento de chamadas de voz. No caso de serviços de dados, este suporta dois tipos distintos de serviços, CSD (*Circuit Switched Data*) e GPRS (*General Packet Radio Service*). O CSD pertence à segunda geração das redes celulares e permite a transmissão de dados utilizando redes de comutação de circuitos, atingindo débitos de *downlink* e *uplink* até um máximo de 9,6Kbps. O GPRS encontra-se entre a segunda e terceira geração de redes celulares, utilizando redes de comutação de pacotes, atingindo débitos de *downlink* até 85.6kbps e *uplink* de 9.6kbps.

Este módulo contém uma *stack* embebida TCP/IP, que através da tecnologia GPRS pode facilmente conectar-se à Internet. Sobre esta *stack* embebida, o módulo disponibiliza ainda algumas aplicações de rede como o HTTP e FTP.

Para finalizar, este módulo suporta ainda um conjunto de serviços suplementares como SMS ou o USSD (*Unstructured Supplementary Service Data*). O serviço de SMS deste dispositivo suporta o envio de mensagens em modo de PDU (*Packet Data Unit*) ou texto.

3.3.3 SHT21

O SHT21, apresentado na Figura 30, é um sensor de humidade e temperatura com interface digital série I^2C (*Inter-Integrated Circuit*).



Figura 30: Sensor de temperatura e humidade SHT21.

As principais características deste componente são as seguintes:

- Consumo energético médio em leitura (8 bits) de 3.2uW;
- Intervalo de leitura de humidade entre 0 e 100%;
- Intervalo de leitura de temperatura entre -40 °C e +125 °C;
- Período de amostragem de leitura de humidade de 8 segundos;

O sensor SHT21 é um dispositivo com papel de *slave* no barramento I^2C com endereço 0x20. O processo de interação com este dispositivo começa através da inicialização de uma sessão I^2C , sendo enviado de seguida o endereço do dispositivo e a seleção do modo de escrita. Sucessivamente é enviado um byte que indica o tipo de variável climática que se pretende ler, para temperatura 0xF3 e humidade 0xF4. A partir deste ponto pode ser obtido o valor da variável climática através da iniciação de uma nova sessão I^2C no modo de leitura, sendo que, desta forma, serão recebidos 3 *bytes*, em que o último é um CRC-8 usado para verificar a consistência dos dados recebidos. O polinómio do algoritmo de CRC é o seguinte:

$$CRC_8(x) = x^8 + x^5 + x^4 + 1$$

Depois de verificada a consistência dos dados recebidos, utilizam-se as seguintes fórmulas para converter os 2 *bytes* restantes para o respetivo valor de temperatura ou humidade:

$$temperatura = 175.72 * (valor_lido/65536) - 46.85;$$

$$humidade = 125 * (valor_lido/65536) - 6;$$

3.4 Ferramentas e tecnologias

Nesta secção será feita uma breve apresentação à ferramenta de desenvolvimento utilizada na conceção de *Software* e, por último, será apresentada a *stack* de rede WPAN SimpliciTI da *Texas Instruments*[™] que permite dar funcionalidades na interação da rede WPAN (utilizando o *transceiver* do CC2530).

3.4.1 IAR *Embedded Workbench* IDE

O IAR permite desenvolver código em várias linguagens, como a linguagem de programação *C*, *Embedded C++* ou *assembly* disponibilizando compiladores para uma grande variedade de microprocessadores. O IAR é um ambiente de desenvolvimento completo normalmente utilizado para o desenvolvimento de *Software* para microprocessadores com limitações de memória, consumo e com funcionalidades bem definidas.

O IAR permite definir *workspaces* dentro do mesmo projeto através da atribuição de macros, permitindo criar diferentes perfis utilizando mecanismos de meta programação.

Existem várias vertentes deste IDE, dependendo da arquitetura de microprocessadores que se pretende programar. No contexto desta dissertação será utilizado o IAR *Embedded Workbench for 8051* [22] dado que a família CC da Texas Instruments[™] é compatível com a arquitetura Intel 8051.

3.4.2 SimpliciTI

A SimpliciTI é um protocolo proprietário da *Texas Instruments*[™] *Open Source*, destinado para o desenvolvimento de soluções WPAN. Este *stack* define apenas uma simples camada de rede e algumas aplicações que se distinguem por ter um *footprint* de código bastante reduzido, tipicamente necessitando de apenas de 8kB de memória de código e 1kB de memória de dados.

Como apresentado na Figura 31, a camada de rede desta tecnologia suporta apenas dois tipos de topologias distintas: estrela com repetidor e ponto-a-ponto. A SimpliCI define três tipos de papéis diferentes para cada nó da rede, *Gateway*, *Range Extender* e *End Device*. O *Gateway* é ponto central da rede, criando a ponte entre a WPAN e uma aplicação de interação com o sistema. O *Range Extender* funciona como um *sniffer* da rede, repetindo todos os pacotes que deteta enviando-os novamente OTA (*Over The Air*), permitindo assim, de uma forma muito simplificada aumentar o alcance da rede. Por fim, o *End Device* é o nó da rede que tem o papel de fazer interação direta com o meio através de processos de sensorização ou atuação.

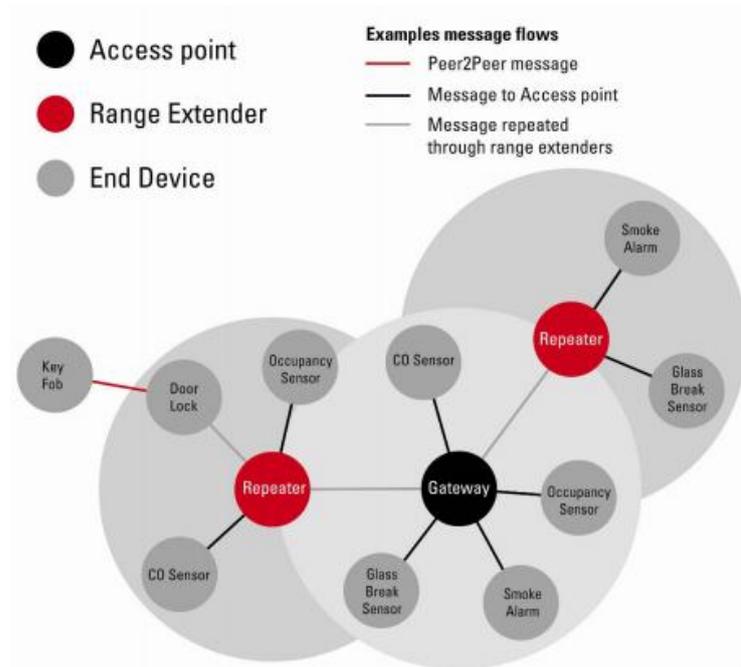


Figura 31: Topologias de rede SimpliCI [23].

A Figura 32 apresenta a arquitetura da *stack de Software* da SimpliciTI. A camada de dados e física é abstraída através do bloco MRFI, sendo este um simples *wrapper* que abstrai o acesso ao *transceiver* RF. Este bloco define um conjunto de *interfaces standard* aos níveis superiores de forma a garantir que a camada *Network* (NWK) não necessite de nenhuma adaptação.

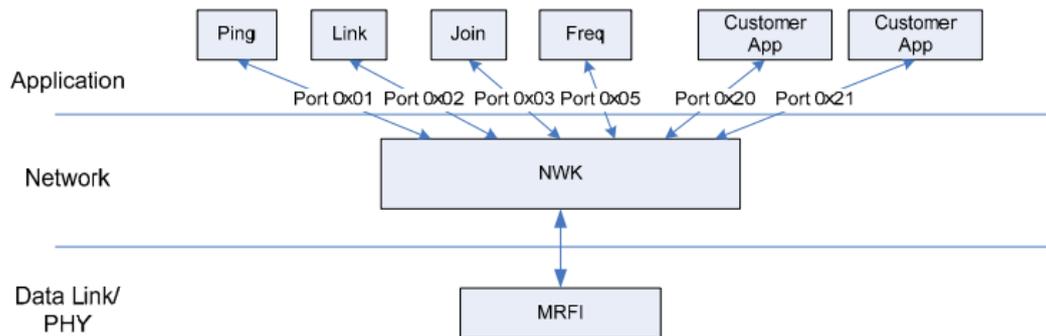


Figura 32: Arquitetura da *stack de Software* SimpliciTI [23].

A camada NWK tem a responsabilidade de criar, avaliar e controlar os canais de comunicação da rede WPAN, no entanto, não tem capacidade de fazer o encaminhamento de pacotes na rede (apenas repetição no caso do *Range Extender*).

Finalmente, a camada aplicacional é constituída por um conjunto de aplicações de rede *standard* (sobre a forma de funções):

- *Init*;
 - Registo na rede WPAN;
- *Create_Link/Linklisten*;
 - Criar/ligar a um *link* de comunicação bidirecional;
- *Nwk_mgmt*;
 - Permite monitorizar e consultar informação acerca dos *links* ativos;
- *Send/Receive*;
 - Permite enviar/receber pacotes sobre um *link*;
- *Freq*;
 - Permite alterar a frequência rádio da rede;

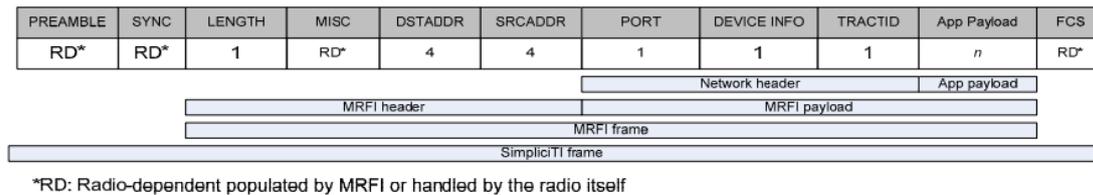


Figura 33: Estrutura da trama em todos os níveis da Stack SimpliciTI.

Na Figura 33 encontra-se apresentada a constituição da trama em todos os níveis da Stack de rede da SimpliciTI. O pacote de rede é processado em três camadas diferentes antes de ser entregue ao nível aplicativo. A primeira camada é o nível físico (*transceiver* RF) que adiciona três campos ao pacote, o *Preamble*, o *Sync* e o FCS (CRC). Estes servem para fazer a sincronização, detecção e verificação da consistência da trama na recepção. A segunda camada, MRFI, adiciona o tamanho do pacote, os endereços de destino e origem e, por último, o porto da aplicação ao qual deverá ser entregue o *payload* aplicativo. Finalmente, a camada de rede (NWK) adiciona dois campos, o *Device Info* e o *Sequence Number (TractID)*. O *Device Info* contém informação acerca de qual o tipo de dispositivo que enviou a mensagem e o *Sequence Number* tem como objetivo marcar com um número de sequência todos os pacotes de forma a evitar enviar para a camada aplicativo dados repetidos.

O *overhead* introduzido pelos pacotes SimpliciTI depende do tamanho do *payload* aplicativo que é personalizável.

4. Desenvolvimento

Este capítulo descreve todas as etapas envolvidas no desenvolvimento do sistema especificado no capítulo anterior. Na primeira fase desta secção será abordado o *design* do sistema a desenvolver, especificando detalhadamente a arquitetura adotada e as várias entidades. Na segunda e última fase serão abordados alguns aspetos da implementação do sistema, apresentando a conceção e desenvolvimento do *Software* e *Hardware*.

4.1 Arquitetura do Sistema

Nesta secção será explicado o desenho da arquitetura do sistema. Como se pode observar na Figura 34, o sistema encontra-se dividido em quatro grandes subsistemas (atores apresentados na secção 3.2), a aplicação *Android/iOS*, o *Gateway*, o controlador da Bomba de Calor e os vários *Zone Climate Control* (ZCC). O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação teve como foco principal os subsistemas *Gateway* e os ZCC.

O *Gateway* é responsável pelo acoplamento dos vários componentes do sistema fazendo uso de dois tipos de comunicações diferentes sem fios. A primeira baseia-se no serviço de SMS da tecnologia GSM que irá estabelecer um canal de comunicações remoto entre utilizador e o sistema. A segunda será uma WSN criada através da utilização da tecnologia *SimpliciTI*, que servirá de suporte à gestão e monitorização da temperatura e humidade, bem como a atuação dos ventiloconvectores colocados nas várias zonas a controlar, interagindo assim com os ZCC. O acoplamento com a Bomba de Calor da Pinto Brasil é feito através do protocolo I^2C , com o *Gateway* no papel de *slave*.

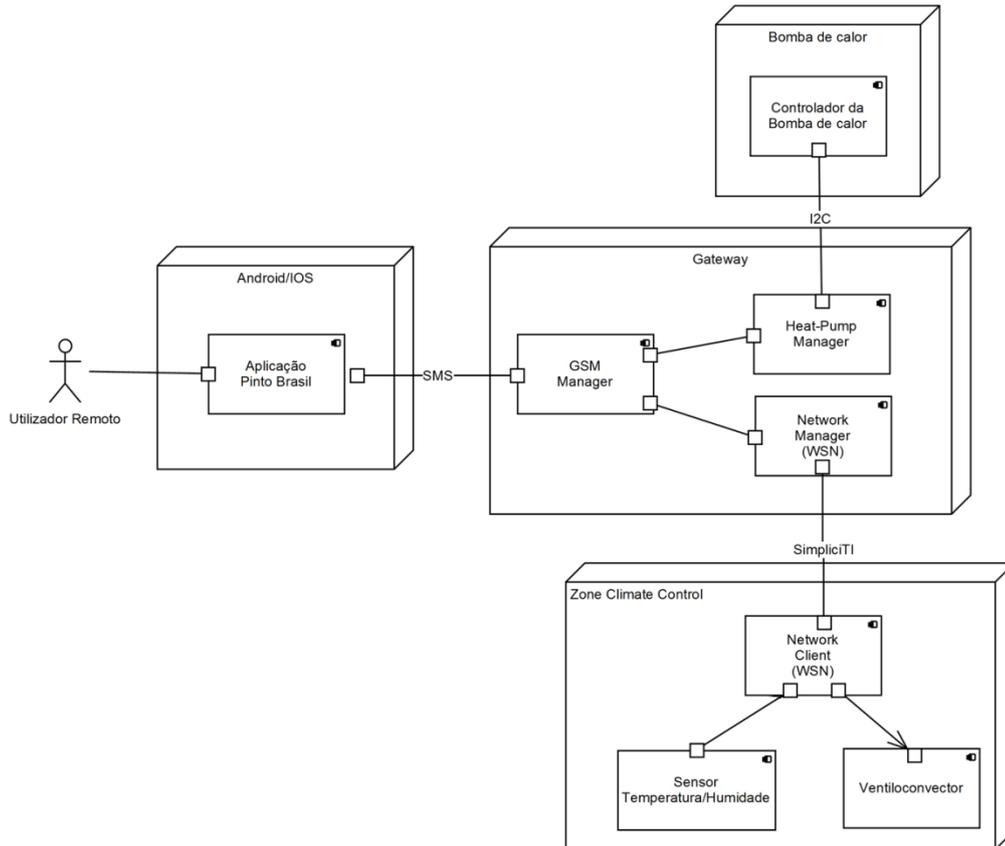


Figura 34: Visão global da arquitetura do sistema.

4.1.1 Componentes físicos do sistema

O sistema desenvolvido utiliza como unidade central de processamento o SoC CC2530 da *Texas Instruments*[™] descrito na secção 3.3.1.

A Figura 35 apresenta todos os atores e as suas interações entre os vários componentes físicos do sistema.

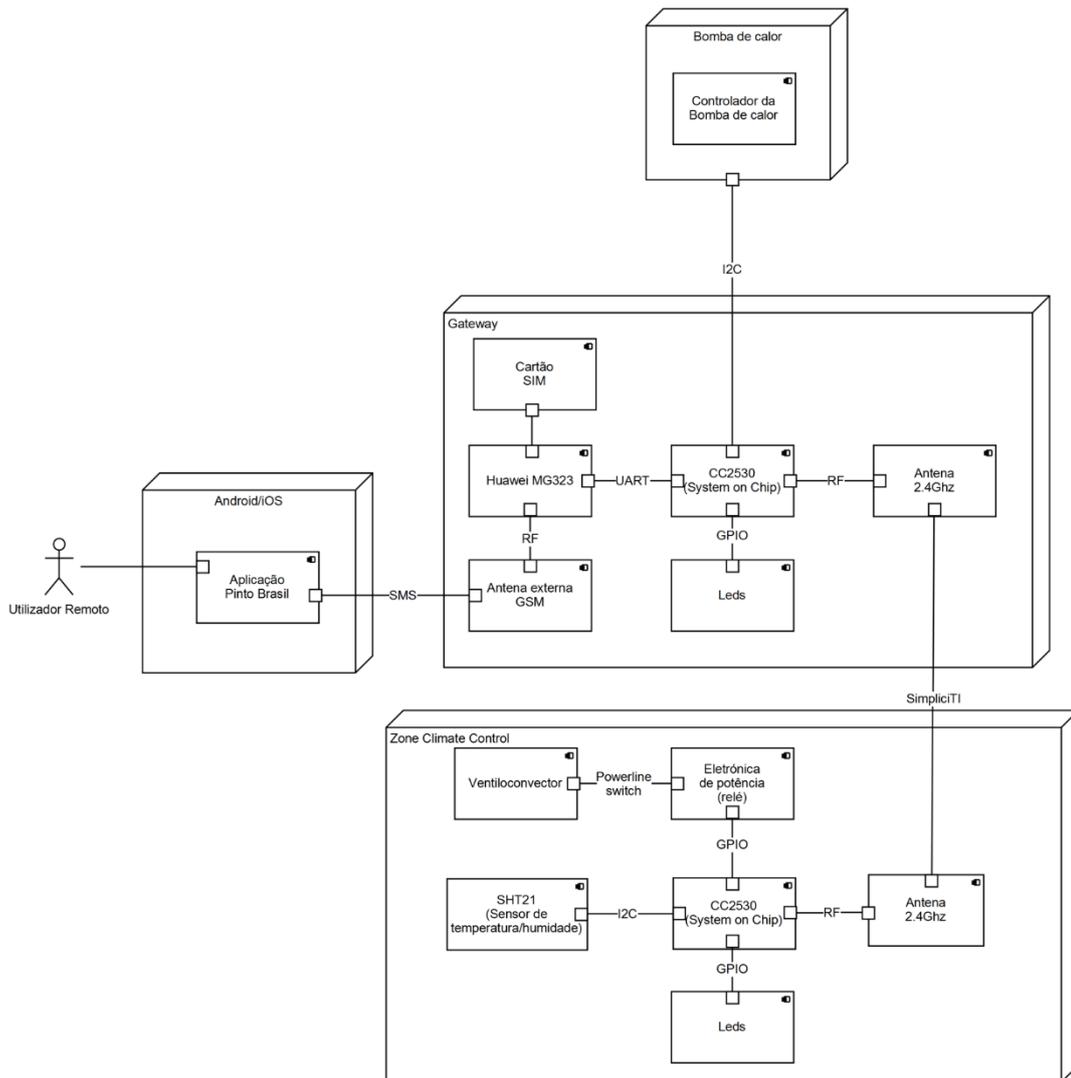


Figura 35: Interações entre os componentes físicos do sistema.

