

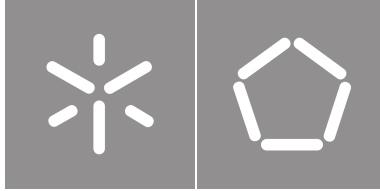


Universidade do Minho

Escola de Engenharia

André Filipe Fernandes da Silva Andrade Leite

**Sistema Ciber-Físico para Monitorização de
Resíduos Sólidos Urbanos**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

André Filipe Fernandes da Silva Andrade Leite

**Sistema Ciber-Físico para Monitorização de
Resíduos Sólidos Urbanos**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e
Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do:

**Professor Doutor Jorge Miguel Nunes dos Santos
Cabral**

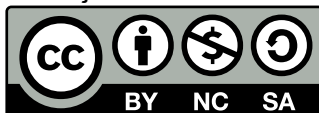
DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositoriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgal 4.0 Internacional

CC BY-NC-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.pt>

Agradecimentos

Agradeço à minha avó Lurdes e ao meu avô Dirceu por estarem sempre ao meu lado e pela forte presença que sempre tiveram na minha vida, não poderia ter mais sorte.

À minha mãe e aos meus irmãos Ricardo e Luís pelos inúmeros sacrifícios ao longo destes anos, pelas viagens para Guimarães que sempre ajudavam a iniciar mais uma semana de trabalho e por me terem sempre ajudado.

Agradeço também ao professor Cabral, ao Novais e ao Rui Mesquita pelos conhecimentos que me transmitiram e que me permitiram desenvolver um espírito mais crítico.

Ao Duarte, fica um agradecimento especial pelos pequenos grandes contributos que me deu.

Ao meu grupo de amigos da Universidade, Phelps, Tozé, Bulbasaur, Cajó, Cláudio e Mota pelos inúmeros momentos de diversão e descontração, em especial ao Tiago, Jeffren e João Bot por serem determinantes para a conclusão deste ciclo. À Mariana, fica um agradecimento por todo o apoio que me ofereceu.

Agradeço ainda a todos os docentes do curso de Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores pelo conhecimento transmitido, pelas *soft skills* e boas práticas que nos inculcem.

Aos meus colegas de trabalho Matos, Hugo, Isaque e Vasco fica um agradecimento pela ajuda e compreensão.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Sistema Ciber-Físico para Monitorização de Resíduos Sólidos Urbanos

O aumento da população e do consumo inerente, gera vários problemas ambientais e de saúde pública. Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é atualmente uma das maiores preocupações, tendo impacto na qualidade do solo, das águas e ar, para além de aumentar o risco da saúde pública, devido ao aumento da presença de seres transportadores de doenças, tais como insetos e animais. A recolha dos RSU acaba, assim, por ter um papel bastante importante na saúde pública. Através da mesma não só se assegura que os excedentes não se acumulam e prejudicam a saúde pública, como garantem que são reciclados quando possível.

Atualmente, existem três métodos de recolha de RSU: porta a porta, predefinida e seletiva. Os dois primeiros métodos apresentados são ineficientes uma vez que as rotas não são ajustadas e otimizadas em tempo real, devido à indisponibilidade de informação que permita a introdução de sistemas de decisão.

Desta forma, esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema ciber-físico (CPS) que monitorize o estado dos contentores, tais como nível de enchimento, de forma a reduzir gastos do processo e poluição gerada. Para além disso, pretende-se que o sistema seja escalável, modular e genérico, i.e. de fácil expansão, montagem e adaptado aos modelos de contentores atualmente utilizados, respetivamente. O sistema aqui apresentado, é inspirado no sistema Weco desenvolvido para a SOMA, mas redesenhado de forma a garantir os objetivos supramencionados através de dispositivos sensores energeticamente mais eficientes, bem como dos nós coordenadores que criam e suportam a rede CPS.

Os desenvolvimentos conseguiram reduzir o consumo do nó sensor em 81%. O nó coordenador foi redesenhado dotando-o de um sistema de *energy harvesting*, permitindo o seu funcionamento autónomo, este é ainda capaz de criar e suportar uma rede CPS, garantindo a comunicação com a camada superior.

Palavras Chave: Comunicações *Wireless*, Dispositivos Energeticamente Eficientes, Sistemas CPS

Abstract

Cyber Physical System for Monitoring Municipal Solid Waste

The increase in population, alongside with the current consumer society, generates several environmental and public health problems. The municipal solid waste is currently one of the biggest concerns, having an impact in the quality of the soil, water and air, in addition to increasing the risk to public health, due to the increase the presence of disease-carrying beings, such as insects and animals. The collection of municipal solid waste thus ends up having a very important role in public health. Through it, it is not only ensured that surpluses do not accumulate and harm public health, as they ensure that they are recycled when possible.

There are three methods for waste pickup: the door-to-door, the predefined and the selective. Both first methods presented are inefficient since routes are not adjusted and optimized in real time, due to the unavailability of information that allows the introduction of decision systems.

Thus, this dissertation has as its main objective the development of a cyberphysical system (CPS) that monitors the status of containers, such as filling level, in order to reduce process expenses and generated pollution. In addition, the system is intended to be scalable, modular and generic, i.e. easy to expand, assemble and adapted to current container models used, respectively. The system presented here is inspired by the Weco system developed for SOMA, but redesigned to ensure the above-mentioned objectives through devices more energy-efficient sensors, as well as the coordinating nodes that create and support the CPS network.

The developments managed to reduce the consumption of the sensor node by 81%. The coordinator node was redesigned endowing it with an energy harvesting system, allowing its autonomous operation, it is also capable of creating and supporting a CPS network, ensuring communication with the Internet.

Keywords: Comunicações *Wireless*, Dispositivos Energeticamente Eficientes, Sistemas CPS

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Enquadramento	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado da Arte e Fundamentos Teóricos	4
2.1 Estado da Arte	4
2.1.1 WiseWaste	4
2.1.2 Weco	5
2.1.3 Syren II-L	5
2.1.4 Bee2Waste	6
2.1.5 Comparação dos Sistemas	7
2.2 Fundamentos Teóricos	7
2.2.1 Rede de Sensores Sem Fios	7
2.2.2 Sistemas Ciber-Físicos	8
2.2.3 Serviços <i>Cloud</i>	8
2.2.4 Micro Serviços <i>Web</i>	9

2.2.5	Topologia de Rede	10
2.2.6	Tecnologia EnOcean	12
2.2.7	Energy Harvesting	25
2.2.8	Armazenamento de energia	26
2.2.9	Message Queuing Telemetry Transport	28
2.2.10	Ficheiro JSON	29
2.2.11	Grau de Ingress Protection	29
3	Especificação do Sistema	31
3.1	Requisitos do Sistema	31
3.2	Restrições	31
3.3	Arquitetura do Sistema	32
3.4	Especificação do Nó Sensor	33
3.4.1	Especificação do Hardware	33
3.4.2	Especificação do Software	34
3.5	Especificação do Nó Coordenador	35
3.5.1	Especificação do <i>Hardware</i>	35
3.5.2	Especificação do <i>Software</i>	36
3.6	Especificação do Micro Serviço <i>Web</i>	38
3.6.1	Tópicos MQTT	38
4	Desenvolvimento do Sistema	40
4.1	Desenvolvimento do Nó Sensor	40
4.1.1	Sensor	40
4.1.2	Módulo de Comunicação e de Processamento	43
4.1.3	Entradas e Saídas do Microcontrolador	45
4.1.4	Sistema de Alimentação	47
4.1.5	Invólucro do nó sensor	49
4.1.6	Nó Sensor	49
4.1.7	Telegrama Transmitido	50
4.1.8	<i>System Stack</i>	51
4.1.9	Software	52

4.2	Desenvolvimento do Nó Coordenador	56
4.2.1	Gateway Enocean	56
4.2.2	SIM800L	57
4.2.3	Microcontrolador	57
4.2.4	Circuito de <i>Energy Harvesting</i>	58
4.2.5	Bateria	62
4.2.6	Carregador de bateria	63
4.2.7	Circuitos de regulação	64
4.2.8	Invólucro do nó coordenador	67
4.2.9	Nó Coordenador	67
4.2.10	Trama de comunicação	68
4.2.11	<i>System Stack</i>	70
4.2.12	Software	71
5	Resultados	76
5.1	Validação da rede EnOcean	76
5.2	Medição do consumo energético do Nó Sensor	82
5.2.1	Autonomia teórica do nó sensor	85
5.3	Validação da comunicação com a camada superior	86
5.4	Medição do tráfego de dados do Nó Coordenador	89
5.5	Medição do consumo energético do Nó Coordenador	90
5.5.1	Autonomia teórica do nó coordenador	92
5.6	Validação do MPPC do circuito de <i>energy harvesting</i>	93
6	Conclusões e Trabalho Futuro	96
6.1	Conclusões	96
6.2	Trabalho Futuro	97
	Bibliografia	99
	Anexos	
I	Esquemáticos da PCB do Nó Sensor	104

II Esquemáticos da PCB do Nó Coordenador

110

Índice de Figuras

Figura 1	Ilha ecológica com 5 contentores (resíduos, orgânicos, papel, plástico/metálico e vidro).	2
Figura 2	Nó sensor do sistema Weco [3].	5
Figura 3	Nó sensor do sistema Syren da BH Technologies [7].	6
Figura 4	Dispositivo de medição Bee2Waste da Future Compta [9].	6
Figura 5	Aplicações que utilizam serviços cloud.	9
Figura 6	Comparação de uma arquitetura monolítica com uma arquitetura de micro serviços [14].	10
Figura 7	Rede de topologia estrela.	10
Figura 8	Rede de topologia estrela estendida.	11
Figura 9	Rede de topologia mesh.	11
Figura 10	Rede de topologia daisy chain.	12
Figura 11	Encapsulamento das unidades de dados.	13
Figura 12	Formato da frame do protocolo EnOcean <i>Radio Protocol</i> (ERP).	14
Figura 13	Formato de um telegrama de tamanho igual ou inferior a 6 bytes.	16
Figura 14	Formato de um telegrama de tamanho superior a 6 bytes.	17
Figura 15	Rede com vários elementos Smart ACK.	20
Figura 16	Diagrama de sequencia do processo de <i>Reclaim</i> .	21
Figura 17	Diagrama de sequência do processo de <i>Learn In</i> com repetidor.	23
Figura 18	Diagrama de sequência do processo de operação com repetidor.	23
Figura 19	Formato de um pacote ESP3 com o respetivo tamanho associado a cada campo.	25
Figura 20	Diagrama de Ragone das diferentes composições químicas de baterias [26].	27
Figura 21	Diagrama de Ragone das diferentes tecnologias de armazenamento energético [27].	27
Figura 22	Arquitetura do sistema.	32

Figura 23	Diagrama de blocos do nó sensor.	33
Figura 24	Máquina de estados do principio de funcionamento dos nós sensores.	35
Figura 25	Diagrama de blocos do nó coordenador.	35
Figura 26	Diagrama de sequência do modo de aprendizagem.	37
Figura 27	Diagrama de sequência de recepção de mensagens dos nós sensores.	37
Figura 28	Interação com o broker MQTT.	39
Figura 29	Sensor de ultrassons MaxBotix MB7072.	41
Figura 30	Circuito de ativação do sensor.	42
Figura 31	Módulo EnOcean STM 300.	44
Figura 32	Circuito de fornecimento de energia aos inputs/outputs (a) e circuito de seleção do tipo de contentor (b)	45
Figura 33	Circuito de ativação do processo <i>Learn</i>	46
Figura 34	Circuito de conversão do formato série RS232 para o formato série TTL.	46
Figura 35	Bateria primária LS17500 (a) e bateria híbrida LSP17500-20F (b) da Saft Batteries.	48
Figura 36	Caixa Hammond 1554B2.	49
Figura 37	Virtualização da placa de circuito impresso do nó sensor (a) e placa de circuito impresso do nó sensor (b).	49
Figura 38	Nó Sensor.	50
Figura 39	Organização de dados do telegrama 4BS transmitido.	51
Figura 40	<i>System Stack</i> do nó sensor.	52
Figura 41	Fluxograma do ciclo principal do nó sensor.	53
Figura 42	Fluxograma do sub-processo de <i>wake up</i> do nó sensor.	54
Figura 43	Fluxograma do sub-processo de <i>reclaim</i> do nó sensor.	55
Figura 44	Módulo <i>Global System for Mobile Communications 2G</i> (GSM) SIM800L da SIMCOM.	57
Figura 45	Pinout do STM32L083CB.	58
Figura 46	Vista frontal do painel solar (a) e vista traseira do painel solar (b).	59
Figura 47	Energia mensal fornecida pelo painel solar escolhido.	59
Figura 48	Eficiência do LTC3130 no modo <i>burst</i> consoante a carga para uma tensão de saída de 5 V [47].	61
Figura 49	Circuito de definição de tensão de saída.	61
Figura 50	Circuito de definição do valor do <i>Maximum Power Point Control</i> (MPPC).	62

Figura 51	Bateria do nó coordenador.	62
Figura 52	Eficiência do TPS61022 da Texas Instruments no modo Forced PWM(a) e no modo Auto PFM(b) [50].	65
Figura 53	Circuito de regulação da tensão do SIM800L.	66
Figura 54	Circuito de regulação da tensão do TCM 310 e do STM32L073.	66
Figura 55	Caixa Hammond 1554F2GYCL.	67
Figura 56	Bucim de entrada de cablagem do painel solar.	67
Figura 57	Virtualização da placa de circuito impresso do nó coordenador (a) e placa de circuito impresso do nó coordenador (b).	68
Figura 58	Nó coordenador.	68
Figura 59	Ficheiro JSON a transmitir na primeira ligação.	69
Figura 60	Ficheiro JSON a transmitir depois da primeira ligação.	69
Figura 61	<i>System Stack</i> do nó coordenador.	70
Figura 62	Fluxograma de arranque do nó coordenador.	71
Figura 63	Fluxograma do ciclo principal do nó coordenador.	72
Figura 64	Fluxograma da rotina do processo <i>learn</i> do nó coordenador.	73
Figura 65	Fluxograma do ciclo de ligação à internet.	74
Figura 66	Placa EVA320-2 e o programador EOP300-2 (a) e USB300 (b).	76
Figura 67	Teste 1: Mensagem de arranque do nó sensor.	77
Figura 68	Teste 1: Log de arranque do coordenador.	77
Figura 69	Teste 1: Segunda mensagem de arranque do nó sensor.	78
Figura 70	Teste 1: Mensagens do processo Learn-In de SmartACK.	78
Figura 71	Teste 1: Log do processo Learn-In de SmartACK.	78
Figura 72	Teste 1: Mensagens após o processo de Learn-In de SmartACK.	78
Figura 73	Teste 1: Log das mensagens recebidas.	79
Figura 74	Teste 1: Troca de mensagens com a <i>mailbox</i> vazia.	79
Figura 75	Teste 1: Log de receção de mensagens.	79
Figura 76	Teste 1: Redefinição do ciclo de envio.	80
Figura 77	Teste 1: Troca de mensagem sem resposta do coordenador.	80
Figura 78	Teste 1: Log de arranque do coordenador.	80
Figura 79	Teste 1: Mensagens do processo Learn-In de SmartACK.	81

Figura 80	Teste 1: Mensagens do processo Learn-Out de SmartACK.	81
Figura 81	Teste 1: Log do coordenador do processo de Learn Out.	81
Figura 82	Teste 1: Mensagens do nó sensor após o processo de learn out.	82
Figura 83	Keithley DMM7510	82
Figura 84	Teste 2: Consumo do nó sensor.	83
Figura 85	Teste 2: Consumo do nó sensor num ciclo de leitura.	83
Figura 86	Teste 2: a) Ligações do sistema de teste b) Consumo do nó sensor em sleep medido pelo <i>Source Meter</i> durante uma hora.	84
Figura 87	Telegramas transmitidos durante o teste 3.	86
Figura 88	Primeira ligação ao <i>broker Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)</i> : Log (a) e JSON transmitido (b).	87
Figura 89	Log de receção de telegramas após a primeira ligação ao <i>broker MQTT</i>	87
Figura 90	Atualização dos tópicos <i>/connection_rate</i> e <i>/read_rate</i>	87
Figura 91	Segunda ligação ao <i>broker MQTT</i> : a) Log b) JSON transmitido.	88
Figura 92	Log de receção de telegramas após a segunda ligação ao <i>broker MQTT</i>	88
Figura 93	Terceira ligação ao <i>broker MQTT</i> : a) Log b) JSON transmitido.	88
Figura 94	Receção do JSON por parte do programa MQTT Explorer.	89
Figura 95	Tráfego de dados.	89
Figura 96	Medição do consumo nas fases de comunicação.	90
Figura 97	Medição do consumo em <i>sleep</i> do nó coordenador.	91
Figura 98	Teste MPPC: Variação da tensão V_{MPPC} e da tensão $V_{LTC_{out}}$	93
Figura 99	Teste MPPC: Variação de V_{MPPC} e de $V_{LTC_{in}}$	94