Gateway:

O *Gateway* é composto por um módulo de GSM/GPRS Huawei MG323 (apresentado na secção 3.3.1.2) ligado a uma antena externa dimensionada para a banda dos 900/1800 MHz. Derivado à natureza embebida do sistema, é necessário dar algum *feedback* acerca das ações em execução, sendo então colocados *leds* que permitem monitorizar de uma forma simples o estado do sistema. Dois pinos foram ainda reservados para a comunicação com o módulo controlador Bomba de Calor através da interface *I²C*.

A comunicação entre o *Gateway* e os ZCC é feita através da utilização do *transceiver* RF do SoC ligado a uma antena projetada para utilização na gama dos 2.4GHz.

Zone Climate Control:

Cada zona está ligada a uma WPAN através do *transceiver* RF do SoC. A utilização de *Leds* de sinalização permite a obtenção de um *feedback* local (*on-board*) minimalista sobre o funcionamento atual do sistema.

Como forma de atuar, o ZCC controla o ventiloconvetor através de um relé que altera o estado da alimentação, sendo que desta forma o sistema é compatível com qualquer equipamento disponível no mercado.

Em cada um dos ZCC será ainda instalado um sensor de temperatura e humidade, SHT21 da *Sensirion*, descrito na secção 3.3.3.

4.1.2 Comportamento do sistema

Esta secção apresenta o comportamento lógico e comportamental do *Gateway* e ZCC, detalhando a composição e relacionamento das entidades constituintes de cada sistema.

Gateway:

O *Gateway* é o componente do sistema que possibilita a comunicação entre um utilizador remoto, a Bomba de Calor e as várias zonas de atuação de climatização. Como tal, este sistema tem de estar permanentemente ativo, de forma a gerir todo o processamento referente às comunicações.

Os estados do *Gateway* encontram-se representados no diagrama de estados presente na Figura 36.

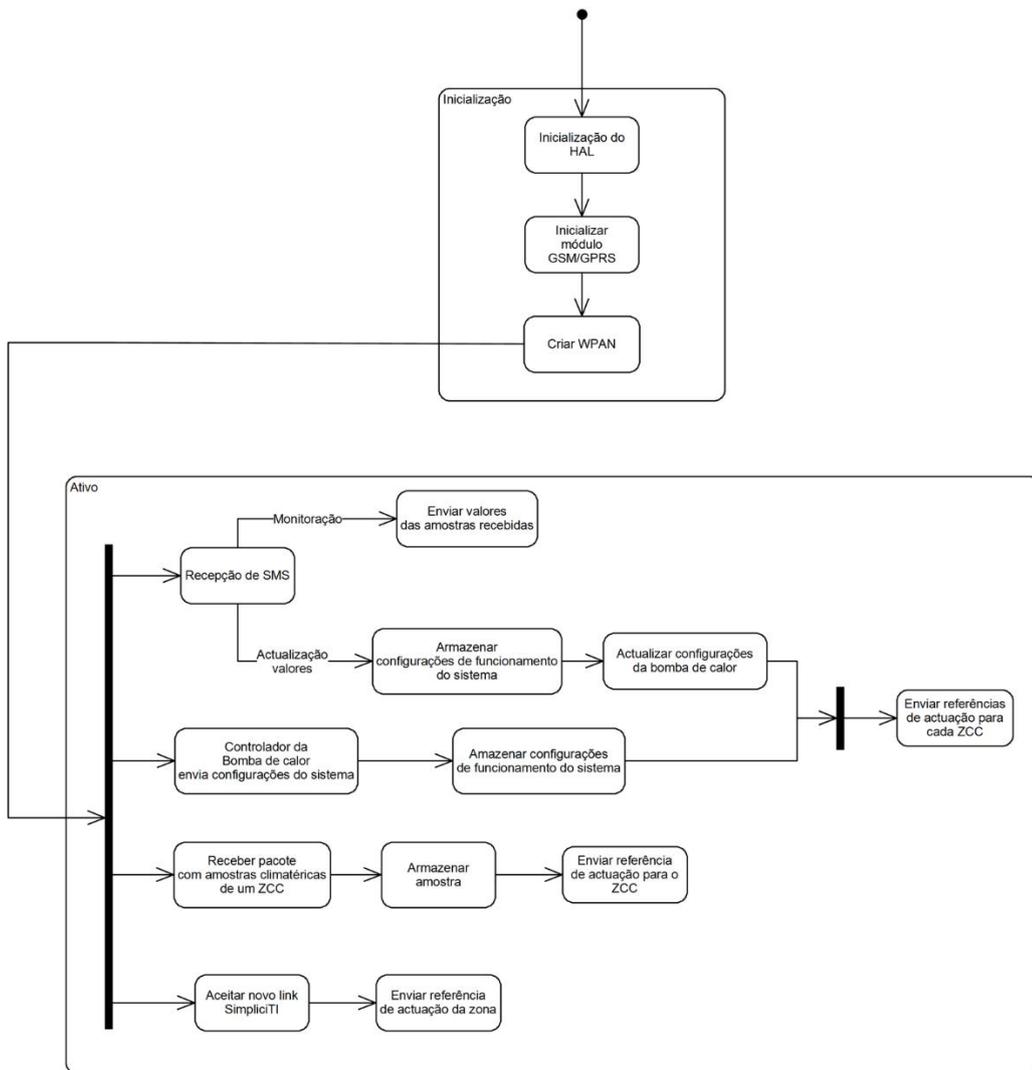


Figura 36: Comportamento do Gateway.

O *Gateway* tem duas rotinas principais, a inicialização e o ativo. No estado inicial são feitas todas as inicializações de *Hardware* como GPIO, periféricos e *stack* de rede SimpliCI TI.

Como o módulo de GSM funciona sobre o protocolo série UART, este é dos primeiros a ser inicializado. Por último, a WSN é criada e divulgada permitindo que os ZCC se consigam ligar e estabelecer uma rede.

O estado ativo deste dispositivo suporta e gere diferentes funcionalidades. A primeira será a de aceitar ligações de novos ZCC que tentam ligar-se ao sistema estabelecendo um canal de comunicações entre ambos. A segunda funcionalidade é a

de controlar o módulo GSM de forma a ser possível receber comandos provenientes da aplicação móvel. Desta forma é possível fazer *update* aos parâmetros de funcionamento dos ZCC, da Bomba de Calor e, também, a leitura dos parâmetros e das variáveis a monitorizar por todo o sistema. A terceira funcionalidade será de gerir e sincronizar os valores de funcionamento do sistema com a placa controladora da Bomba de Calor, fazendo um acoplamento entre estes dois sistemas autónomos. A última funcionalidade é receber os pacotes OTA de cada ZCC com informação instantânea acerca da temperatura e humidade da zona, e responder a este, com os valores de referência de atuação.

O *firmware* do *Gateway* implementa três grandes tarefas, o *Network_Manager* que gera e monitoriza os vários ZCC na rede SimpliTI, o *GSM_Manager* que processa a interação entre o utilizador e o sistema através da rede GSM e o *Heat_Pump_Manager* que comunica com a placa da Bomba de Calor no papel de *slave* do protocolo *I²C*.

Como se encontra apresentado na Figura 37, o *Gateway* é o ponto central do diagrama de classes e é o responsável pela execução das várias tarefas.

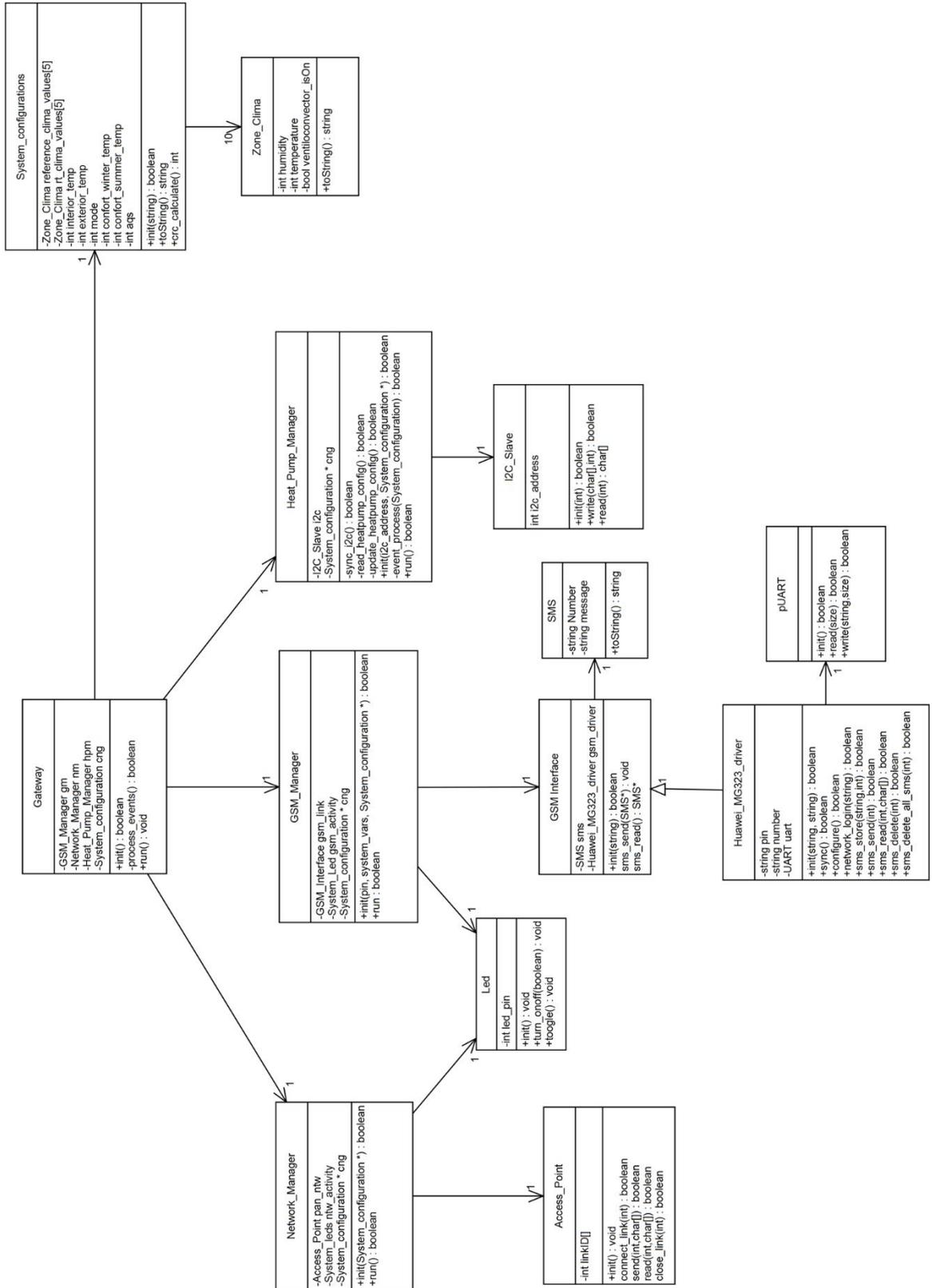


Figura 37: Diagrama de classes do Gateway.

Analisando o diagrama de classes apresentado na Figura 37, pode-se verificar que as configurações do sistema, as amostras e as referências de cada zona são armazenadas nas estruturas *System_Configurations* e *Zone_Clima*. O *Network_Manager* é responsável pela gestão da rede SimpliCI assumindo o papel de *Access Point*. Este faz uso de um *Led* para mostrar a atividade na rede WPAN.

O *GSM_Manager* é composto por uma *stack* de comunicação com o módulo Huawei MG323. O *GSM_Interface* é uma abstração de alto nível ao envio e recepção de SMS que faz utilização de um conjunto de comandos enviados para o módulo abstraído pelo driver *Huawei_MG323_driver*.

O *Heat_Pump_Manager* disponibiliza um conjunto de métodos de suporte à comunicação *I²C* implementada em *Software*, interligando o *Gateway* no papel de *slave* ao controlador da Bomba de Calor da Pinto Brasil, sendo este o master do barramento.

Zone Climate Control:

O ZCC é responsável por atuar e monitorizar periodicamente (encontra-se a dormir entre este intervalo) a climatização de uma determinada zona fechada através do controlo de um ventiloconvector. Este controlo on/off é baseado no corte ou fornecimento de energia ao ventiloconvector utilizando um relé.

A monitorização da temperatura e humidade é realizada utilizando o sensor de humidade/temperatura SHT21, cujos valores são enviados para o *Gateway* e que por sua vez os disponibiliza ao utilizador.

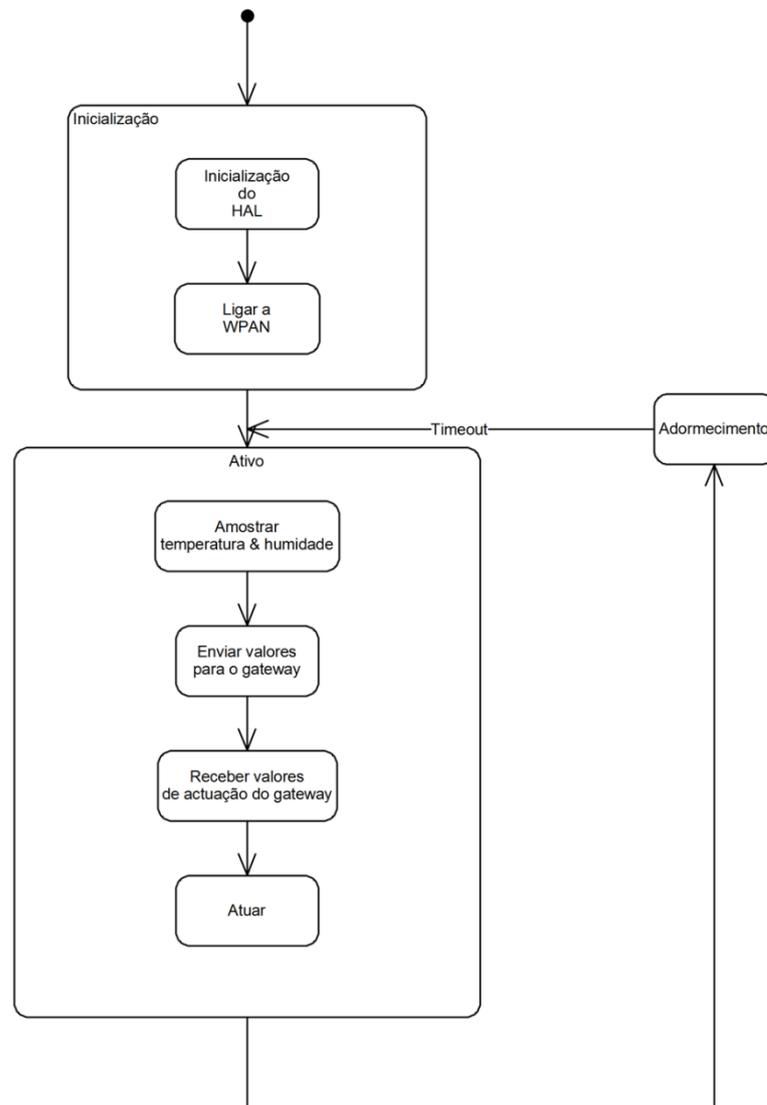


Figura 38: Comportamento do *Zone Climate Control*.

Como se pode ver no diagrama de estados apresentado na Figura 38, o sistema é composto por três estados diferentes. O primeiro estado corresponde à inicialização. Este é responsável pela inicialização do HAL e pela conexão à rede SimpliciTI. De seguida o sistema entra no estado ativo, amostrando a temperatura e humidade atual e enviando-os para o *Gateway*. Segue-se uma espera pela receção dos valores de referência de atuação, e por fim, o sistema altera o estado dos relés caso seja necessário ligar ou desligar o ventiloconvector. Após este estado ser executado o sistema entra no modo de adormecimento colocando o SoC em modo de poupança energética durante o tempo de amostragem por defeito (cerca de 20 segundos).

O *Zone Climate Control* é constituído por um sensor de temperatura e humidade para fazer a aquisição dos valores dessas grandezas da zona. O ZCC está equipado com dois relés para atuar sobre o ventiloconvector e um *switch* que configura o identificador que define a zona de atuação.

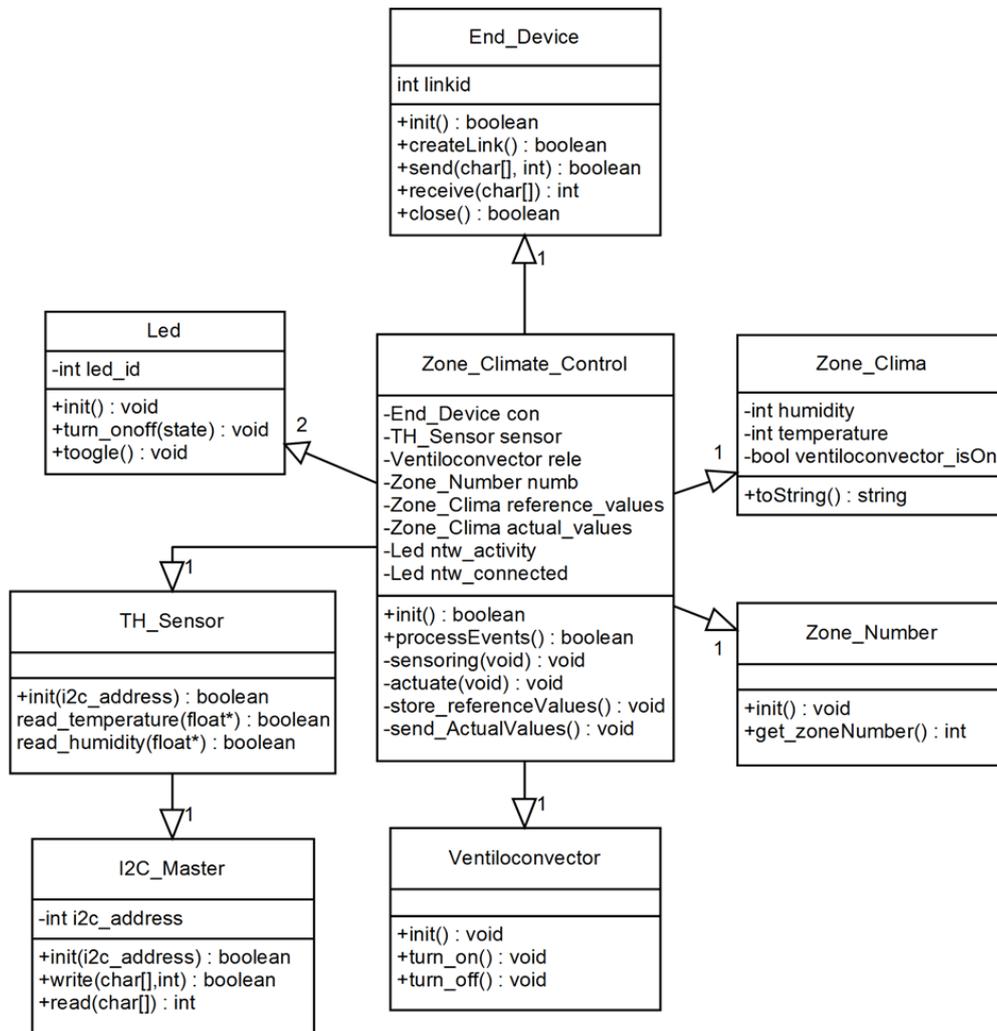


Figura 39: Diagrama de classes do *Zone Climate Control*.

O sensor de temperatura/humidade SHT21 vai ser controlado através do protocolo *I²C master*. O ventiloconvector apresentado na Figura 39 é um modelo representativo do componente, constituído por dois pinos de GPIO que controlam um par de relés, sendo desta forma possível controlar até dois ventiloconvectores em simultâneo.

De forma a apresentar a atividade da rede SimpliCI, mais concretamente o registo na rede e receção/envio de pacotes, foram utilizados dois *Leds*.

A estrutura *Zone_Clima* apresentada no diagrama de classes armazena os valores de referência de atuação e a amostras instantânea.

4.2 Implementação

A implementação do sistema “*Eco-Smart Heat Pump*” foi dividida em duas componentes de *Hardware* e *Software*, cujo desenvolvimento foi iterativo, característico de um projeto *Hardware-Software codesign* [24].

No *Hardware* será apresentado o resultado final da placa do *Gateway* e do ZCC, detalhando as funcionalidades de cada uma destas. Em seguida descreve-se o desenvolvimento da componente de *Software*, onde será apresentada um conjunto de API’s que tem como objetivo de fazer abstração ao *Hardware designada* por HAL (*Hardware Abstraction Layer*) e que servirá de base no desenvolvimento dos dois sistemas. Ainda nesta secção, serão apresentadas as *stacks* completas do *Gateway* e ZCC, assim como o comportamento lógico e sequencial implementado.

4.2.1 Hardware

De forma a alcançar um produto de custo reduzido e personalizável foi necessário desenvolver *Hardware* específico para esta solução. Como tal, foram desenvolvidos duas placas de circuito impresso (PCB) distintas, sendo uma para o *Gateway* e outra para os ZCC.

4.2.1.1 Gateway

O *Gateway* permite comunicar entre as diversas entidades do sistema através da utilização de várias tecnologias de redes sem fios. No decorrer desta dissertação foram desenvolvidas várias PCB’s de desenvolvimento intermédio, no entanto só serão

apresentados os resultados finais. Os esquemáticos desta PCB encontram-se apresentados desde o Apêndice 1 ao Apêndice 4.

A placa do *Gateway* é apresentada e legendada (com os seus componentes integrantes) na Figura 40, sendo constituída por:

- A. Entradas e saídas digitais para comunicação com a Bomba de Calor.
- B. Entradas e saídas digitais para comunicação com o módulo GSM por parte do microcontrolador, para efeitos de *debug* de *Hardware*.
- C. Módulo GSM Huawei MG323, com antena externa, responsável por efetuar comunicação com o microprocessador via protocolo série.
- D. *LED* de sinalização de rede GPRS.
- E. Botão de *reset* do módulo GSM.
- F. Controlador de dispositivo USB para comunicação USB com o computador (para efeitos de *debug* do *firmware*).
- G. Botão de alimentação geral da placa.
- H. Seletores baseados em *jumpers*, utilizados para efetuar a depuração ao *firmware* do microcontrolador através da entrada USB. Se estes seletores forem retirados o *debug* fica desabilitado.
- I. Botão de *reset* do microcontrolador.
- J. SoC CC2530 da *Texas Instruments*[™].
- K. Entradas e saídas digitais, que podem ser utilizados com outros periféricos ou para *depuração* de *Hardware*.

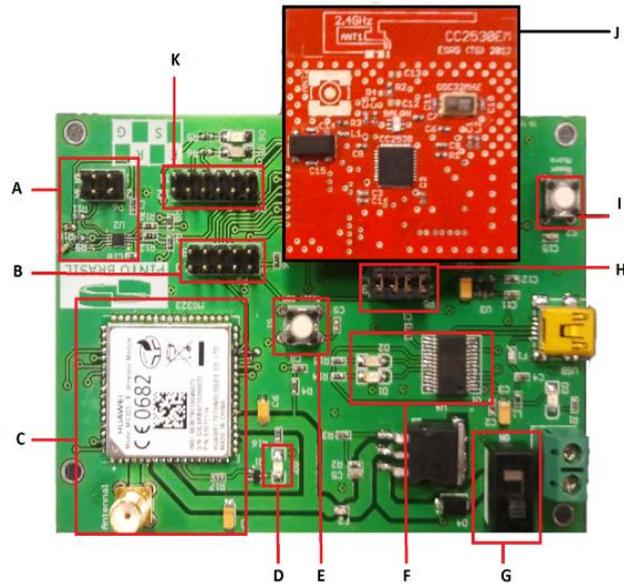


Figura 40: Gateway.

A Tabela 5 apresenta a atribuição de entradas e saídas entre o SoC e os restantes constituintes deste módulo.

Tabela 5: Pinout entre Gateway e CC2530EM.

Pino	Componente	Tipo
P0_2	Huawei_MG323	UART RX
P0_3	Huawei MG323	UART TX
P0_4	Huawei MG323	UART CTS
P0_5	Huawei MG323	UART RTS
P0_7	Bomba de Calor	I2C_SDA
P1_0	HUAWEI MG323	<i>Software reset</i>
P1_1	<i>Led de atividade rede GSM</i>	<i>LED (GPIO)</i>
P1_2	Bomba de Calor	I2C_SCL
P1_6	USB <i>debug</i>	UART TX
P1_7	USB <i>debug</i>	UART RX
P2_0	<i>Led de atividade rede Simpliciti</i>	<i>LED (GPIO)</i>

4.2.1.2 Zone Climate Control

A placa do ZCC controla a alimentação dos ventiloconvectores de forma a atuar sobre o meio, lê os valores de temperatura e humidade da zona através do sensor SHT21 e troca informação com o *Gateway*. O esquemático desta PCB encontra-se apresentado desde o Apêndice 5 ao Apêndice 7 deste documento.

A placa do ZCC encontra-se apresentada e legendada (com os seus componentes integrantes) na Figura 41, sendo esta constituída por:

- A. Dois relés para a atuação dos ventiloconvectores que suportam uma corrente máxima de 10A cada. Estas saídas encontram-se ainda protegidas por varistores de forma a atenuar picos de tensão que possam surgir nestes terminais. É de salientar que estes relés são acionados através de um *mosfet* canal N, também ele devidamente protegido contra sobretensões.
- B. Uma fonte de alimentação de 12V DC com proteção contra sobretensões, alimenta os relés, e fornece energia para os reguladores lineares de 5 e 3.3V, utilizados no circuito de controlo.
- C. Botão de alimentação da placa.
- D. Interruptores de seleção de zona que permitem uma combinação total de oito zonas sendo o interruptor menos significativo o botão '1' e mais significativo o botão '3'.
- E. *LED* indicador de energia.
- F. Sensor de temperatura e humidade que comunica com esta placa através do protocolo I²C.
- G. Entradas e saídas digitais com proteção contra sobretensões e descargas electroestáticas utilizadas para intercetar sinais entre componentes, como por exemplo, os sinais da transmissão série entre o SoC e o módulo GSM.
- H. Botão de *reset* do microcontrolador.
- I. SoC CC2530 da Texas Instruments™.

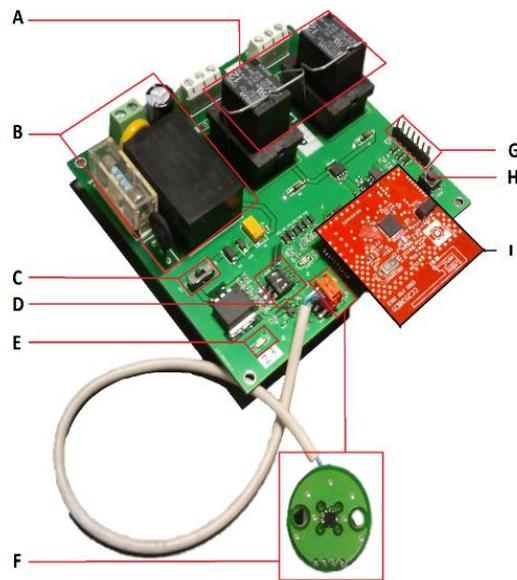


Figura 41: Zone Climate Control.

A Tabela 6 apresenta a atribuição de entradas e saídas entre o SoC e os componentes deste módulo.

Tabela 6: Pinout entre ZCC e CC2530EM.

Pino	Componente	Tipo
P0_0	Ventiloconvector	Relé (GPIO)
P0_1	Ventiloconvector	Relé (GPIO)
P0_7	SHT21	I2C_SDA
P1_1	Estado rede WPAN	LED (GPIO)
P1_2	SHT21	I2C_SCL
P1_6	USB <i>debug</i>	UART TX
P1_7	USB <i>debug</i>	UART RX

4.2.2 Software

Nesta secção descreve-se todo o *Software* desenvolvido para o SoC CC2530 do projeto “Eco-Smart Heat Pump”. Inicialmente será apresentada uma camada de

abstração ao *Hardware* desenvolvida no âmbito desta dissertação que facilita o acesso às diferentes funcionalidades do SoC e, por fim, será apresentado o *Software* desenvolvido para o *Gateway* e o ZCC.

4.2.2.1 Camada de abstração de *Hardware*

Uma vez que a SimpliciTI não se encontra preparada para dar suporte aos periféricos do SoC CC2530 foi necessário conceber, desenhar e desenvolver uma API que seja fácil de aceder às funcionalidades de *Hardware*. Esta API dá por nome de HAL (*Hardware Abstraction Layer*) e permite criar um nível de abstração, sob a forma de *Software*, dos periféricos do SoC CC2530. Esta camada define protótipos de funções universais e tem o objetivo de ser facilmente alterada em futuros *portings*.

A arquitetura do HAL encontra-se apresentada na Figura 42.

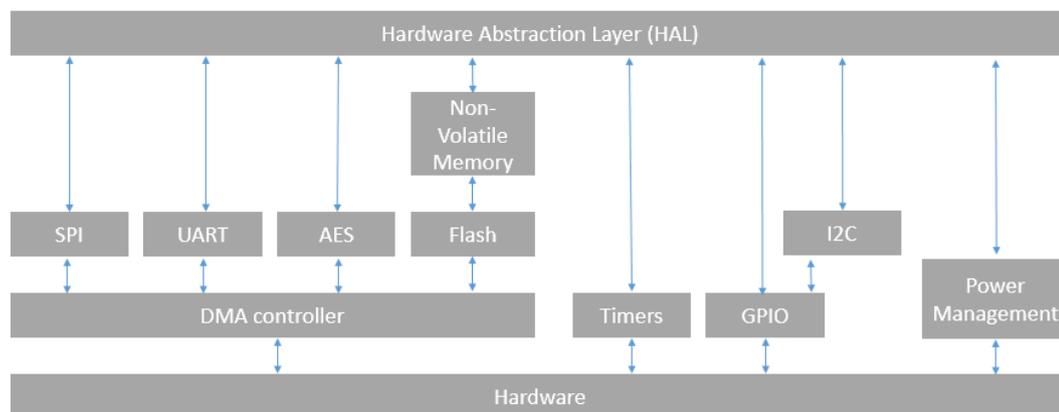


Figura 42: Arquitetura da HAL.

O HAL abstrai várias funcionalidades do SoC, criando assim mecanismos para aceder facilmente aos registos de cada módulo. Desta forma, foi também possível realizar testes unitários para garantir que os constituintes produzem os resultados esperados.

Controlador de DMA:

Este módulo permite abstrair a interação com o controlador de DMA (*Direct Memory Access*) do SoC, permitindo fazer cópias de segmentos entre a memória de dados *RAM*, sem utilização do CPU, atingindo taxas de transferências elevadas, pois utiliza apenas processamento por *Hardware*.

Este módulo dispõe de oito canais diferentes de funcionamento. Depois de configurado e ativado um dos canais, o controlador de DMA funciona paralelamente com o CPU, ativando uma interrupção quando o processo de transferência de dados estiver concluído, sendo este o ponto de sincronização do processo.

O DMA é um bloco importante para a utilização na máxima performance dos periféricos do SoC pois este transfere dados a alta velocidade gerindo automaticamente os sinais de controlo de cada periférico.

Este bloco permite alocar e gerir os canais de DMA a serem utilizados na transferência de dados, sendo assim importante para as camadas superiores.

A Listagem 1 apresenta a interface deste módulo, sendo que este é constituído por três funções distintas: *dma_init* para inicialização do driver, *dma_load* para configurar um determinado e preparar um determinado canal e finalmente o *dma_trigger* que inicia o processo de transferencia de dados.

```
void dma_init(dma_channel_t channel);  
void dma_load(void * src, void * dest, uint32_t len, bool src_to_dest, dma_trigger_t trig);  
void dma_trigger(dma_channel_t channel, (void)*cb(dma_channel_t));
```

Listagem 1: Interface HAL do controlador de DMA.

Temporizadores:

Este módulo dá suporte aos *timers* do SoC permitindo configurá-los em diferentes modos (síncrono, assíncrono) e também com vários divisores do sinal de relógio de entrada.

Este permite ainda criar vários *soft-timers*, úteis para realizar várias tarefas concorrentes com recurso a funções de *callback*.

A Listagem 2 apresenta o conjunto de funções que fazem interface com esta funcionalidade.

```
void msTimer_start(timer_t timer, (void) *cb(timer_t), uint32_t ms_sec);  
void msTimer_sleep(uint32_t ms_sec)  
void msTimer_cancel(timer_t timer);
```

Listagem 2: Interface HAL dos temporizadores.