Índice de Tabelas

Tabela 1	Comparação dos nós sensores.	7
Tabela 2	Elementos da EnOcean por camadas	12
Tabela 3	Parâmetros dos tempos de maturação.	14
Tabela 4	Alocação das <i>time slots</i> para os diferentes sub telegramas.	15
Tabela 5	Alocação das <i>time slots</i> para os diferentes telegramas.	16
Tabela 6	Descrição do campo STATUS conforme o <i>nibble</i>	18
Tabela 7	Telegramas Smart Ack	20
Tabela 8	Prioridades de um candidato a <i>Post Master</i> relacionado com os parâmetros	22
Tabela 9	Estudo de mercado dos sensores de ultrassons.	41
Tabela 10	Estudo de mercado dos módulos de comunicação EnOcean.	43
Tabela 11	Comparação da utilização de um módulo programável EnOcean com módulo <i>gateway</i> EnOcean e microcontrolador.	43
Tabela 12	Identificadores do tipo de contentor.	45
Tabela 13	Requisitos elétricos do microcontrolador e do sensor.	47
Tabela 14	Estudo de mercado de baterias primárias.	48
Tabela 15	Descrição do valor do campo Ciclo.	51
Tabela 16	Descrição do valor do campo Estado	51
Tabela 17	Comparação entre os módulos <i>gateway</i> EnOcean TCM 310 e TCM 515.	56
Tabela 18	Estudo de Conversores CC-CC do tipo <i>buck-boost</i> da Analog Devices.	60
Tabela 19	Comparação entre os módulos <i>gateway</i> EnOcean TCM 310 e TCM 515.	63
Tabela 20	Requisitos elétricos do STM32L073, do TCM310 e do SIM800L.	64
Tabela 21	Teste 2: Consumos das diferentes fases de um ciclo de leitura.	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 22 Teste 2: Autonomia para diferentes amostragens.	85
Tabela 23 Consumos da fase da comunicação e da fase ativa.	91
Tabela 24 Valores do teste de funcionamento do MPPC.	95

Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> 43, 44, 46
API	<i>Application Program Interface</i> 12, 25, 44
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> 41
ASK	<i>Amplitude-Shift Keying</i> 14
CC-CC	<i>Continuous Current to Continuous Current</i> 60
CPSs	<i>Cyber Physical Systems</i> 8
CPU	<i>Central Processing Unit</i> 44, 58
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> 17, 25
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> 83, 91
DPPM	<i>Dynamic Power Path Management</i> 63
EEP	<i>EnOcean Equipment Profiles</i> 24
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> 58
ERP	<i>EnOcean Radio Protocol</i> xi, 13, 14, 18, 24, 25, 43, 47, 96
ESP	<i>EnOcean Serial Protocol</i> 24, 25, 57
GFSK	<i>Gaussian Frequency-Shift Keying</i> 14
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> 43, 51
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> 57
GSM	<i>Global System for Mobile Communications 2G</i> xii, 5, 57

HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i> 71
IaaS	<i>Infrastructure as a Service</i> 8, 9
IoT	<i>Internet of Things</i> 28
IP	<i>Ingress Protection</i> 29, 31, 34
LDO	<i>Low Drop-Out</i> 66, 97
MPPC	<i>Maximum Power Point Control</i> xii, 59, 60, 61, 62
MPPT	<i>Maximum Power Point Track</i> 59, 60
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i> xiv, 28, 38, 68, 70, 72, 75, 86, 87, 88, 89
OSI	<i>Open System Interconnection</i> 12, 13
PaaS	<i>Platform as a Service</i> 8
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> 3, 36, 44, 49, 50, 67, 68
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i> 59
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> 25, 44, 60
QoS	<i>Quality of Service</i> 28, 29
RAM	<i>Random-Access Memory</i> 58
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i> 4
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> 22, 77
RSU	<i>Resíduos Sólidos Urbanos</i> 1
SaaS	<i>Software as a Service</i> 8
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> 44
SRAM	<i>Static Random-Access Memory</i> 44

UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* 43, 44, 57, 58

WSNs *Wireless Sensor Networks* 7, 8

Introdução

Neste capítulo é realizada uma introdução ao tema da dissertação, e abordam-se a motivação para a sua realização, os objetivos e a estrutura da mesma.

1.1 Motivação

Atualmente, um dos grandes problemas ambientais é a produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que prejudicam a saúde pública, através da poluição do solo, águas e ar. Torna-se, portanto, vital o serviço que realiza a recolha dos mesmos não só por questões de limpeza, higiene e impacto ambiental, mas também para garantir que estes resíduos possam ser convertidos de desperdício em materiais ou produtos de potencial utilidade através da reciclagem dos mesmos.

Existem três métodos de recolha de RSU: porta a porta, predefinida e seletiva. A recolha porta a porta é baseada na verificação no ato da recolha tendo como consequência o gasto desnecessário de combustível, tempo de recursos humanos e um maior desgaste do veículo de recolha, este método é empregue onde não existem ilhas ecológicas (figura 1) para os resíduos indiferenciados tendo estes um contentor próprio. A recolha predefinida é baseada numa rota otimizada para a redução da distância percorrida (cerca de 30 %) pelo veículo de recolha, contudo, a rota não é definida tendo em consideração o estado dos contentores, ao contrário do que acontece no método seletiva [1]. Este tira partido da disponibilidade desta informação, para em tempo real, otimizar as rotas. Tal permite reduzir emissões de gases poluentes e redução dos custos destas operações [2].

Assim, fazendo a recolha seletiva consegue-se reduzir os custos de operação em 40 % face ao primeiro método [3]. Estes, são reduzidos através do combustível poupado, utilização dos recursos humanos e manutenção dos veículos. Visto que cerca de 60 % a 80 % do orçamento destes serviços são gastos no

transporte e recolha dos RSU, sendo portanto, uma métrica máxima a redução de custos nesta componente do serviço, conseguindo assim, uma margem de lucro maior [4].



Figura 1: Ilha ecológica com 5 contentores (resíduos, orgânicos, papel, plástico/metal e vidro).

1.2 Enquadramento

Para que seja possível usar o método de recolha predefinida com conhecimento prévio do nível de enchimento é necessário ter um sistema que faça a aquisição do nível de enchimento dos contentores. Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um sistema ciber-físico que dê suporte a este método de recolha, isto é, que monitorize, remotamente, o nível de enchimento dos contentores. A escalabilidade deste sistema é algo a ter em consideração pois só em Portugal existem cerca de 55 455 ecopontos, o sistema deverá ser modular e de fácil instalação para que possa ser usado nos vários tipos de contentores existentes [5].

Este sistema será composto por nós sensores, nós coordenadores e um micro serviço *web*, usando tecnologia sem fios para a comunicação entre os diversos nós. Assim, os nós sensores são responsáveis pela aquisição do nível de enchimento dos contentores enviando-o para o nó coordenador, sendo este responsável por enviar os dados provenientes dos nós sensores para um micro-serviço *web* através da Internet.

Este sistema, tem como base o sistema *Weco*, que foi desenvolvido para a SOMA - Sociedade de Montagem de Automóveis, S.A. [3]. Pretende-se melhorá-lo, através do seu *refactoring* do nó coordenador e da melhoria dos consumos energéticos do nó sensor, para que este se encaixe na definição de um sistema ciber-físico tornando-o num que esteja preparado para a Indústria 4.0.

1.3 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema ciber-físico para a monitorização de resíduos sólidos urbanos. Este, deverá ter um curto alcance entre os dois tipos de nós do sistema,

permitindo que os nós sensor recolhem e enviem informações para o coordenador da rede CPS. Posto isto, esta dissertação tem os seguintes objetivos:

- Estudo de sensores de baixo consumo, devendo estes garantir elevados níveis de estanquidade, que permitam detetar a quantidade de resíduos no interior do contentor e desenvolvimento de abordagens que permitam reduzir os consumos energéticos;
- Os nós sensores deverão ser dispositivos de elevada autonomia;
- Os nós coordenadores deverão ser autos-suficientes;
- A comunicação do nó coordenador com a camada superior deverá ser redundante;
- Toda a eletrónica desenvolvida, deverá estar condicionada de forma a garantir elevados níveis de estanquidade;
- Sistema modular e genérico, compatível com os vários contentores existentes em Portugal.