GPIO:

O módulo de GPIO (*General Purpose Input/Output*) permite requisitar e interagir com as portas de entradas e saídas digitais do SoC. Este tem como objetivo desmultiplexar interrupções e invocar uma função de *callback* para informar a aplicação que previamente requisitou o uso de determinado pino. A Listagem 3 apresenta os prototipos das funções suportadas por este bloco.

```
void gpio_init(gpio_pin pin, gpio_mode_t mode);  
void gpio_setpin(gpio_pin pin, bool value);  
bool gpio_readpin(gpio_pin pin);  
void gpio_setInterrupt(gpio_config conf, (void)*cb(gpio_pin));  
void gpio_disableInterrupt(gpio_config conf, (void) *cb(gpio_pin));
```

Listagem 3: Interface HAL do GPIO.

I²C:

Este protocolo foi totalmente implementado em *Software* utilizando leitura e escrita dos portos de entradas e saídas digitais do SoC. De forma a utilizar este módulo é necessário fazer uma requisição dos portos a utilizar, utilizando a biblioteca GPIO.

O I²C é um protocolo bastante simples, que é utilizado para interligar através de um único barramento vários dispositivos a um único controlador. Todo o controlo do

barramento é feito através da introdução de informação redundante na linha de dados (endereço de destino) pelo *master*.

Este protocolo é geralmente baseado em pergunta e resposta, sendo que a pergunta é efetuada pelo controlador (*master*) e a resposta é dada por um dispositivo dedicado, *designado* por *slave* (por exemplo: um sensor).

A simplicidade do *Hardware* deste tipo de protocolos é evidente pois apenas utiliza dois fios para a transmissão dos dados, SDA para os dados e SCL para o *clock*.

Uma sessão do protocolo I^2C , exemplificado na Figura 43, é iniciado e controlado pelo dispositivo master, começando pela oscilação da linha SDA do nível lógico um para zero, sendo esta a condição inicial (*Start condition*) do início da comunicação. De seguida é enviado o *byte* de controlo (sendo o primeiro bit o mais significativo) que é constituído pelo endereço do dispositivo no barramento (sete *bits* mais significativos) e o tipo de operação (bit menos significativo) que pode ser de leitura ou escrita no dispositivo.

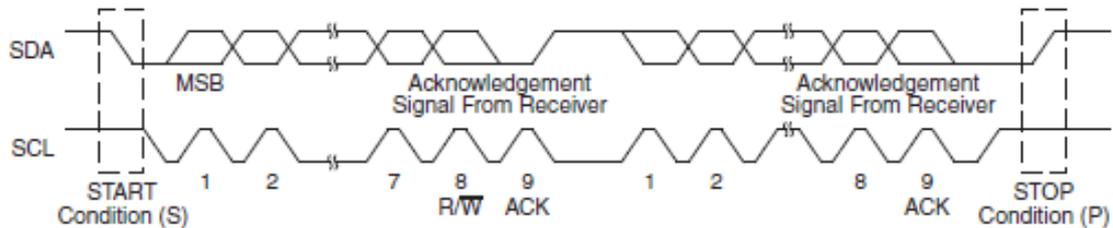


Figura 43: Sessão do protocolo I^2C [19].

Sempre que é enviado um *byte* (tanto de dados como de controlo) no barramento, o recetor precisa de confirmar a sua receção alterando o estado da linha SDA do nível lógico um para zero. No protocolo I^2C as linhas de SCL e SDA estão configuradas em coletor aberto, pelo que se utilizam resistências de *pull-up* externas (logo o estado da linha em *idle* é sempre o nível lógico um).

Depois do envio do *byte* de controlo, é iniciado o envio/receção dos *bytes* de dados. No final do envio de todos os *bytes* de dados da sessão é enviada a condição final de trama (*Stop condition*) que indica o fim de sessão. A Listagem 4 apresenta

funções que permitem abstrair os passos explicados anteriormente. Com a utilização destas funções é possível, facilmente, criar sessões de *master* e *slave*.

```
void i2c_init(void);  
void i2c_start(void);  
void i2c_end(void);  
uint8_t i2c_read_byte(void);  
bool i2c_write_byte(char c);  
bool i2c_write_address(uint8_t address, bool is_writing);
```

Listagem 4: Biblioteca genérica de *bit banging I²C*.

Controlo de energia:

A grande maioria dos microcontroladores atuais possui uma unidade de gestão de energia (*Power Management*), esta funciona, regra geral, através do corte de energia de algumas partes do MCU que não estejam a ser utilizadas. A comutação entre os vários modos de energia pode ser feita por *Software* ou o MCU é despertado por via de interrupções, quer temporais, quer de entradas digitais. A utilização correta destes modos permite alcançar consumos muito reduzidos, dependendo das características e requisitos do sistema. A Listagem 5 apresenta a função de interface com este módulo.

```
void pwr_control_trigger(pwr_mode pwr_m);
```

Listagem 5: Interface HAL com o bloco de controlo de energia.

SPI:

O protocolo série SPI [25] (*Serial Peripheral Interface*) permite criar um barramento que interliga vários componentes a um único controlador de uma forma síncrona. Ao nível protocolar, cada componente da rede é chamado de *slave* e o controlador é o *master*. No barramento SPI só pode existir um *master*, pois é este que controla o débito e o fluxo de dados através das linhas de *clock* (SCLK) e de *chip select* (CS).

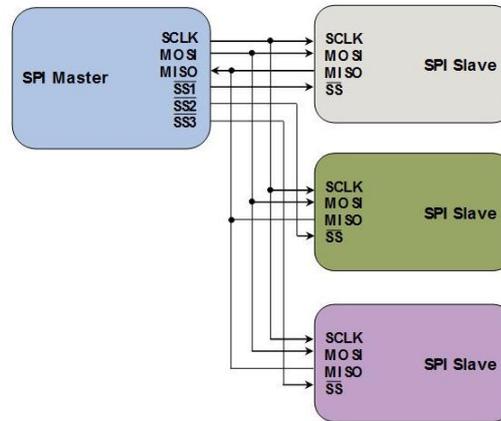


Figura 44: Rede de dispositivos SPI.

Existem apenas duas linhas de comunicação para sinais de dados, que são estas *MISO* (*Master Input Slave Output*) em que o *master* recebe informação e o *slave* escolhido pelo *chip select* envia e o *MOSI* (*Master Output Slave Input*) apresenta o sentido inverso da comunicação.

A trama deste protocolo encontra-se apresentada na Figura 45, e como pode ser visível esta não introduz nenhuma redundância no envio das mensagens dado que todo o controlo é feito por linhas dedicadas.

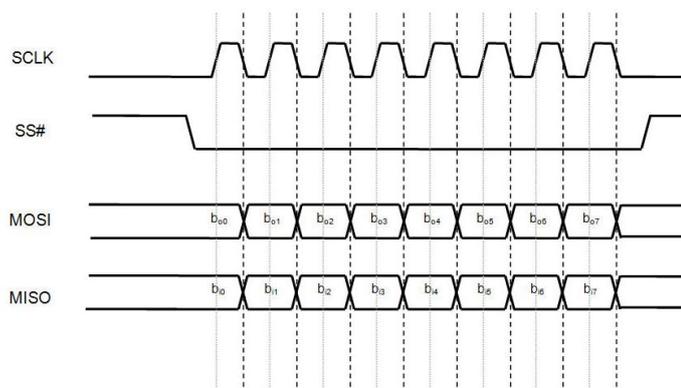


Figura 45: Trama do protocolo SPI [26].

A Listagem 6 apresenta as funcionalidades deste bloco. Esta biblioteca permite utilizar e configurar o SPI tanto no modo de slave como master.

```
void spi_init(usart_t usart, spi_mode mode);  
void spi_write(uint8_t * buff, uint16_t len);  
uint8_t spi_read(uint8_t * buff, uint16_t len);  
uint8_t spi_read_and_write(uint8_t * buff, uint16_t len, uint8_t * out);
```

Listagem 6: Interface HAL com SPI

UART:

O módulo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) é utilizado para estabelecer comunicações série assíncronas. Normalmente é utilizado para fazer acoplamento de sistemas ou para o controlo de periféricos.

O protocolo série pode ser feito com ou sem controlo de fluxo (a quatro ou dois fios, respetivamente). O controlo de fluxo pode ser efetuado com mecanismos de RTS/CTS, DTR/DSR ou XON/XOFF.

Este protocolo permite ainda fazer deteção de erros ao nível do byte utilizando mecanismos de verificação de erros baseados na introdução de *bits* de paridade (podendo acrescentar até dois *bits* ao byte). A Listagem 7 apresenta as interfaces desta funcionalidade.

```
void uart_init(usart_t usart,uart_conf config);  
uint16_t uart_write(usart_t usart, uint8_t * buff, uint16_t len);  
uint16_t uart_read(usart_t usart, uint8_t * buff, uint16_t len);
```

Listagem 7: Interface HAL com UART

Módulo de encriptação de dados AES:

Este módulo permite dar suporte ao coprocessador de cifragem do CC2530. Pretende-se com este módulo abstrair da camada aplicacional a forma como a cifragem é feita (*Hardware* ou *Software*) disponibilizando, assim, uma API simples e encapsulada.

O AES é um algoritmo de cifragem simétrico em que a entropia do processo depende unicamente de uma chave conhecida entre dois terminais. O AES atende às seguintes especificações [27]: é um algoritmo público em que a entropia apenas depende da chave, é uma cifra simétrica de bloco, foi projetado para que o tamanho da chave possa aumentar, é de simples implementação de *Software* como *Hardware* e detém uma licença ANSI para poder ser disponibilizado livremente. A Listagem 8 apresenta a interface com este mecanismo.

```
void AESSecurityInit(uint8_t* pKey,uint8_t * IV);  
void AesEncrypt(AES_encryptionMode mode, uint8_t *pDataIn, uint16_t length, uint8_t *pDataOut);  
void AesDecrypt(AES_encryptionMode mode, uint8_t *pDataIn, uint16_t length, uint8_t *pDataOut);
```

Listagem 8: Interface HAL com AES

Controlador da memória *Flash*:

Este bloco permite dar suporte ao controlador de memória *flash* do SoC. Desta forma é possível armazenar informação de forma não volátil, bastante útil para armazenar configurações do sistema.

No caso do CC2530, a memória *flash* armazena também o código do programa e apenas permite o acesso à memória em blocos de 1024 *bytes*. Para além disso, é importante referir que a quantidade de escritas nesta memória é relativamente baixo, pelo que a escrita frequente é desaconselhada. Estes são as principais limitações desta funcionalidade.

O módulo *non-volatile memory* apresentado na Figura 42 encontra-se implementado sobre o controlador de memória *flash*. Este, permite ler/escrever estruturas de dados inferiores a 1024 *bytes* na memória *flash*, garantindo que os

dados não são armazenados sobre a zona de código fazendo automaticamente a gestão da memória utilizando o mecanismo apresentado na Figura 46.

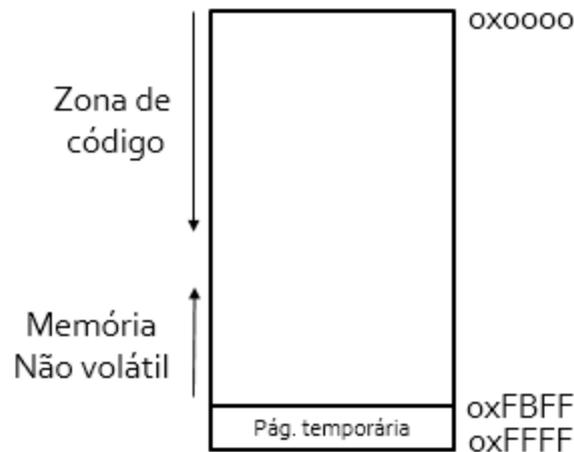


Figura 46: Gestão da memória *Flash*.

Como se pode ver na Figura 46 o código gerado pelo compilador é colocado sempre a partir do início do segmento. Assumindo que este não vai ocupar todo o segmento da memória *flash*, serão aproveitadas as últimas páginas para armazenamento de blocos de dados, no entanto a última página do segmento será temporária e será utilizada em processos de atualização de blocos. A Listagem 9 apresenta o conjunto de funções que lidam com esta funcionalidade.

```
void flashController_erase(uint8_t pg);
bool flashController_is_page_free(uint8_t pg);
void flashController_write(uint8_t pg, uint16_t offset_4b, uint8_t * buf, uint16_t len);
void flashController_read(uint8_t pg, uint16_t offset_4b, uint8_t * buf, uint16_t cnt);
```

Listagem 9: Interface HAL com o controlador de flash

4.2.2.2 Gateway

O *Gateway* é composto por três tarefas distintas, o *GSM_Manager* que permite fazer interface com a aplicação Pinto Brasil através do envio e receção de SMS, o *Heat_Pump_Manager* que é responsável pelo acoplamento do *Gateway* com a Bomba de Calor e, por fim, o *Network_Manager* que é responsável pela gestão dos ZCC.

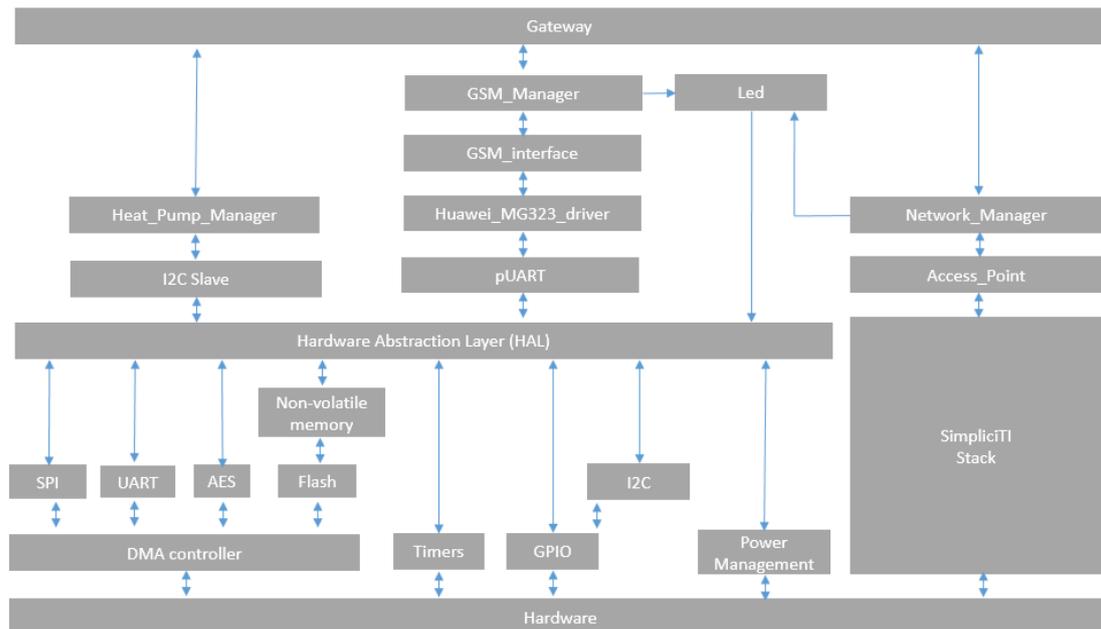


Figura 47: Stack completa do Gateway.

A Figura 47 apresenta a composição completa do *Gateway*. É importante referir neste ponto, que a *SimpliciTI* se encontra ao mesmo nível do HAL (apresentado na secção 4.2.2.1) dado que esta também possui uma camada de abstração aos registos do *transceiver* do SoC, no entanto, não existe nenhuma dependência entre ambos. A camada aplicacional do *Gateway* é totalmente dependente destes dois recursos.

Devido ao facto de a *stack* de rede *SimpliciTI* não possuir sistema operativo foi necessário criar paralelismo (algo similar ao *multitasking*) ao nível aplicacional de forma a conseguir a abstração de tarefa. A Figura 48 apresenta o comportamento genérico do sistema, baseando-se num dos algoritmos mais simples de agendamento de processos sem prioridades, o *Round Robin*.

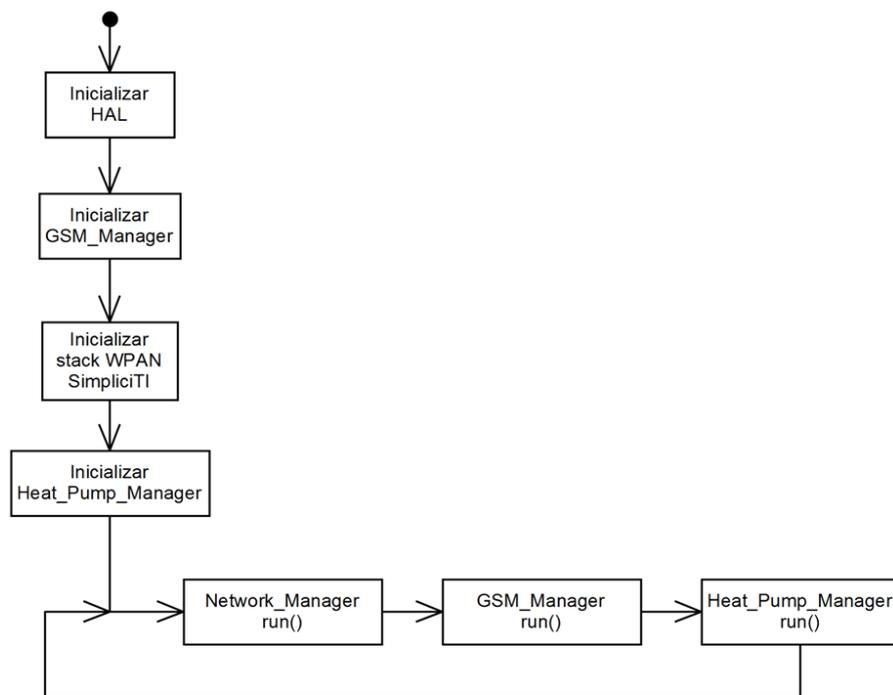


Figura 48: Comportamento do Gateway.