A realização desta dissertação irá, tendo em conta os objetivos acima descritos, permitir a otimização da logística de recolha dos resíduos sólidos urbanos, permitir a entrada na Indústria 4.0 e consequentemente aumentar a margem de lucros das empresas de recolhas ao mesmo tempo que reduz a pegada ecológica desta indústria.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, após a exposição do problema e motivação que conduziu à realização desta dissertação, são abordados os fundamentos teóricos, o funcionamento da tecnologia de comunicação *EnOcean* e o estado da arte em soluções de recolha de resíduos no capítulo 2 Estado da Arte e Fundamentos Teóricos.

No capítulo 3 Especificação do Sistema é executada uma especificação do sistema a desenvolver, sendo neste capítulo definidos os requisitos e restrições do sistema, os blocos principais de um nó sensor e de um nó coordenador assim como as tecnologias que estes utilizarão.

No capítulo 4 Desenvolvimento do Sistema são abordados os desenvolvimentos do *hardware* e *software* resultando na realização de *Printed Circuit Board* (PCB) e definição de tramas de comunicação.

No capítulo 5 Resultados são apresentados os testes realizados e respetivos resultados.

Por último, o capítulo 6 Conclusões e Trabalho Futuro apresenta as conclusões e o trabalho futuro, sendo executada uma avaliação geral do sistema e o que se pode acrescentar e melhorar.

Estado da Arte e Fundamentos Teóricos

Neste capítulo aborda-se o estado da arte de sistemas semelhantes que já se encontram no mercado, é ainda executado um estudo de tecnologias utilizadas para a dissertação em causa.

2.1 Estado da Arte

Neste subcapítulo são apresentadas soluções existentes para a monitorização dos resíduos sólidos urbanos.

2.1.1 WiseWaste

O sistema WiseWaste da SOMA - Sociedade de Montagem de Automóveis, S.A., é um sistema de gestão operacional para a limpeza urbana e é composto por oito módulos [6]:

- weight - Sistema de pesagem de veículos;
- mobile - Aplicação para *smartphones*;
- fleet - Gestão de frota para viaturas;
- route - Gestão de frota para a limpeza urbana.
- rfid - Sistema de identificação de contentores por *Radio-Frequency Identification* (RFID);
- access - Sistema de gestão de acesso a contentores;
- level - Sistema de monitorização do nível de enchimento dos contentores.
- payt - Módulo de implementação do sistema poluidor-pagador.

Estes módulos foram criados com o intuito de gerir, monitorizar e intervencionar as atividades de limpeza urbana e podem ser utilizados na sua totalidade (sendo que certos serviços complementam-se entre si) ou de forma isolada consoante as necessidades dos clientes.

Realçando agora o módulo level, este é composto por um sensor ultrassónico por cada contentor, sendo que, cada ilha ecológica possui uma bateria, um painel solar para a recarregar, um microcontrolador e um dispositivo de comunicação móvel que executa a comunicação com um computador central. Neste sistema todos os sensores ultrassónicos estão ligados por fios ao microcontrolador.

2.1.2 Weco

O Weco é um sistema desenvolvido para a SOMA - Sociedade de Montagem de Automóveis, S.A. de forma a melhorar o sistema existente na altura (WiseWaste) [3]. O sistema é constituído por nós sensores que comunicam através de tecnologia proprietária RF com um coordenador. O nó sensor (figura 2) apresenta uma autonomia de 6 anos e possui um grau de proteção IP67. O coordenador faz a interface entre a rede de sensores Weco e o sistema WiseWaste.



Figura 2: Nó sensor do sistema Weco [3].

2.1.3 Syren II-L

O sistema Syren II-L, desenvolvido pela BH Technologies e implementado em Portugal pela Sopsa sob a marca lasso, é um sistema de monitorização do nível de enchimento dos contentores [7, 8]. Este, fornece dados sobre o estado do contentor tendo, também, uma plataforma de otimizações das rotas de recolha. A arquitetura deste sistema baseia-se numa rede de sensores sem fios, que utiliza uma topologia estrela, sendo o dispositivo sensor ligado a um dispositivo coordenador. Este último nó tem uma ligação telefónica à rede fixa ou uma ligação GSM que permite que os dados sejam enviados através da internet para um servidor *web*.

O nó sensor, ilustrado na figura 3, tem uma autonomia de dez anos, é *weather resistant* (proteção IP68) e modular visto que este nó sensor pode ser empregue em vários tipos de contentor.



Figura 3: Nó sensor do sistema Syren da BH Technologies [7].

2.1.4 Bee2Waste

A solução Bee2Waste, desenvolvida pela PT Empresas e pela Compta (agora Future Compta), permite fazer a gestão de recolha de resíduos sólidos urbanos. Esta contempla uma plataforma *web* que é disponibilizada como um modelo *Software as a Service*, oferecendo [9]:

- Planeamento e gestão de operações;
- Interação com veículos, pontos de recolha e destinos finais dos resíduos;
- Interface com produtores, cidadãos e reguladores;
- Recolha de dados, monitorização e análise;
- Identificação de padrões e previsões;
- Gestão de recursos humanos;
- Gestão de ativos;
- Rastreamento, localização, geofencing;
- Planeamento inteligente de rotas;
- Adaptado e disponível para PAYT, RAYT e SMART;
- Relatórios e monitorização de indicadores de desempenho.

O dispositivo responsável pela medição (figura 4) possui um sensor e um sistema de comunicação Machine-2-Machine podendo este ser GSM, SigFox ou LoRa. O dispositivo pode ainda ser dotado de um sensor de temperatura. As medições são transmitidas 3 vezes por dia, quanto à autonomia deste dispositivo não foi possível apurar.



Figura 4: Dispositivo de medição Bee2Waste da Future Compta [9].

2.1.5 Comparação dos Sistemas

De forma a resumir os dispositivos previamente apresentados estes foram agregados na tabela 1 com a exceção do sistema WiseWaste, uma vez que este não segue uma topologia de redes sem fios.

O dispositivo Weco utiliza tecnologia WSN EnOcean, sendo capaz de operar autonomamente durante 6 anos, este possui um grau IP67. Já o Syren consegue superar estas características com 10 anos de autonomia e um grau IP69K, sendo o LoRa a sua tecnologia WSN. O dispositivo Bee2Waste é o que apresenta maior flexibilidade de tecnologias *Wireless Sensor Networks* (WSNs) no entanto não foi possível apurar a sua autonomia, nem o seu nível de estanquidade. Todos os dispositivos apresentam uma tecnologia de deteção do nível de enchimento recorrendo ao uso de sensores de ultrassons.

Tabela 1: Comparação dos nós sensores.

Dispositivo Sensor	Weco	Syren II-L	Bee2Waste
Tecnologia WSN	EnOcean	LoRa	GSM\SigFox\LoRa
Autonomia	6	10	NA
Tecnologia de deteção	Sonar	Sonar	Sonar
Estanquidade	IP67	IP68\IP69K	NA

2.2 Fundamentos Teóricos

Neste subcapítulo é executado um estudo das tecnologias utilizadas para a dissertação em causa.

2.2.1 Rede de Sensores Sem Fios

As redes de sensores sem fios, também conhecidas como WSNs, são redes que monitorizam variáveis físicas através de sensores que as mesmas possuem. Devido à comunicação sem fios as WSNs tornam-se ideais quando se pretende monitorizar variáveis em locais remotos ou de difícil acesso ou que são considerados como perigosos. A aplicação destas redes é ampla, e portanto, existem muitas variações, tanto a nível de *hardware* como de *software*. Geralmente são constituídas por vários dispositivos, podendo estes ser um nó sensor ou coordenador.

Os nós sensores são responsáveis por monitorizar uma ou várias variáveis físicas, sendo estes normalmente constituídos por uma fonte de alimentação (bateria primária, bateria secundária ou módulo de *energy harvesting*), um microcontrolador, um ou vários sensores e um módulo de comunicação sem fios.

Os nós coordenadores são responsáveis por receberem leituras dos nós sensores sendo que consoante a aplicação das WSNs pode posteriormente enviá-las para uma camada superior, guardá-las e/ou exibi-las. São, normalmente, constituídos por uma fonte de alimentação, um microcontrolador e um ou mais módulos de comunicação sem fios.

2.2.2 Sistemas Ciber-Físicos

Os sistemas ciber-físicos, também conhecidos como *Cyber Physical Systems* (CPSs) na literatura inglesa, são sistemas que integram a computação e o meio físico com o intuito de controlar entidades físicas. Isto é, tem como entrada variáveis físicas (através do uso de sensores) e atuam em componentes físicas [10]. São uma melhoria dos sistemas embebidos visto que o foco dos CPSs é o ambiente físico com a computação ligada à rede, enquanto que os sistemas embebidos focam-se maioritariamente na computação.

É devido à sua conexão que estes sistemas divergem dos sistemas embebidos, tornando-os configuráveis, escaláveis e complexos [11]. Os sistemas ciber-físicos podem, assim, ser vistos como uma melhoria das redes de sensores sem fios.

2.2.3 Serviços Cloud

A computação em *cloud* é um modelo que permite um acesso conveniente, ubíquo e *on-demand* a uma vasta gama de recursos computacionais. O consumidor pode ter acesso a estes sem ter a infraestrutura e o conhecimento necessários para os utilizar. O modelo de *cloud* é composto por cinco características sendo elas a escalabilidade, o acesso à rede, os recursos partilhados, a gestão e a utilização de recursos *on-demand* [12].

Existem três modelos de serviços sendo eles o *Software as a Service* (SaaS), *Platform as a Service* (PaaS) e *Infrastructure as a Service* (IaaS). A figura 5 demonstra algumas aplicações destes três modelos de serviço.

O modelo de serviço SaaS oferece ao consumidor a capacidade de utilizar uma aplicação que esteja a ser executada na *cloud*. Esta é usada por dispositivos através de uma interface *web* ou de um programa, de realçar que o consumidor não gere este modelo, só o utiliza.

O modelo de serviço PaaS oferece ao consumidor a capacidade de implementar uma aplicação desenvolvida pelo utilizador numa infraestrutura da *cloud* ou criar aplicações que usem ferramentas de *software*

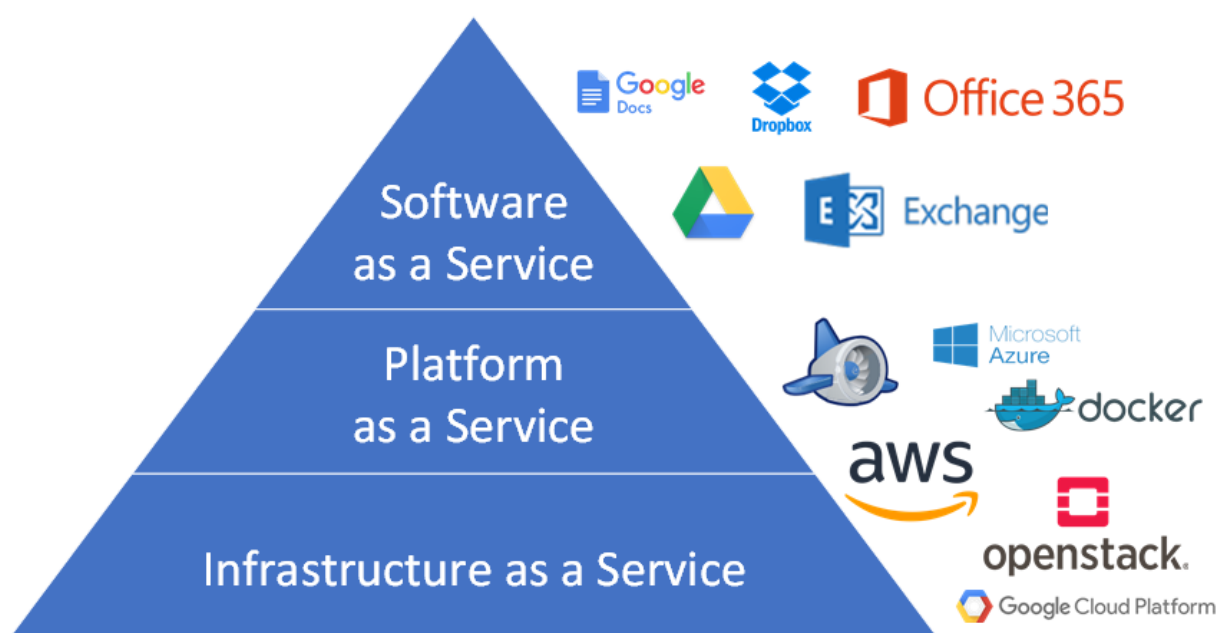


Figura 5: Aplicações que utilizam serviços cloud.

fornechas pelo serviço. Neste, o utilizador tem controlo sob a aplicação e pode configurar definições relacionadas com o *deployment* da mesma no serviço *cloud*.

O modelo de serviço IaaS oferece recursos computacionais ao consumidor. Este pode fazer o *deployment* ou correr *software* sem restrições, sendo que este tanto pode ser uma aplicação como um sistema operativo. Neste serviço, o consumidor consegue controlar as aplicações desenvolvidas, os sistemas operativos e ao contrário dos anteriores também pode ter controlo de alguns recursos tais como o armazenamento e componentes de rede.

Estes três modelos de serviço oferecem vários graus de abstração para quem os usufrui sendo que quanto maior o grau de abstração mais limitado se torna o serviço em questão.

2.2.4 Micro Serviços Web

Os micro serviços *web* são serviços que estruturam uma aplicação *web* tendo como base uma arquitetura orientada a serviços. Esta aplicação pode ter vários micro serviços *web* sendo que estes não dependem de outros que a constituem, estes têm uma granularidade elevada e protocolos de comunicação pouco complexos, garantindo assim, a sua modularidade [13].

Estas características facilitam o desenvolvimento de aplicações *web* comparativamente com as aplicações *web* monolíticas, visto que este pode ser acelerado através da paralelização de desenvolvimento dos micro serviços. A figura 6 ilustra as diferenças arquiteturais das arquiteturas referidas anteriormente.

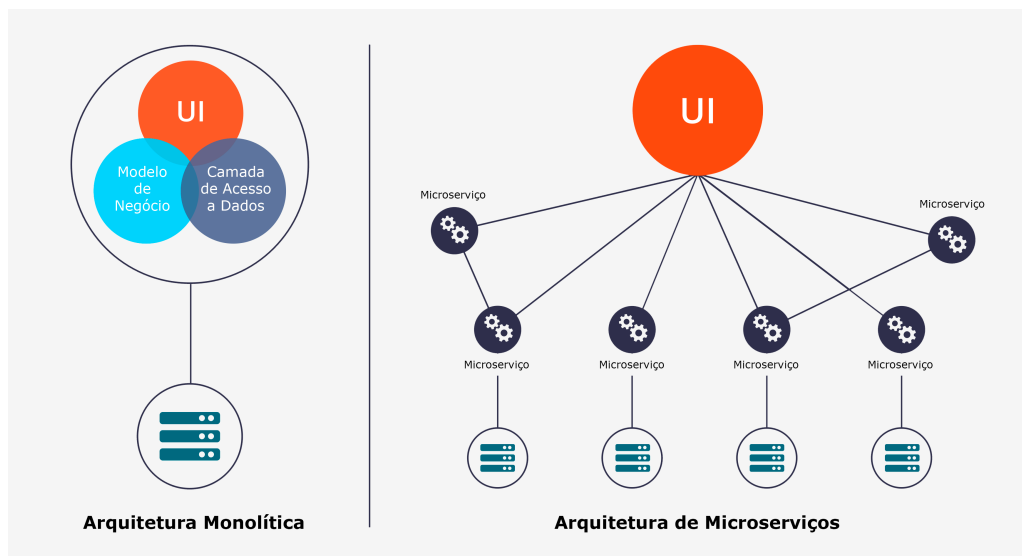


Figura 6: Comparação de uma arquitetura monolítica com uma arquitetura de micro serviços [14].

2.2.5 Topologia de Rede

As redes de sensores sem fios podem funcionar de diferentes formas, consoante a tecnologia utilizada a topologia de rede pode variar.

2.2.5.1 Topologia em Estrela

A topologia de estrela (figura 7) baseia-se na centralização da comunicação num dispositivo (nó central), neste tipo de ligações cada nó da rede comunica diretamente com o nó central sendo necessário que estes estejam dentro do alcance da rede do nó central, no caso de um nó querer comunicar com este, é necessário que a informação passe sempre pelo nó central.

Esta topologia é mais simples de desenhar e implementar, no entanto devido à centralização da comunicação no nó central, esta topologia apresenta como desvantagem o facto de uma falha do nó central da rede implica uma falha em todo o sistema de comunicação.

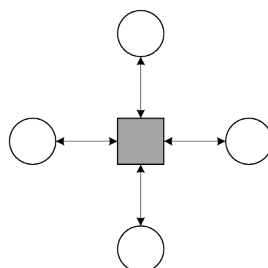


Figura 7: Rede de topologia estrela. O nó central é representado pelo quadrado e os nós da rede pelas circunferências.