Cada processo, *Network_Manager*, *GSM_Manager* e *Heat_Pump_Manager*, tem a responsabilidade de processar e gerir as suas próprias interrupções, por exemplo, se uma interrupção do *Network_Manager* ocorrer esta só será processada quando este processo for executado novamente.

Network_Manager:

O processo *Network_Manager* tem como objetivo armazenar a informação climática amostrada e enviada para o meio pelo ZCC e, de seguida, enviar a informação climática referencial para o mesmo. Desta forma, pode atuar com os valores configurados pelo utilizador, como se pode observar no fluxograma comportamental do processo apresentado na Figura 49. Este processo é terminado quando todos os pacotes armazenados na FIFO (*First In First Out*) da SimpliciTI forem processados.

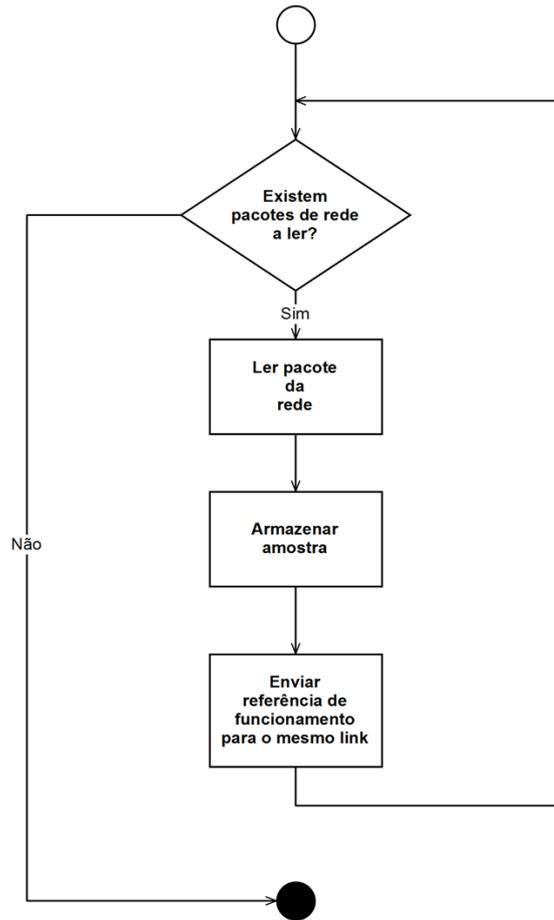


Figura 49: Comportamento da tarefa do *Network_Manager*.

O protocolo aplicacional com a informação climática trocada entre *Gateway* e ZCC encontra-se descrito na Figura 50. Este é igual em ambas as direções, no entanto, no sentido *Gateway*-ZCC são enviados os valores de funcionamento do ZCC, e na direção oposta, são enviados os valores amostrados de temperatura e humidade e o estado atual do ventiloconvector.

ID Zona <7 bits>	Ventiloconvector (On/Off) <1 bit>	Temperatura <1 byte>	Humidade <1 byte>
---------------------	--------------------------------------	-------------------------	----------------------

Figura 50: Protocolo aplicacional da rede SimpliciTI.

O *Network_Manager* permite ainda entrar em modo de conhecimento dos nós se for pressionado o botão de “*learn*” apresentado na Figura 51 ligação 4. O modo de “*learn*” é um mecanismo que se baseia na aprendizagem da rede de forma a

possibilitar a criação de uma WPAN privada sem que os dispositivos estejam pré programados, fazendo uma partilha de chaves de cifragem entre os vários elementos do sistema sem fios.

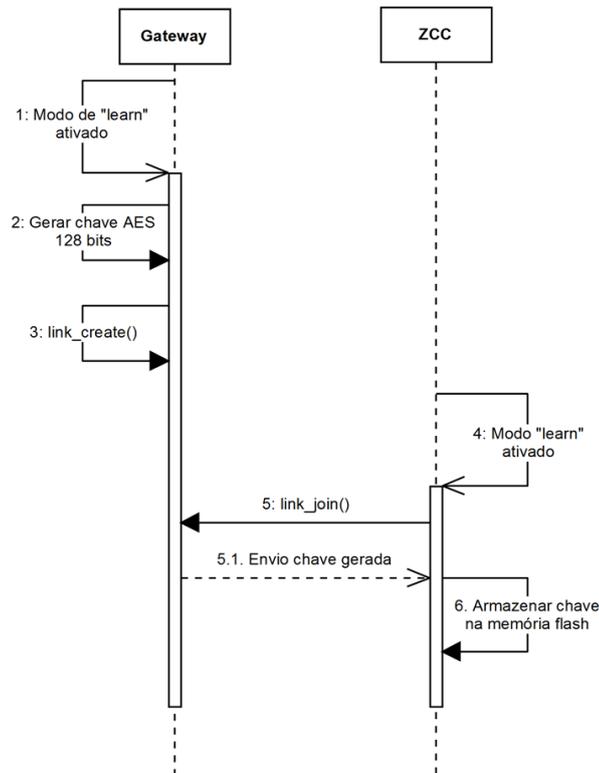


Figura 51: Processo de aprendizagem e troca de chaves.

Este mecanismo é ativado através de um botão de pressão, disponível tanto no *Gateway* e como no ZCC. O *Gateway* é responsável por gerar uma chave simétrica AES de 128 *bits* (se já a tiver gerado utiliza a chave armazenada na Flash) e partilha-la com todos os ZCC que estiverem no modo “*learn*”. Esta é armazenada na memória *flash* de cada nó. Quando os sistemas estiverem em funcionamento normal, a chave será utilizada para cifrar todas as mensagens trocadas na rede sendo que os nós que se tentem ligar à rede e que não possuam a chave de cifragem correta não serão reconhecidos pelo *Gateway* e por isso, serão ignorados.

GSM_Manager:

O *GSM_Manager* é responsável por estabelecer um canal de comunicação entre o utilizador e o sistema, utilizando a rede GSM mais concretamente o serviço de SMS.

Esta tarefa tem como objetivo ler os comandos embudados no conteúdo de uma SMS, existindo apenas dois tipos de comandos distintos: leitura dos parâmetros/valores atuais do sistema e definição dos parâmetros referenciais para cada zona de atuação. A Figura 52 apresenta o fluxograma com o comportamento deste processo.

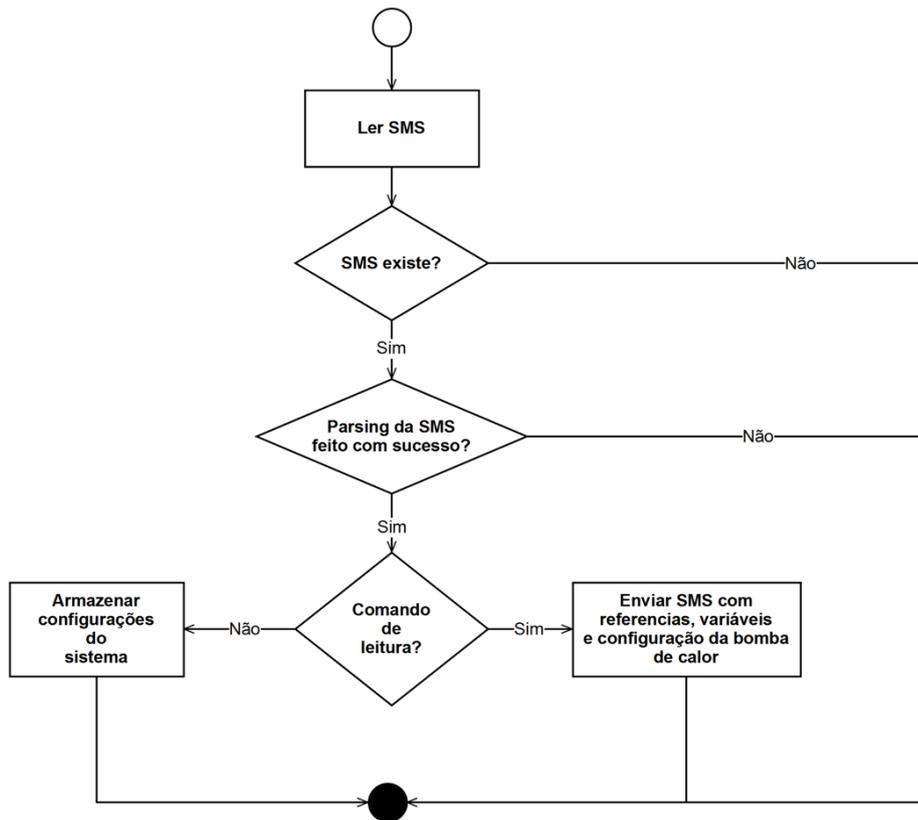


Figura 52: Comportamento do *GSM_Manager*.

A convenção da estrutura da SMS que irá ser trocado entre a aplicação e o *Gateway* foi decidida em acordo com a empresa Pinto Brasil. Uma SMS irá transportar sempre toda a informação referente ao sistema de forma a utilizar este recurso eficientemente.

Foi estabelecido que cada campo presente na SMS terá a seguinte estrutura léxica “[CAMPO][OPCIONAL VALOR_ACTUAL] [VALOR_REFERENCIAL];”. A descrição de cada campo encontra-se definida na Tabela 7.

Tabela 7: Definição e descrição dos campos do protocolo da SMS.

CAMPO	DESCRIÇÃO	CAMPO	DESCRIÇÃO
5 T	Temperatura Interior	8T	Temperatura conforto Verão
6 T	Temperatura exterior	9T	Temperatura AQS
1 M	Modo	[0,4]T	Temperatura Zona
2 M	Programação	[0,4]H	Humidade Zona
7 T	Temperatura Conforto Inverno	[0,4]V	Ventiloconvector (On/Off)

O protocolo da SMS trocado entre a aplicação Pinto Brasil e o *Gateway* encontra-se descrito na Listagem 10. Como se pode observar apenas há o envio dos valores referenciais de todos os campos, permitindo assim definir todos os parâmetros de funcionamento do sistema.

5 T [REF];6 T [REF];1 M [REF];2 M [REF];7 T [REF];8 T [REF];9 T [REF];0 T [REF];1 T [REF];2 T [REF];3 T [REF];4 T [REF];0 H [REF];1 H [REF];2 H [REF];3 H [REF];4 H [REF];0 V [REF];1 V [REF];2 V [REF];3 V [REF];4 V [REF];

Listagem 10: *Payload* da SMS entre Aplicação e *Gateway*.

No sentido inverso de comunicação, descrito na Listagem 11, são retornados os valores referenciais de funcionamento do sistema e também as amostras atuais de cada zona. A aplicação Pinto Brasil faz o *parsing* da SMS e coloca os valores no local correto do GUI.

5 T [REF];6 T [REF];1 M [REF];2 M [REF];7 T [REF];8 T [REF];9 T [REF];0 T[VALOR] [REF];1 T[VALOR] [REF];2 T[VALOR] [REF];3 T[VALOR] [REF];4 T[VALOR] [REF];0 H [REF];1 H [REF];2 H [REF];3 H [REF];4 H [REF];0 V [REF];1 V [REF];2 V [REF];3 V [REF];4 V [REF];

Listagem 11: *Payload* da SMS entre *Gateway* e Aplicação.

Heat_Pump_Manager:

O *Heat_Pump_Manager* tem como objetivo interligar o controlador da Bomba de Calor (desenvolvida pela Pinto Brasil) e o *Gateway*. O protocolo negociado com a empresa foi uma versão simplificada e ligeiramente modificada do I^2C , atuando o controlador da Bomba de Calor como *master* e o *Gateway* como *slave*.

Dado que a comunicação entre as duas placas deverá ser bidirecional e assíncrona e o protocolo I^2C ser controlado apenas pelo *master*, detetou-se aqui uma possível fonte de problemas no acoplamento entre os dois sistemas. Foi efetuada, por isso, uma análise de uma solução para este problema dado que a empresa não poderia alterar o *Hardware* do controlador da Bomba de Calor.

Deste modo foi desenvolvido um mecanismo de tentativas por parte do controlador da Bomba de Calor utilizando este protocolo. Periodicamente (sensivelmente de segundo a segundo) a Bomba de Calor tenta estabelecer uma sessão I^2C com o *Gateway*, esperando assim por um *acknowledge* na trama I^2C , de forma a ter certeza ligação foi estabelecida com sucesso. Esta abordagem colocou em causa o determinismo do sistema, criando algum atraso e ineficiência nos dois sistemas, no entanto, a empresa aceitou a solução dada e não foi necessário alterar fisicamente o seu sistema.

O algoritmo implementado pelo *Gateway* de forma a estabelecer a ligação entre as duas placas encontra-se descrito na Figura 53.

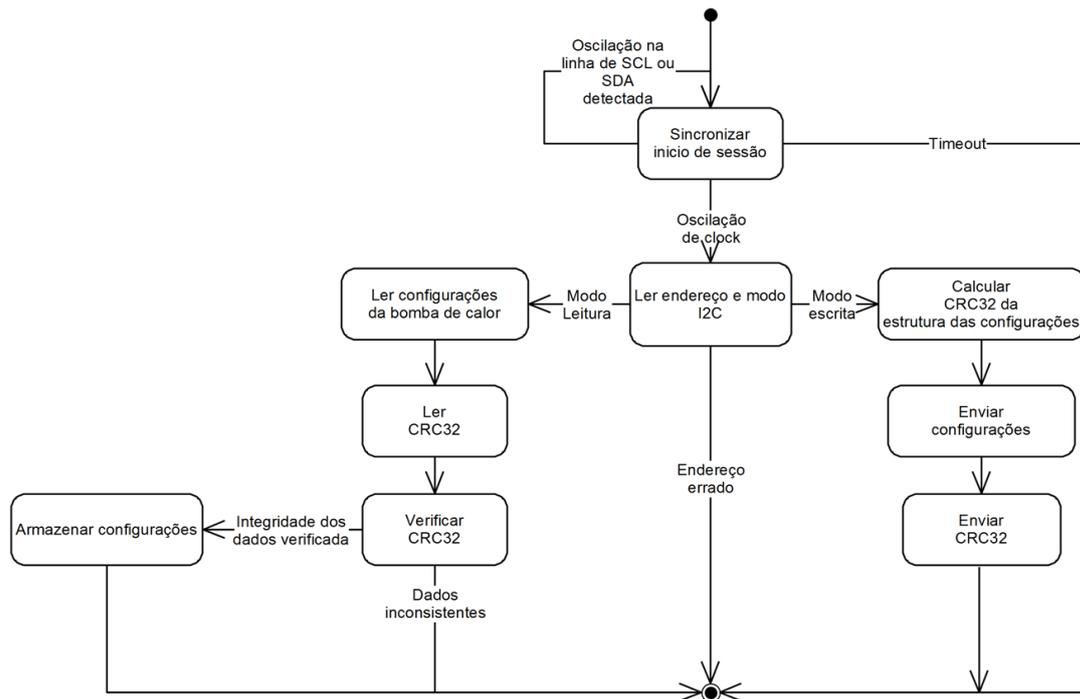


Figura 53: Diagrama de estados do algoritmo implementado no *Gateway* com versão modificada do I^2C .

O estado “Sincronizar início de sessão”, apresentado na Figura 53, monitoriza as linhas de dados e de *clock* de forma a garantir o sincronismo com o início da trama. Desta forma, é garantida a sincronização para execução do algoritmo de *bit banging* I^2C (implementação em *Software*) implementado no HAL.

O protocolo de comunicação entre o controlador da Bomba de Calor e o *Gateway* é apresentado na Tabela 8. Esta estrutura de dados é transferida de cada vez que a Bomba de Calor faz um pedido de dados através do barramento I^2C , partilhando assim, os valores referenciais de funcionamento do sistema. De forma a dar alguma robustez ao sistema de comunicação, foi adicionado um mecanismo de CRC-32, com polinómio $x^{29} + x^{23} + x^{16} + x^{14} + x^7 + x^3$, permitindo assim verificar e garantir a consistência dos dados na receção.

Tabela 8: Protocolo bidirecional entre Bomba de Calor e o *Gateway*.

Campo	Tamanho (bytes)
Temperatura Interior	1
Temperatura exterior	1
Modo de funcionamento da bomba	1
Modo de programação	1
Temperatura de conforto Inverno	1
Temperatura de conforto Verão	1
Temperatura das águas sanitárias	1
Temperatura referencial de cada zona	5
Humidade referencial de cada zona	5
Estado dos ventiloconvectores de cada zona	5
CRC-32	4

4.2.2.3 Zone Climate Control

O ZCC tem o papel de *End Device* na rede SimpliciTI e possui como funções principais a amostragem periódica da temperatura e humidade enviando de seguida as amostras para o *Gateway*, a receção dos valores referenciais de atuação provenientes do *Gateway* e por último a comutação dos relés de forma a ligar/desligar os ventiloconvectores. A Figura 54 apresenta a *stack* de *Software* completa deste dispositivo.