2.2.5.2 Topologia em Estrela estendida

A topologia de estrela estendida (figura 8) baseia-se também, na centralização da comunicação num dispositivo (nó central), no entanto esta acrescenta a implementação de repetidores entre o nó central e os restantes nós, aumentando assim a distância de transmissão.

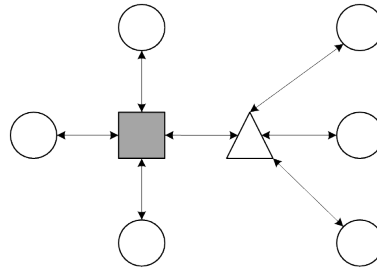


Figura 8: Rede de topologia estrela estendida. O nó central é representado pelo quadrado, o triângulo representa o repetidor e os nós da rede são representados pelas circunferências.

2.2.5.3 Topologia Mesh

A topologia de *mesh* baseia-se na descentralização da comunicação num dispositivo, neste tipo de ligações não existe propriamente um nó central encarregue da comunicação entre nós, cada nó da rede pode comunicar com outro através de vários nós da rede existentes, não existindo assim nenhuma hierarquia de comunicação.

As redes *mesh* podem ser mais versáteis na instalação e devido à sua independência de comunicação, redundantes, uma vez que se um nó falhar apenas a comunicação proveniente desse nó cessará, sendo que as dos restantes continuarão a fluir através de outros que constituem a rede desta topologia, no entanto, esta quando comparada com uma topologia hierárquica como a estrela poderá implicar um maior consumo energético uma vez que a comunicação poderá depender vários nós.

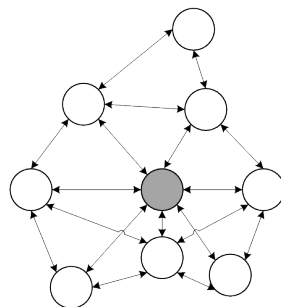


Figura 9: Rede de topologia mesh. As circunferências correspondem aos nós da rede sendo a circunferência cinzenta o nó gateway, responsável pela transmissão de dados para uma camada superior.

2.2.5.4 Topologia Daisy Chain

A topologia daisy chain (figura 10) baseia-se na ligação em série dos nós, sendo que todos os nós propagam a comunicação até esta chegar ao destino, não existindo hierarquia de comunicação nesta topologia. A adição de um novo nó também é relativamente simples uma vez que basta inseri-lo entre dois ou numa extremidade, no entanto como a comunicação depende sempre de todos os nós, no caso de falha de um nó toda a comunicação a jusante desse nó é afetada.

Esta topologia também apresenta um consumo energético superior às outras duas apresentadas uma vez que a comunicação é retransmitida até chegar ao nó que se destina.



Figura 10: Rede de topologia daisy chain. As circunferências correspondem aos nós da rede sendo o nó central representado pela circunferência cinzenta.

2.2.6 Tecnologia EnOcean

Nesta secção serão abordadas as tecnologias da EnOcean que oferecem soluções para redes de sensores sem fios, sendo estas robustas e *low-power* tendo desenvolvido protocolos de comunicação, software e hardware com esse intuito. Na tabela 2 estão organizados, por camadas, os elementos que são usados (utilizando o modelo de rede da especificação *Open System Interconnection (OSI)*) na comunicação sem fios da EnOcean. A nível de *hardware* a EnOcean tem à disposição vários microcontroladores tendo como base o *Dolphin Core* e no *software* o *Dolphin Application Program Interface (API)*.

Tabela 2: Elementos da EnOcean por camadas

Camada	Elemento	Pacotes de Dados
Física	EnOcean Radio Protocol	Frame
Ligação de Dados	EnOcean Radio Protocol	Sub-telegrama
Rede	EnOcean Radio Protocol	Telegrama
Transporte	Smart Ack e/ou Remote Management	Mensagem
Sessão	-	-
Apresentação	Encriptação	Dados
Aplicação	EnOcean Equipment Profiles	Dados

2.2.6.1 EnOcean Radio Protocol

O ERP é um protocolo proprietário que define as três camadas inferiores da especificação do modelo de rede OSI, sendo as camadas: a física, a ligação de dados e a de rede.

Este protocolo é baseado em pacotes que podem ser de três tipos, consoante a camada:

- *Frame* - É a representação dos dados codificados na camada física incluindo informação de controlo e sincronização para o recetor;
- Sub-telegrama - É o resultado do processo de descodificação, na camada de ligação de dados, onde as informações de sincronização e de controlo são removidas da *frame*;
- Telegrama - É o resultado do processo de descodificação do sub-telegrama, na camada de rede, onde as informações de estado e de controlo são removidas bem como o tipo de sub-telegrama e o identificador de origem.

A figura 11 ilustra o encapsulamento destes pacotes de dados, sendo que a tracejado encontram-se os elementos que são removidos na camada superior.

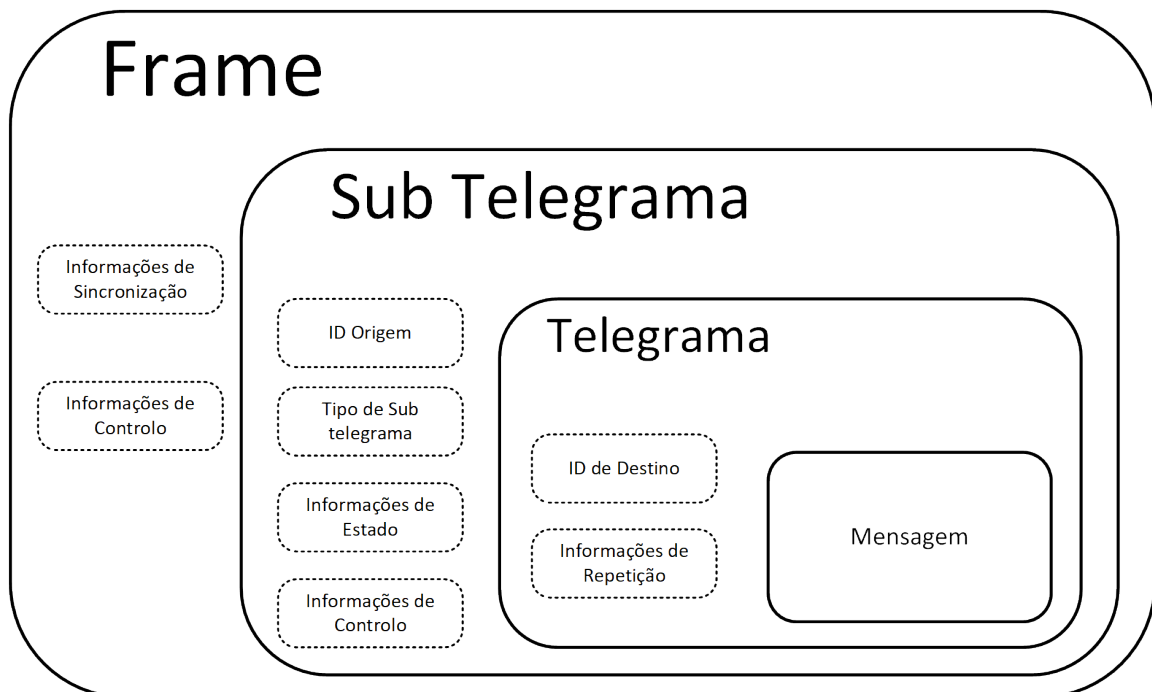


Figura 11: Encapsulamento das unidades de dados.

É na camada física que os dados são codificados/descodificados de forma simples requerendo um nível reduzido de processamento, garantindo assim uma operação de baixo consumo. A especificação

elétrica está definida de modo a ser independente da frequência utilizada visto que mais frequências poderão ser especificadas consoante a necessidade do mercado. O ERP 2 usa modulação FSK (o ERP 1 usa modulação *Amplitude-Shift Keying* (ASK)) podendo, também, ser empregue a modulação *Gaussian Frequency-Shift Keying* (GFSK) dependendo das regulamentações locais [15, 16]. As especificações das frequências nominais de 902,875 MHz e 928,35 MHz estão definidas para o mercado norte americano e para o japonês respetivamente, sendo que a gama europeia é de 868,3 MHz apesar de esta não estar definida na especificação é a que a EnOcean vende para mercados europeus. A taxa de transferência de dados deste protocolo é de 125 kbit/s.

A transmissão dos *bits* da *frame* é iniciada pelo envio do preâmbulo que sincroniza e gera os limites da divisão de dados, após o preâmbulo a *word* de sincronização é transmitida de forma a que o recetor sincronize os *bytes* de dados, sendo posteriormente transmitido o número de *bytes* que serão enviados e depois os dados cujo o tamanho foi enviado anteriormente. A figura 12 demonstra a constituição de uma *frame*.

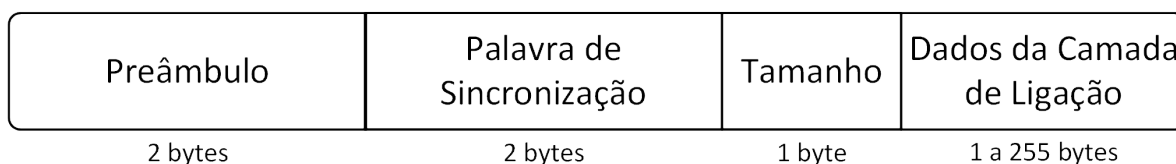


Figura 12: Formato da frame do protocolo ERP.

Na camada de ligação de dados, os dados transmitidos são chamados de sub telegramas podendo ser transmitido apenas um ou vários sub telegramas. Regra geral, são enviados vários sub telegramas de forma a evitar colisões de telegramas provenientes de diferentes transmissores.

Um telegrama completo é constituído por um máximo de três sub telegramas. Estes deverão ser enviados dentro do tempo de maturação de transmissão de um telegrama completo. Existe, também, um tempo de maturação de receção, em que é o tempo (sendo estes transmitidos dentro de um limite tempo definido) para receção dos vários sub telegramas pertencentes ao telegrama proveniente do mesmo transmissor. Na tabela 3 estão especificados os respetivos tempos.

Tabela 3: Parâmetros dos tempos de maturação.

Descrição	Parâmetros
Tempo máximo de maturação da transmissão	25 ms
Tempo de maturação da receção	100 ms

O recetor, a partir do primeiro sub telegrama recebido, aguarda cem milissegundos para receber os dois restantes do mesmo transmissor, que perfazem o telegrama, após este tempo todos os sub telegramas recebidos serão considerados como um novo telegrama.

O tempo de maturação de receção é significativamente maior que o de transmissão pois, numa rede EnOcean, podem existir no máximo dois repetidores entre o transmissor e recetor.

O tempo máximo de maturação da transmissão é dividido em vinte e cinco partes (de 0 a 24) sendo estas denominadas de *time slots*. São divididas em grupos para transmitir os sub telegramas, conforme pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4: Alocação das *time slots* para os diferentes sub telegramas.

Sub telegrama	<i>Time slots</i>
1º	De 0 a 1
2º	De 4 a 12
3º	De 14 a 22

Um escalonador integrado nas APIs da EnOcean determina, dentro dos limites para cada sub telegrama, qual o *time slot* a ser usado. A transmissão do segundo e do terceiro sub telegrama só pode ser iniciada quando a do anterior for completada. Não está especificado um tempo de pausa entre transmissões de sub telegramas, sendo que os transmissores poderão usar qualquer uma das *time slots* desde que esta esteja inserida no tempo de cada sub telegrama.

Se o canal *wireless* estiver ocupado com uma transmissão proveniente de outro, a funcionalidade *listen before talk* pode atrasar a transmissão até que o tempo de maturação da transmissão do outro dispositivo seja atingido. Esta funcionalidade, juntamente com as *time slots* permite que seja possível evitar colisões das transmissões no entanto não garante que estas sejam erradicadas.

Existem dois tipos de telegramas:

- Telegramas de tamanho igual ou inferior a seis *bytes*;
- Telegramas de tamanho igual superior a seis *bytes*.

O primeiro tipo de telegrama tem uma estrutura fixa (ilustrada na figura 13) para mensagens especiais.

Os telegramas do tipo da figura 13 não podem ser repetidos, isto é, um repetidor não os pode retransmitir uma vez que estes não possuem um campo de repetição. Estes telegramas também não possuem um campo de integridade de dados, sendo que esta verificação deverá ser executada pela camada superior de forma a assegurar a integridade dos mesmos.

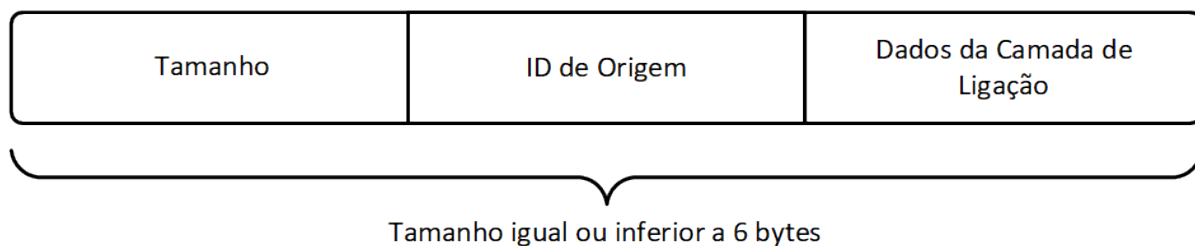


Figura 13: Formato de um telegrama de tamanho igual ou inferior a 6 bytes.

Estes telegramas podem ser usados para transportar mensagens de *Smart Acknowledge Reclaim*, um *Keep Alive* ou uma mensagem de erro, porém só está definido o telegrama cujo o tamanho é de cinco bytes como se pode ver na tabela 5, sendo que os outros estão reservados para uso futuro.

Tabela 5: Alocação das *time slots* para os diferentes telegramas.

Tamanho	ID Origem (bits)	Dados C. de Ligação (bits)	Interpretação
1	8	0	Reservado
2	8	8	Reservado
3	16	8	Reservado
4	24	8	Reservado
5	32	8	<i>Smart Acknowledge Reclaim</i>
6	32	16	Reservado

O telegrama de tamanho superior a seis bytes é composto por vários campos, podendo alguns destes não existirem em certos telegramas. Estes campos são:

- **Tamanho:** Número de bytes do telegrama;
- **Cabeçalho:** Ocupa um byte no telegrama, sendo que os 3 bits mais significativos indicam o tamanho do identificador de origem e do identificador de destino, o quarto bit indica se existe cabeçalho estendido e os restantes indicam qual o tipo de telegrama;
- **Cabeçalho Estendido:** Também ocupa um byte, quando presente. Os quatro bits mais significativos fornecem informações acerca da repetição dos telegramas (STATUS) e os restantes bits menos significativos indicam o tamanho de dados opcionais, no caso de ser zero estes são inexistentes;
- **Tipo de Telegrama Estendido:** Como o próprio nome indica, este campo quando disponível, especifica o tipo de telegrama estendido;
- **ID Origem:** Contém o ID de origem, mesmo quando o telegrama é repetido o ID não é modificado. O seu tamanho é variável conforme os 3 bits mais significativos do cabeçalho;

- **ID Destino:** Contém o ID a quem o telegrama é destinado. A existência deste campo é variável e o seu tamanho é de 32 bits;
- **Dados da Camada de Ligação de Dados:** Contêm os dados do telegrama;
- **Dados Opcionais:** Contêm os dados opcionais do telegrama, este campo geralmente não é utilizado, está especificado para aplicações futuras;
- **CRC:** Campo de verificação da integridade dos dados com 8 bits de tamanho, a técnica usada para a verificação de integridade é o *Cyclic Redundancy Check (CRC)* de 8 bits.

Na figura 14 os campos que foram especificados em cima encontram-se ordenados do byte mais significativo para o byte menos significativo.

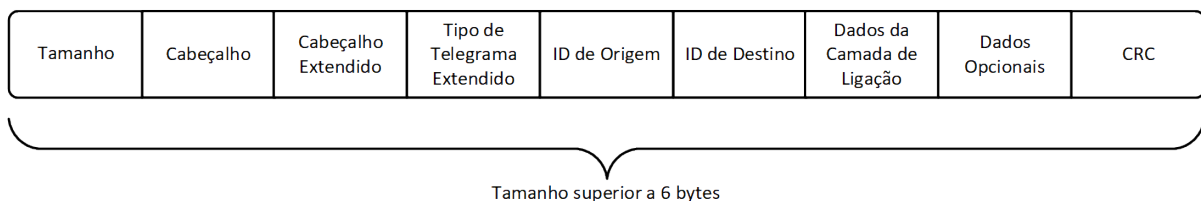


Figura 14: Formato de um telegrama de tamanho superior a 6 bytes.

A camada de rede especifica o acesso ao conteúdo da transmissão, a retransmissão (no caso dos repetidores) e a redundância da transmissão.