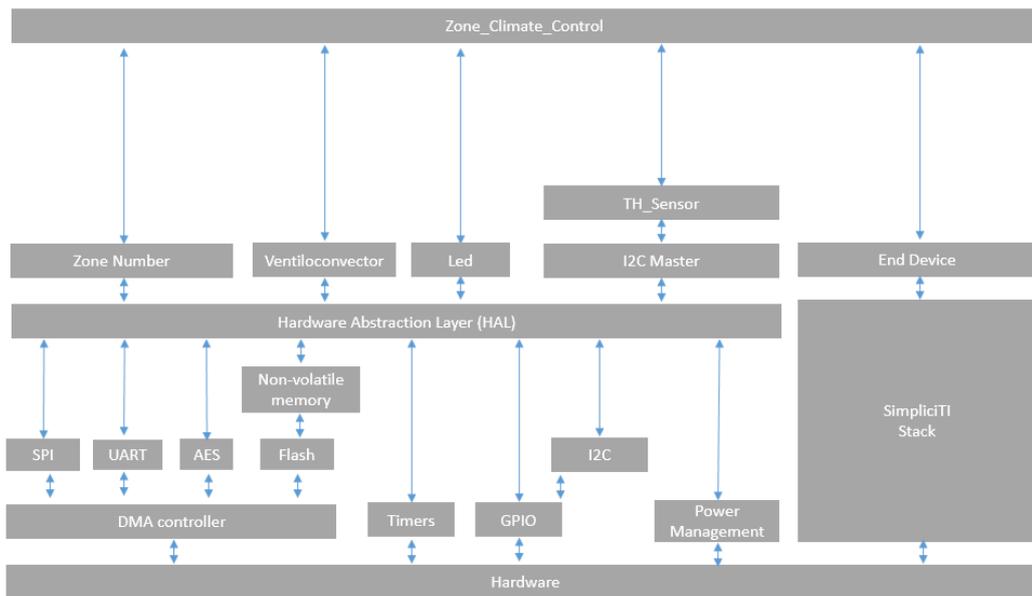


Figura 54: Stack completa do Zone Climate Control.

O comportamento do ZCC apresenta-se no fluxograma da Figura 55. Depois da inicialização, o dispositivo tenta procurar e estabelecer ligação a uma rede SimplicTI. Caso o estabelecimento de ligação não seja bem sucedido por algum motivo, o dispositivo atua sobre o meio com os dados referenciais que possui, caso estes não sejam nulos (condição inicial).

Se for possível estabelecer uma ligação, o dispositivo faz a amostragem da temperatura e humidade atual e de seguida envia-os para o *Gateway*. Este ao receber a amostra e responde ao dispositivo com os valores referenciais que deve utilizar, conseguindo assim com este mecanismo com que o *Gateway* não necessite de fazer desmultiplexação de pacotes das diferentes zonas ao nível da aplicação, baixando assim o nível de complexidade do sistema.

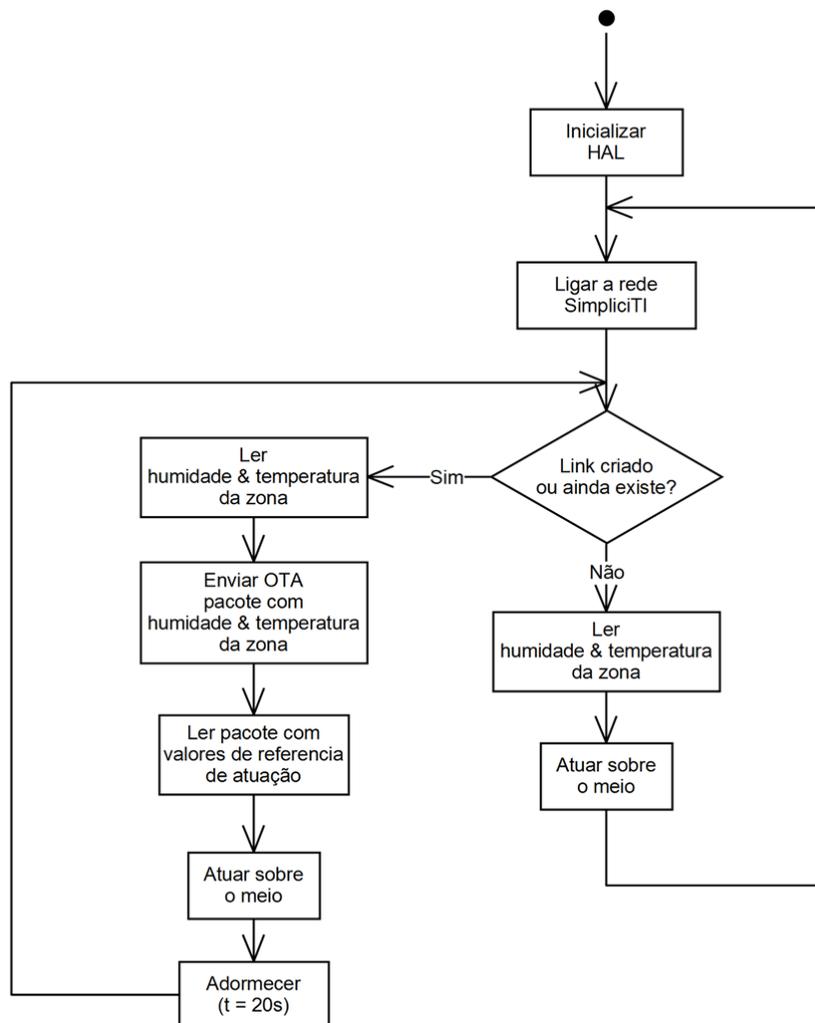


Figura 55: Comportamento do Zone Climate Control.

Fluxo de comunicação:

O ZCC é responsável pela criação e divulgação do *link* lógico, caso contrário o *Gateway* despenderia de muitos recursos a fazer esta tarefa. Depois de o *link* estar criado, o ZCC inicia a amostragem da temperatura e da humidade seguindo-se o envio destes valores para o *Gateway*. Sucessivamente, o *Gateway* recebe a trama, mantendo o *link* de comunicações aberto, armazena a amostra mais recente e envia a temperatura referencial de atuação para o ZCC, servindo esta como uma confirmação da receção da amostra. Se o ZCC não receber uma trama em menos de 40 segundos, ele faz uma nova tentativa de se ligar novamente à rede WPAN.

Este processo é repetido periodicamente de 20 em 20 segundos, sendo esta a taxa de amostragem assumida por defeito no sistema.

A Figura 56 apresenta o fluxo de comunicação entre o *Gateway* e os vários ZCC sobre a forma de diagrama de sequência.

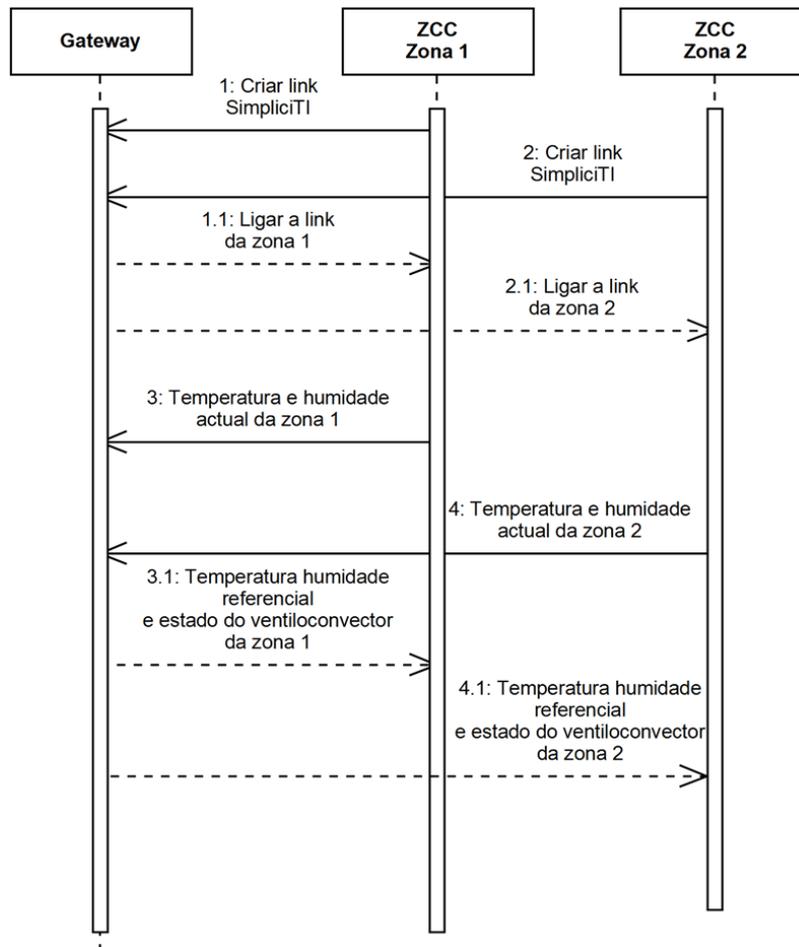


Figura 56: Fluxo de comunicação na WPAN.

5. Avaliação do sistema

Neste capítulo serão apresentados alguns testes efetuados ao sistema “*Eco-Smart Heat Pump*”. Foram desenvolvidos dois testes distintos, o primeiro foram algumas medições da potência do sinal da WPAN e por fim uma pequena demonstração do sistema de forma a apresentar todos as entidades do sistema a interagirem entre si.

5.1 Medições da potência do sinal da WPAN

De forma a avaliar a comunicação entre o *Gateway* e os diversos ZCC foram efetuados testes de alcance em diversos locais de forma a medir a potência do sinal da WPAN. As medições da potência do sinal que flui na rede WPAN foram obtidas recorrendo ao *RSSI (Received Signal Strength Indication)*, acedido diretamente nos registos do SoC.

Os testes consistem na medição da potência do sinal no recetor, variando a distância entre os dois DUT (*Device Under Test*) entre 1 a 10 metros, preservando sempre o LoS (*Line of Sight*). A WPAN irá utilizar o canal lógico 24 (2,470 Ghz) e a potência de envio do nó emissor foi configurada para +4dbm.

Estes testes foram testado em três cenários: local aberto, local fechado residencial e, por fim, em um ambiente industrial com diversas máquinas em funcionamento esperando-se, desta forma, ruído no espectro eletromagnético.

O resultado das medições efetuadas encontram-se na Figura 57, Figura 58 e na Figura 59, respetivamente pela ordem descrita dos cenários anteriormente.

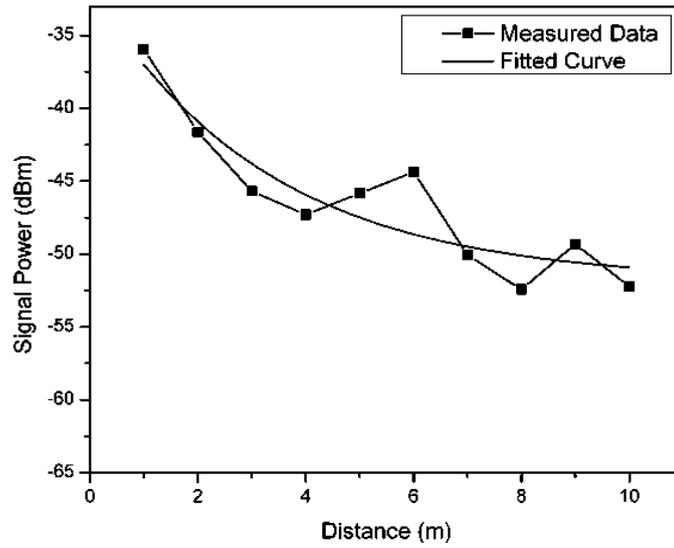


Figura 57: *RSSI* medido num local aberto com linha de vista.

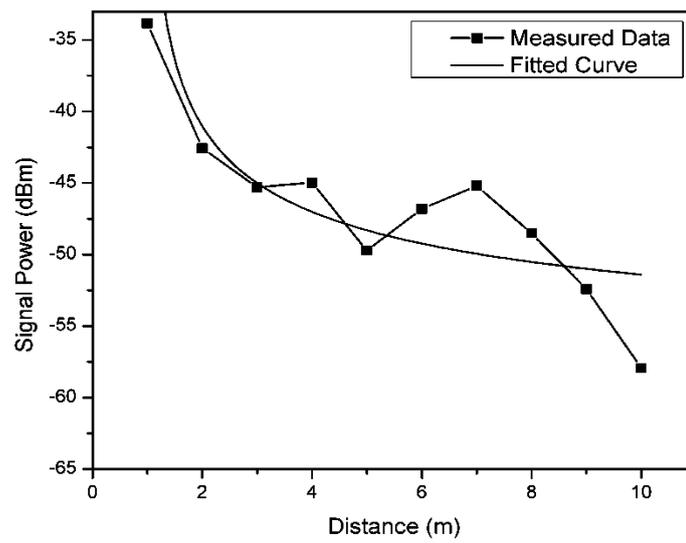


Figura 58: *RSSI* medido num local fechado com linha de vista.

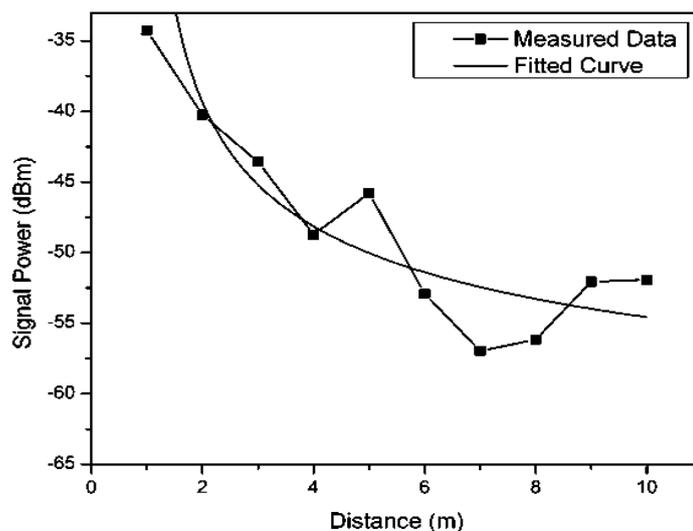


Figura 59: RSSI medido num ambiente ruidoso (máquinas industriais) com linha de vista.

Como podemos observar nos resultados anteriores, o primeiro teste tem o melhor desempenho, derivado ao facto de o sistema se encontrar em um ambiente aberto, evitando fenómenos de reflexão que podem deteriorar a qualidade do sinal. Comparativamente, o último teste apresenta um pior comportamento devido ao facto de existirem muitas máquinas a gerar ruído eletromagnético na banda do sistema (2.4GHz), revelando-se assim, um significativo detrimento do sinal.

5.2 Demonstração do sistema

Esta demonstração foi realizada em ambiente laboratorial pois não se puderam fazer registos fotográficos dos testes efetuados na empresa com todo o sistema integrado. No entanto, com esta demonstração pretende-se também, isolar o trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação, de forma a dar mais ênfase aos sistemas desenvolvidos.

Os componentes do sistema que vão ser submetidos a testes nesta demonstração serão o *Gateway*, os ZCC e a aplicação móvel Pinto Brasil, no entanto, a placa controladora da Bomba de Calor encontra-se em funcionamento, trocando

informação com o *Gateway* de forma a provar que a comunicação funciona corretamente.

A Figura 60 apresenta a ligação entre a placa controladora da Bomba de Calor e o *Gateway* através da ligação com o protocolo I^2C .

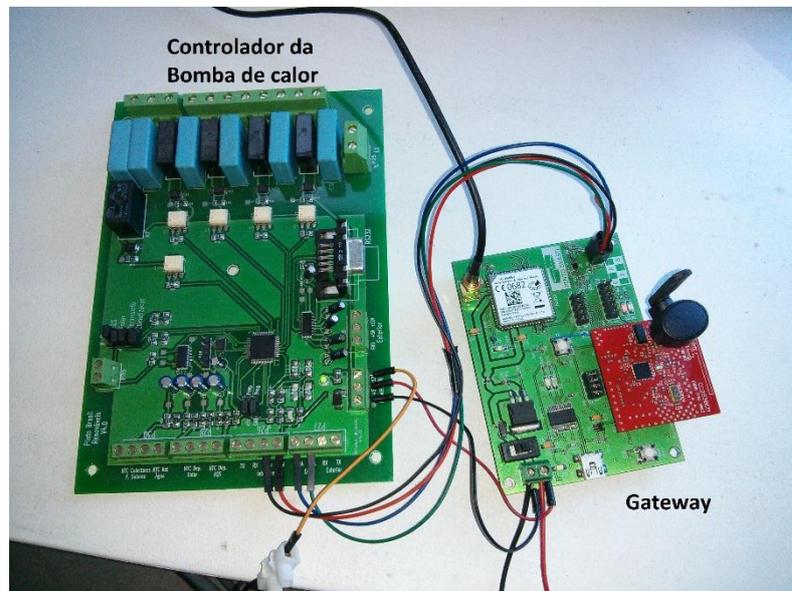


Figura 60: Ligação entre a placa controladora da Bomba de Calor e o *Gateway*.

Tanto o *Gateway* como a placa controladora da Bomba de Calor são ligados à mesma fonte de alimentação. Depois de ligado, o *Gateway* cria a rede WPAN e o canal de comunicações GSM entre o *Gateway* e a aplicação móvel fica disponível.

Como no laboratório não existem recursos para realizar um teste efetivo ao sistema dado que o protótipo da Bomba de Calor e ventiloconvectores estão localizados na empresa, foi então utilizada uma lâmpada (com consumo estimado de 300W) de forma a simular o consumo elétrico entre um ZCC e o ventiloconvector, como apresentado na Figura 61.



Figura 61: *Zone Climate Control* a simular a ligação ao ventiloconvector com lâmpada de alto consumo.

A interação com o sistema é efetuado através da utilização da aplicação móvel *Pinto Brasil*, sendo que esta permite interagir com cada componente individual do sistema. Esta aplicação foi desenvolvida pelo Investigador Paulo Gonçalves do Grupo de Sistemas Embebidos da Universidade do Minho.

Para efetuar uma leitura do estado das bombas de calor é necessário pressionar o botão “Ler” na janela principal. Ao pressionar este botão é enviada um SMS para o *Gateway* a solicitar uma nova leitura do estado da Bomba de Calor, como se pode ver na Figura 62.



Figura 62: Aplicação Pinto Brasil, Leitura do sistema.

A aplicação permite ao utilizador configurar alguns campos especiais, como o idioma, o aparecimento de *pop-ups* de notificação de receção/envio de mensagem e o número da Bomba de Calor. A Figura 63 apresenta a forma sobre a qual se efetua o acesso e a navegação no menu de preferências.

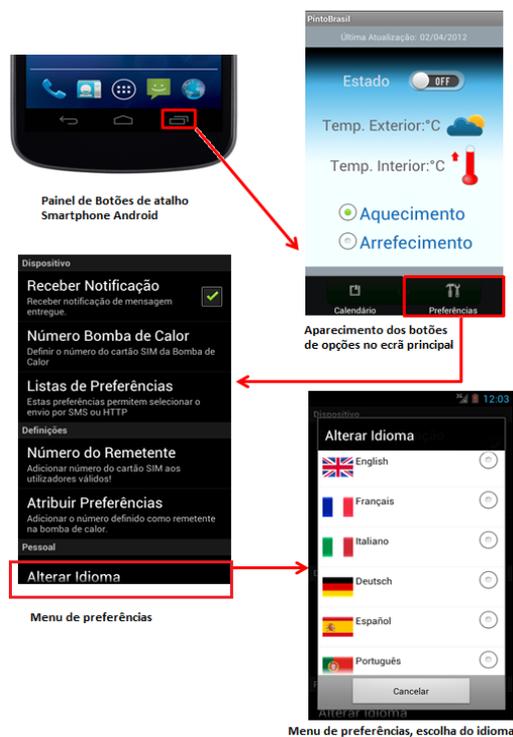


Figura 63: Aplicação Pinto Brasil, Menu de preferências.

A configuração da Bomba de Calor é efetuada acedendo ao calendário da aplicação, apresentado na Figura 64. A primeira janela a aparecer é o Menu de Dados Gerais onde o utilizador pode definir quais os modos que pretende ativar/desativar na Bomba de Calor.



Figura 64: Aplicação Pinto Brasil, Calendário.

Na aba superior desta janela existe o acesso para o Menu de consulta e definição climática das zonas, representada na Figura 65. Nesta, o utilizador visualiza as temperaturas e humidades atuais registadas nas cinco zonas, bem como o estado atual dos ventiloconvectores. É também possível introduzir as temperaturas que deseja definir para as várias zonas de atuação, que no caso da imagem, irá ligar o ventiloconvector da zona 3, dado que a bomba se encontra no modo de aquecimento com uma temperatura atual de 23 graus e foi configurada para atingir a temperatura referencial de 30 graus.



Figura 65: Aplicação Pinto Brasil, estado das zonas.

A terceira aba, apresentada na Figura 70, é um calendário que permite ao utilizador enviar para o *Gateway* os dados definidos nos dois ecrãs anteriores.

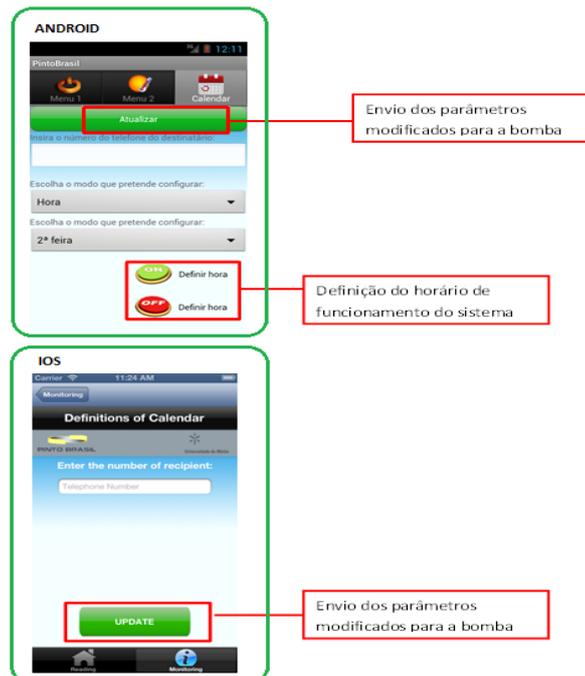


Figura 66: Aplicação Pinto Brasil, *update* das configurações do sistema.

A Figura 67 apresenta o resultado de um ZCC da zona 3 ativo em modo de aquecimento com uma temperatura *target* de 30 graus, previamente configurado pela aplicação.

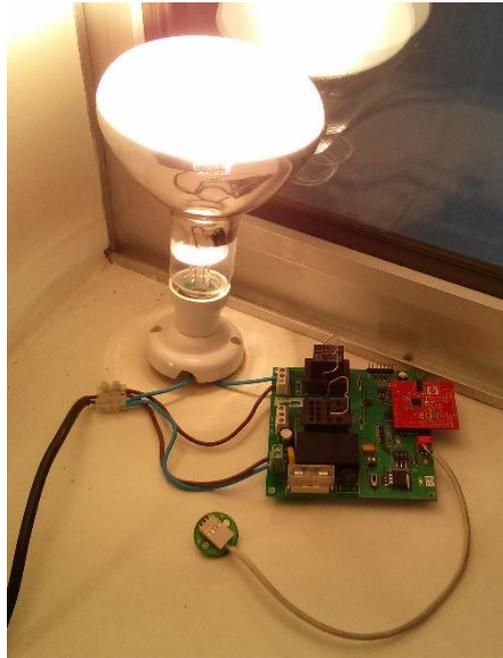


Figura 67: Resultado de um *Zone Climate Control* ativo.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

Esta dissertação focou-se principalmente no desenvolvimento e conceção de um sistema de controlo sem fios para ser integrado num sistema de climatização baseado em Bomba de Calor, de nome “*Eco-Smart Heat Pump*”. Esta plataforma foi sujeita a algumas demonstrações com a empresa responsável, Pinto Brasil Fábrica de Máquinas Industriais S.A. e foi instalada uma versão experimental que se encontra, atualmente, a funcionar na empresa. Esta solução teve como principal inovação a utilização do composto de duas tecnologias sem fios diferentes, WPAN e rede celular GSM, que permitiu criar uma solução bastante flexível tanto a nível de acessibilidade e interação, mas também, de instalação dos equipamentos desenvolvidos.

Em termos técnicos, a escolha da Simpliciti no desenvolvimento da WPAN acabou por dificultar e atrasar um pouco o desenvolvimento do sistema, dado que este não dá praticamente nenhum suporte aos periféricos do *Hardware*, e como tal, foi dedicado algum tempo na conceção e desenvolvimento de uma *Hardware Abstraction Layer* (HAL). No entanto, o desenvolvimento do HAL foi um sucesso e será possivelmente uma futura contribuição como código *Open Source*.

Apesar do sucesso do desenvolvimento deste sistema, alguns aspetos poderiam ser melhorados de forma a aumentar a qualidade do mesmo. Como trabalho futuro podem enumerar-se os seguintes pontos:

- Alterar o canal de comunicações entre o sistema de climatização e a aplicação móvel, do serviço de SMS para um canal de dados GPRS de forma a aumentar a performance, facilitar a introdução de novas funcionalidades e aumentar a operabilidade do sistema através da sua ligação direta à Internet;
- Alterar a forma sobre a qual o processamento é feito no *Gateway*, dado que este gere vários componentes (WPAN, módulo GSM e controlador da

Bomba de Calor) em simultâneo. Esta alteração passaria por utilizar um sistema operativo que gerisse eficientemente os recursos do sistema;

- Possibilidade de utilização dos dados adquiridos por esta plataforma noutra tipo de aplicações, como por exemplo em deteção e prevenção de incêndios (na leitura da temperatura e humidade);

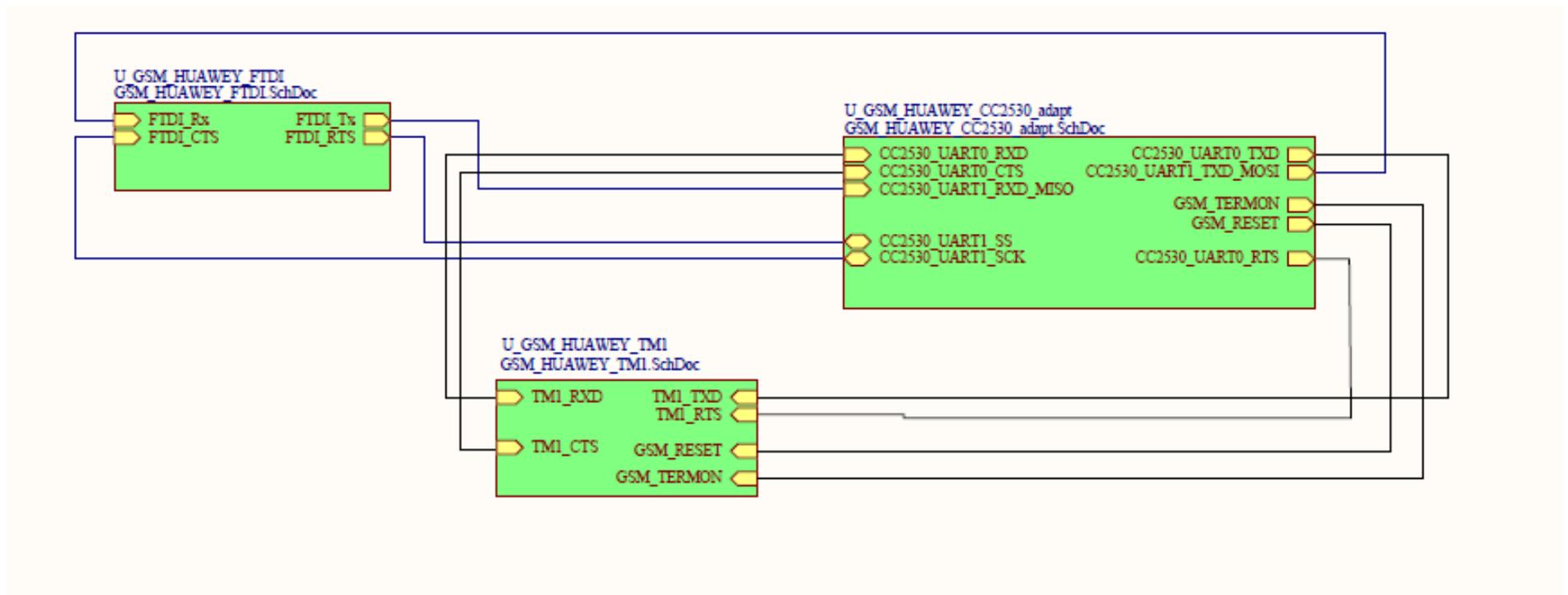
Referências

- [1] "What Is Domotics?," 12 07 2012. [Online]. Available: [Wisegeek.com](http://www.wisegeek.com). [Acedido em 12 07 2012].
- [2] Tibucon, "Self Powered Wireless Sensor Network for HVAC System Energy Improvement," [Online]. Available: <http://www.tibucon.eu/>. [Acedido em 1 10 2013].
- [3] W. Seah, "University of Wellington," 18 12 2012. [Online]. Available: <http://ecs.victoria.ac.nz/Groups/NERG/OpenResearchProjects>. [Acedido em 1 10 2013].
- [4] Capetti Elettronica, "<http://www.capetti.it/>," Itália, 2013.
- [5] HoneyWell, "HONEYWELL GLOBAL WEBSITE," [Online]. Available: <http://honeywell.com/>. [Acedido em 24 10 2013].
- [6] J. W. H. Y. Jianhua Shi, "A Survey of Cyber-Physical Systems," em *Nanjing, China*, 2011.
- [7] N. Wu e X. Li, RFID Applications in Cyber-Physical System, Nanjing University, China: CC BY-NC-SA 3.0 license, 2011.
- [8] T. Nadeem, "Pervasive and Mobile Computing, From wireless sensor networks towards Cyber Physical systems," [Online]. Available: <http://www.cs.odu.edu/~nadeem/>.
- [9] I. ,. W. S. Y. S. E. C. Akyildiz, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2001.

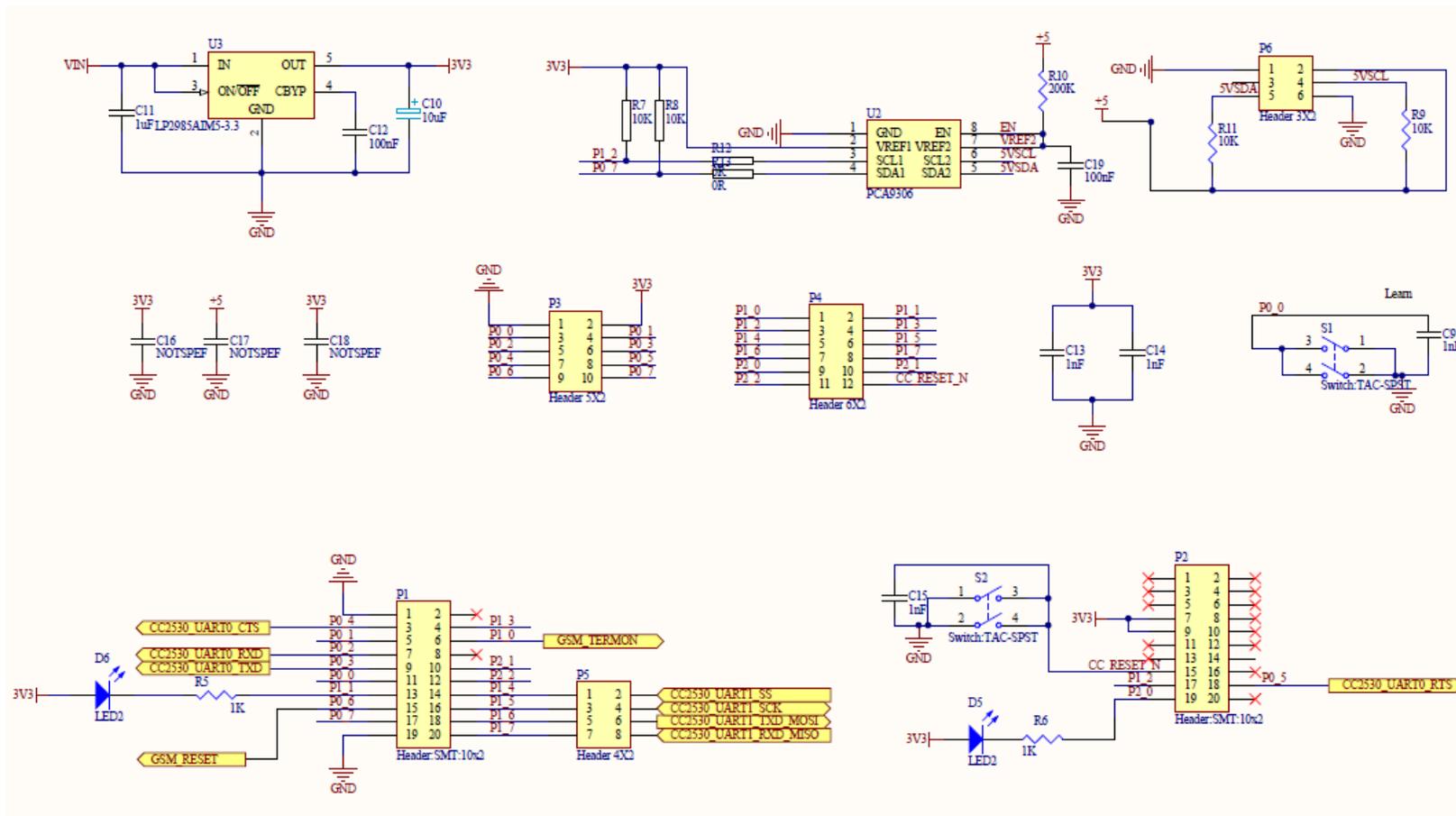
- [10] Sena, "Zigbee_faq," 2011. [Online]. Available: www.sena.com.
- [11] N. Semiconductor, "nRF24LE1," [Online]. Available: <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24LE1>.
- [12] J. A. Gutierrez, "IEEE Std. 802.15.4 - Enabling Pervasive Wireless Sensor Networks," Berkeley University, 2005.
- [13] D. Comer, Computer Networks and Internets, Upper Saddle River: Pearson Education, 2009.
- [14] IEEE, "IEE Standard for 802 Part 15.4," em *Wireless Medium Access Control Layer(MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless personal Area Networks(LR-WPANS)*, IEEE std 802.15.4 - 2006.
- [15] R. M. Siegmund , W. K. Matthias e O. W. Malcolm, An Introduction to GSM, Artech House, 1995.
- [16] J. Schiller, Mobile Communications, Great Britain: Pearson Education Limited 2003, 2000.
- [17] luxmagna, "Lux Magna - O seu portal de tecnologia e bem estar," [Online]. Available: http://www.luxmagna.pt/pdfs/LM_ventiloconvectores.pdf. [Acedido em 10 07 2013].
- [18] Intel, MCS 51 Microcontroller Family User's Manual, Intel Corporation, 1994.
- [19] Texas Instruments, "CC2530 User Guide," 2012. [Online]. Available: http://www.keil.com/dd/docs/datashts/chipcon/cc253x_2540x_um.pdf. [Acedido em 1 06 2013].
- [20] Texas Instruments, "SmartRF05 Evaluation Board User's Guide," Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, 2010.

- [21] Huawei, "Huawei Device," [Online]. Available: http://www.huaweidevice.com/resource/mini/200902136789/Module2009/product_mg323.html. [Acedido em 08 04 2013].
- [22] IAR Systems, "IAR Embedded Workbench for 8051," [Online]. Available: <http://www.iar.com/ew8051/>. [Acedido em 1 10 2013].
- [23] University of Washington, "SimpliciTI Intro," [Online]. Available: <http://courses.cs.washington.edu/courses/cse466/11au/calendar/09b-SimpliciTI-INTRO-posted.pdf>. [Acedido em 1 8 2013].
- [24] J. Teich, "Hardware/Software Codesign: The Past, the Present, and Predicting the Future," 2013.
- [25] RPI, "Rensselaer Polytechnic Institute," [Online]. Available: <http://www.rpi.edu/dept/ecse/mps/SPI.pdf>. [Acedido em 2013].
- [26] B. Paradigm, "Introduction to I²C and SPI protocols," 2010. [Online]. Available: <http://www.byteparadigm.com/applications/introduction-to-i2c-and-spi-protocols/>. [Acedido em 2013].
- [27] L. A. P. Mathias, "gta," [Online]. Available: http://www.gta.ufrj.br/grad/05_2/aes/. [Acedido em 10 07 2013].
- [28] RedLink, "HoneyWell Redlink," [Online]. Available: <http://www.forwardthinking.honeywell.com/redlink>. [Acedido em 2013 6 7].

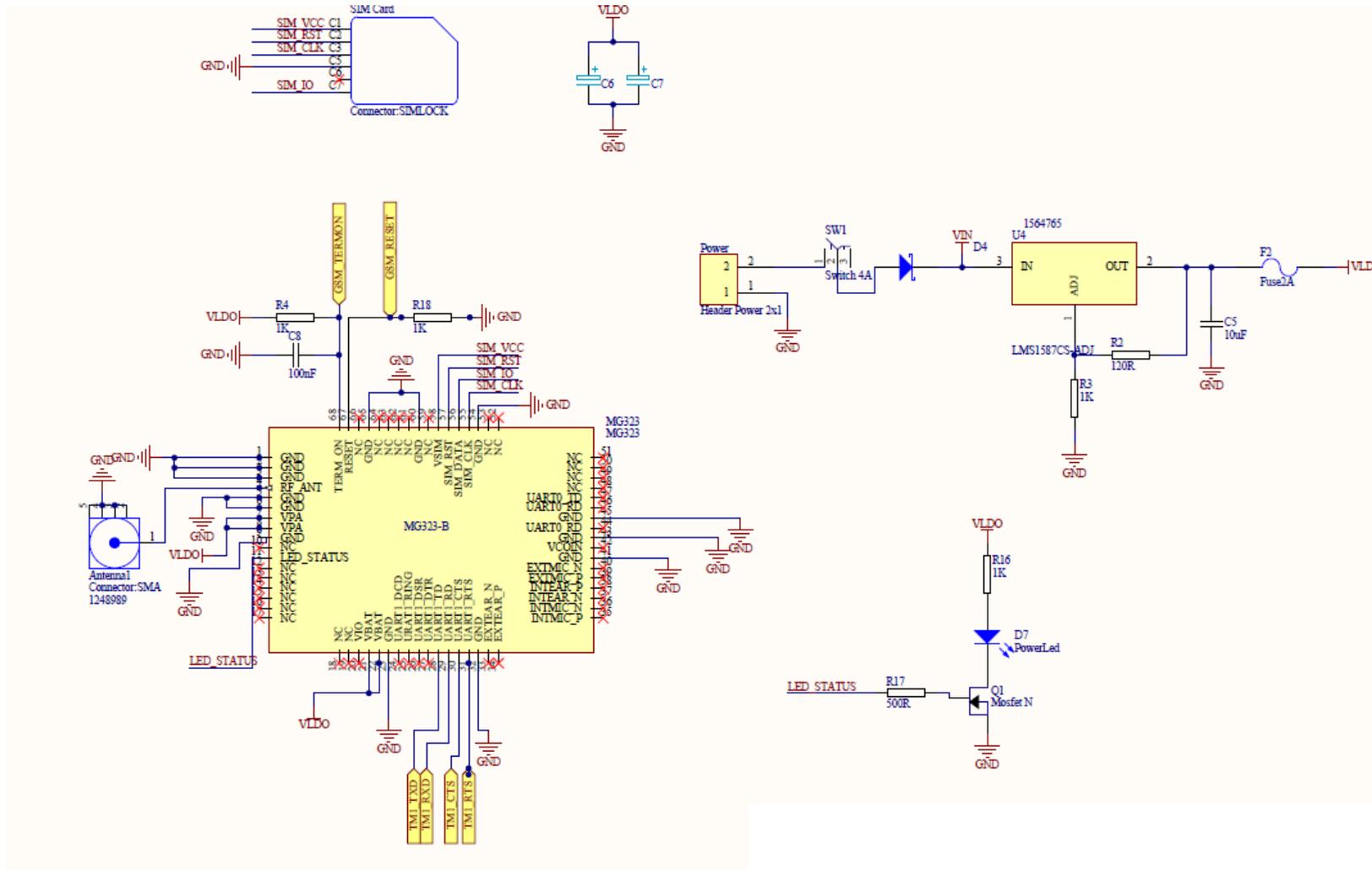
Apêndices



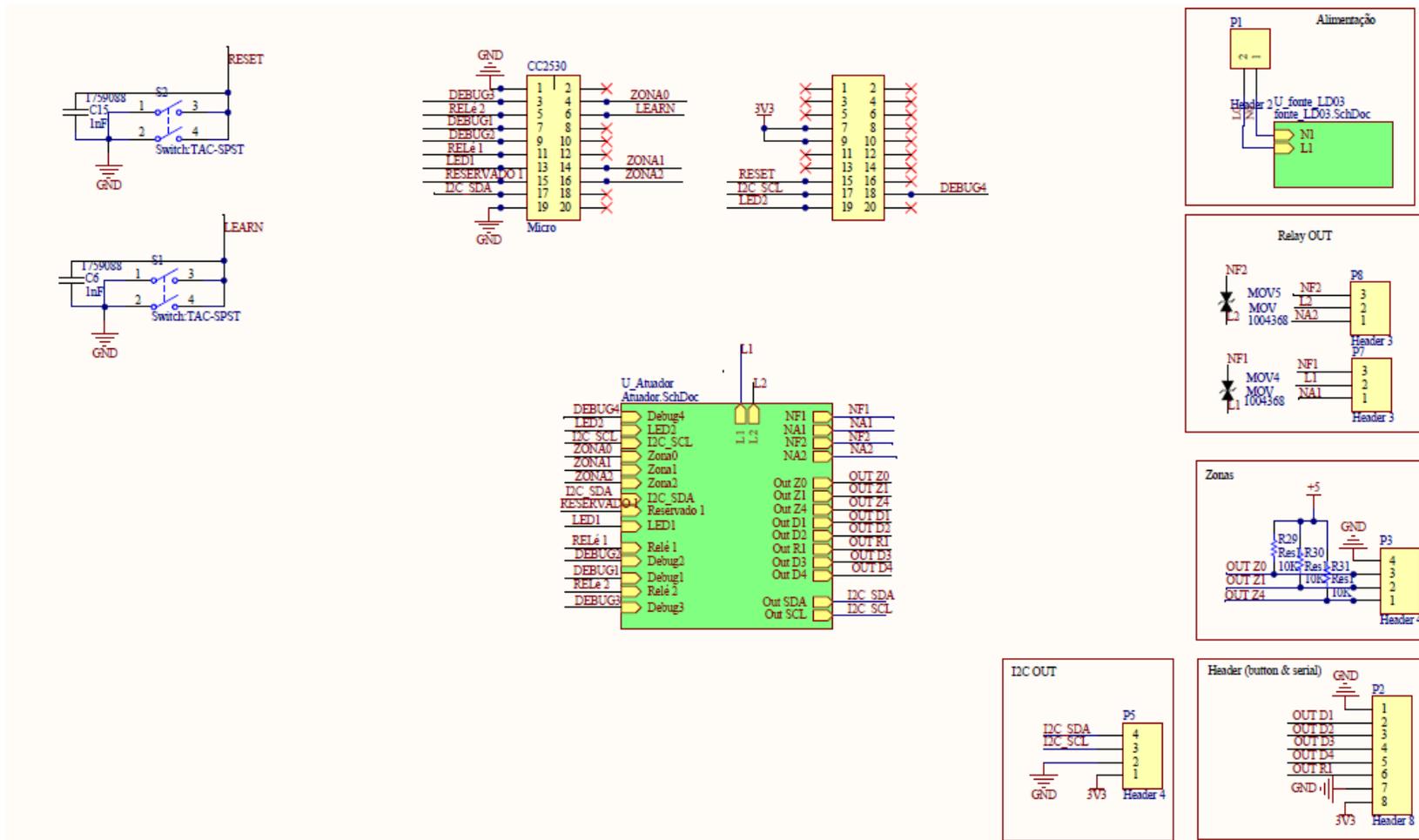
Apêndice 1: Esquemático do top Layer do Gateway



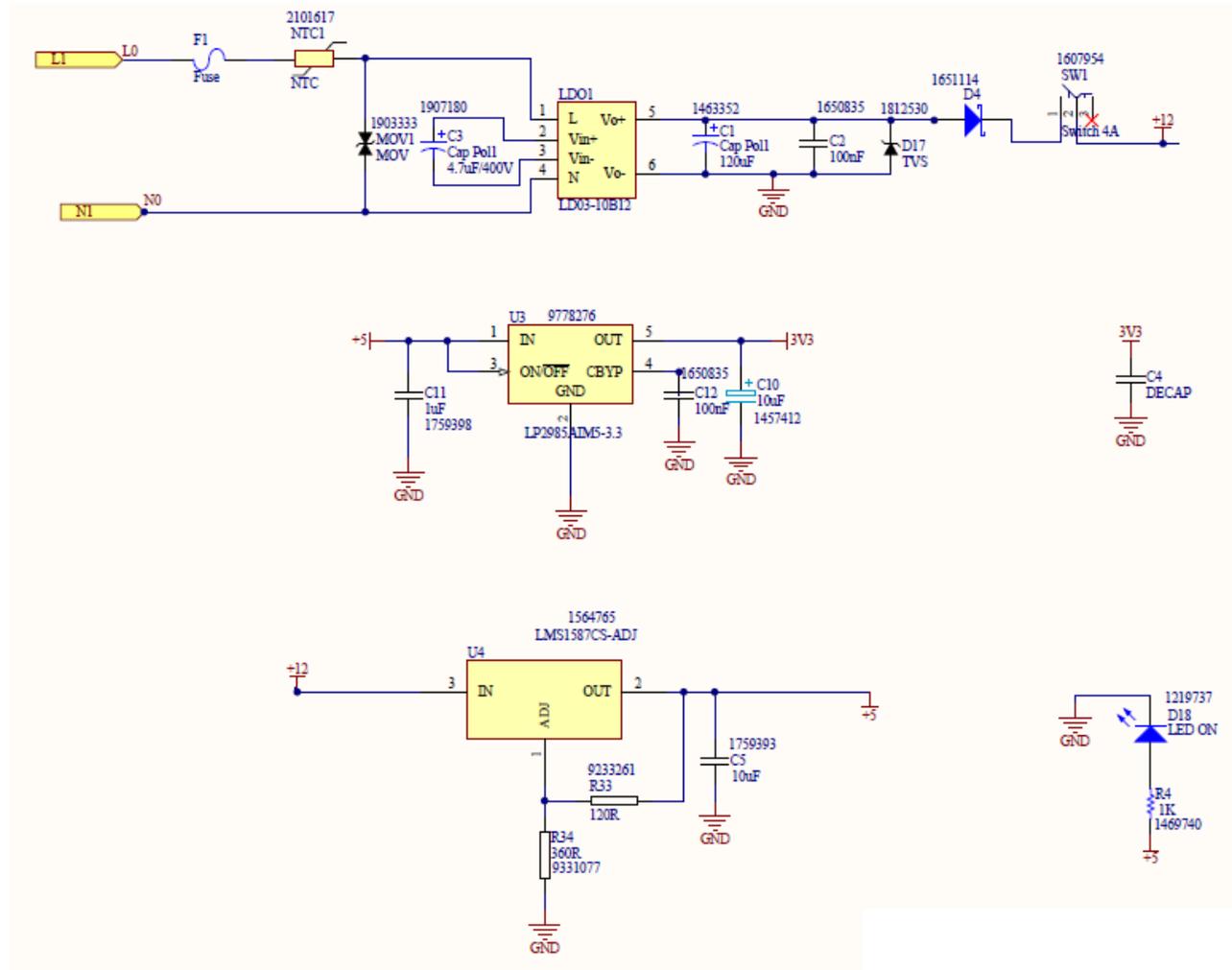
Apêndice 2: Esquemático do Gateway (1)



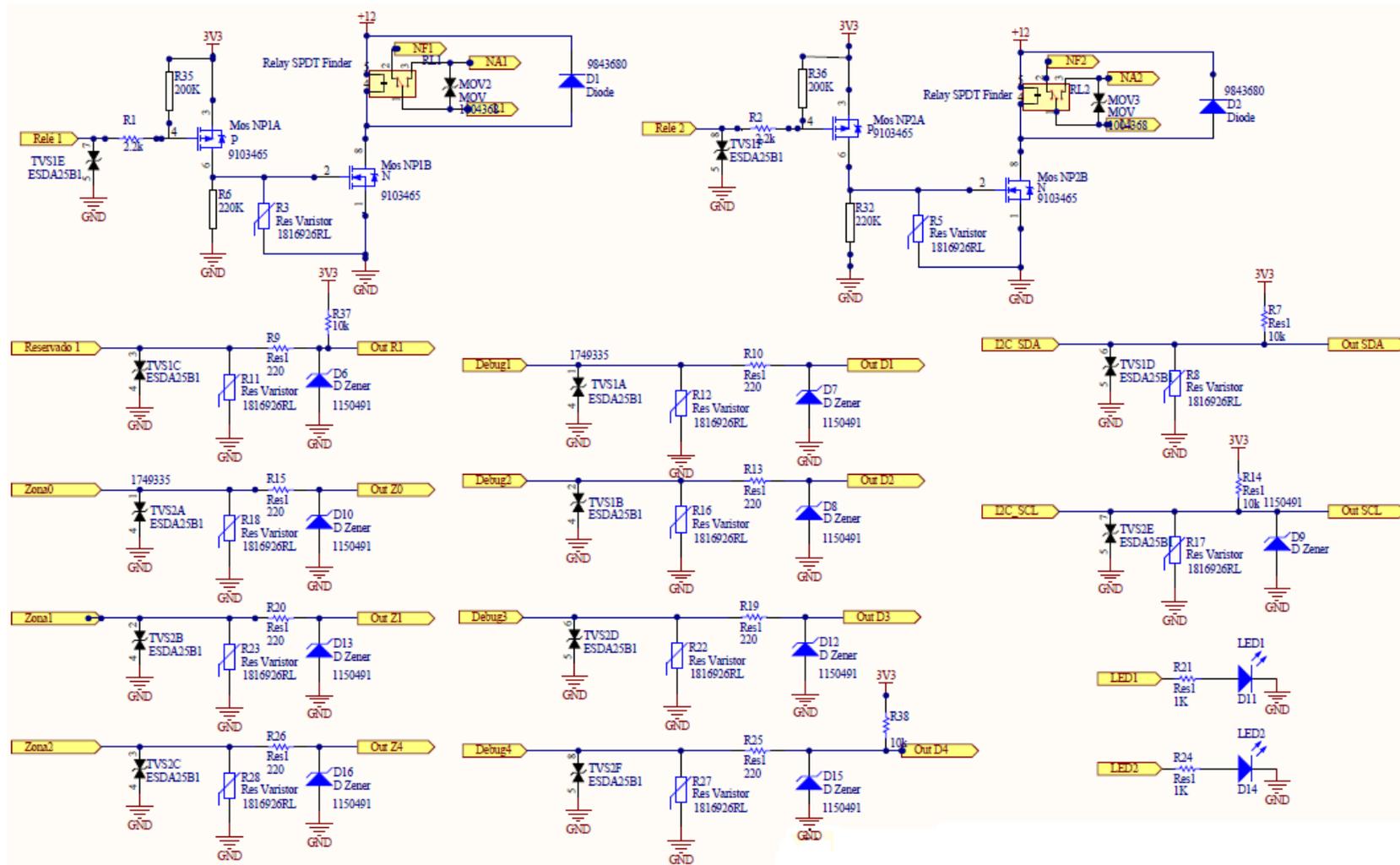
Apêndice 3: Esquemático do Gateway (2)



Apêndice 5: Top layer do Zone Climate Control



Apêndice 6: Esquemático Zone Climate Control (1)



Apêndice 7: Esquemático Zone Climate Control (2)