Os repetidores são necessários quando a distância entre o transmissor e o recetor é não é suficiente para que a ligação seja estabelecida. Estes têm como objetivo receber os telegramas e enviá-los com uma ligeira modificação, nos bits de STATUS presentes no cabeçalho estendido, é o único campo que um repetidor pode modificar. Há no entanto dois níveis de repetição:

- **Nível 1:** Repetidores que repetem apenas telegramas originais;
- **Nível 2:** Repetidores que repetem telegramas originais e aqueles que foram repetidos apenas uma vez.

A tabela 6 pode ser visto como a repetição é representada no campo STATUS.

Há no entanto umas restrições locais no que diz respeito à retransmissão de telegramas. No Japão só são permitidas repetições de nível um, quanto às transmissões redundantes, estas devem ser concluídas dentro de cinquenta milissegundos e não deverá existir nenhuma transmissão nos próximos cinquenta milissegundos.

Tabela 6: Descrição do campo STATUS conforme o *nibble*.

Bits do campo STATUS	Descrição
0000	Telegrama original
0001	Telegrama repetido uma vez
0010	Telegrama repetido duas vezes
1111	Telegrama não pode ser repetido

A transmissão redundante deverá ser usada quando nenhum outro método de confirmação de recepção é usado. Uma transmissão deverá ser repetida pelo menos uma vez e no máximo duas e deverá existir uma pausa de doze milissegundos entre a primeira e a segunda transmissão de forma a evitar interferência por parte de certos aparelhos eletrônicos que operam na gama dos cinquenta e sessenta Hertz.

O ERP é um protocolo maioritariamente unidirecional, no entanto, o endereçamento de um telegrama é uma característica essencial para que este se possa tornar num protocolo bidirecional, desta forma, o endereçamento foi especificado para habilitar a integração de futuras características neste protocolo.

O endereçamento de um telegrama é feito recorrendo ao encapsulamento, estes são reconhecidos através do campo do tipo de telegrama (sendo este de valor 0xA6). O campo encapsulado contém o telegrama original a ser endereçado e o campo de destino o endereço de destino.

2.2.6.2 SmartACK

O SmartACK é um protocolo de comunicação sem fios que foi desenvolvido com o intuito de reduzir o consumo energético de um dispositivo de baixo consumo energético e de eliminar os atrasos inseridos pelos repetidores [17].

Neste protocolo existem quatro elementos com diferentes funcionalidades:

- Sensor Smart ACK: É o dispositivo que envia a informação recolhida e faz o pedido dos dados (*Reclaim*). Pode ser associado (*Learn In*) a um *Post Master* e ambos têm conhecimento de que houve uma associação (*Learned*) no entanto nunca pode assumir a funcionalidade de *Post Master*. Este dispositivo normalmente é auto-suficiente;
- Controlador Smart ACK: É um dispositivo que processa os dados de um Sensor Smart ACK e podendo transmitir uma resposta, pode associar Sensores Smart ACK e também pode assumir o papel de *Post Master*. Este dispositivo geralmente é alimentado pela rede elétrica;
- Smart ACK Repetidor: É um dispositivo que reenvia os dados recebidos, pode assumir o papel de *Post Master*. Neste dispositivo a funcionalidade Smart ACK pode ser desactivada sem afetar a

função de repetidor. Pode ainda ter outras funcionalidades de sensorização e atuação (por exemplo: um atuador de uma válvula). Este dispositivo geralmente é alimentado pela rede elétrica;

- *Post Master*: É o elemento SmartACK mais próximo de um Sensor Smart ACK, este pode ser um Controlador Smart ACK ou um Repetidor Smart ACK. Os *Post Masters* detêm uma *Mail Box* para cada Sensor Smart ACK associado, onde os telegramas são retidos até receberem um *reclaim*.

Uma rede SmartAck pode ser constituída por elementos Smart ACK e elementos que não tenham esta característica habilitada.

A redução do consumo energético é alcançada através da sincronização de mensagens denominada de processo *reclaim*, desta forma o recetor de um Sensor SmartAck só está ativo quando este é necessário, pois neste modo o dispositivo possui um consumo energético elevado. No entanto o processo de *reclaim* pode falhar devido aos atrasos inseridos pelos repetidores ou devido a colisões. Esta falha é colmatada com o uso de *Mail Boxes* nos *Post Masters*.

Uma *Mail Box* é criada num *Post Master* quando um Sensor SmartAck se associa a um Controlador, cada par Sensor-Controlador tem a sua própria *Mail Box* no *Post Master* mesmo que este seja *Post Master* de outros Sensores SmartAck. Sempre que um *Post Master* pretenda enviar (ou reencaminhar quando se trata de repetidor) um telegrama para um Sensor SmartAck que se encontre associado este é reencaminhado para a *Mail Box* correspondente. A *Mail Box* só pode reter um telegrama (retendo sempre o mais atual).

Existem dois tipos de *Mail Boxes*:

- Temporária: É utilizada no processo de associação (*Learning*) O *Learn Acknowledge* é guardado nesta *Mail Box*. Só existe uma *Mail Box* temporária num dispositivo Smart ACK;
- Normal: É utilizada durante o seu funcionamento normal, cada par Sensor-Controlador tem a sua própria. No caso de um Sensor SmartAck estar associado a mais que um Controlador SmartAck existirá uma *Mail Box* adicional por cada par garantindo assim que haja sempre espaço para uma mensagem de cada controlador.

A figura 15 exemplifica uma rede com todos os elementos Smart ACK.

Esta rede contém vários elementos, sendo que cada Sensor, neste caso, tem um *Post Master* diferente estando todos associados ao Controlador. O Controlador é o *Post Master* do Sensor 3, o Repetidor 1 é o do Sensor 1 e o Repetidor 2 é o do Sensor 2, sendo que cada *Post Master* contém a *Mail Box* destinada ao seu sensor que lhe está mais próximo. Quando o Controlador quer enviar um telegrama para o Sensor 3,

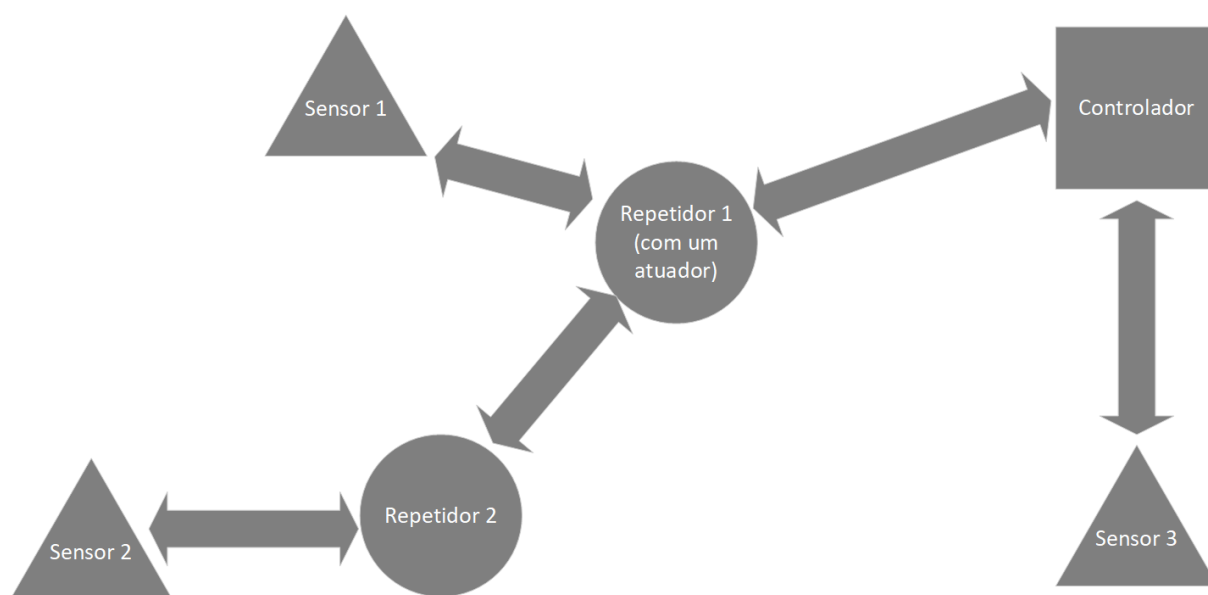


Figura 15: Rede com vários elementos Smart ACK.

este é guardado na sua *Mail Box* interna correspondente, quando a transmissão é os restantes Sensores o telegrama é enviado sendo este guardado na *Mail Box* dos *Post Masters* correspondentes.

No protocolo Smart ACK existem dois modos:

- Modo de Aprendizagem: É neste modo que decorre o processo de *Learn In* e *Learn Out*, os dispositivos trocam informações acerca deles de forma a criar ou removida uma ligação lógica na rede. Na criação da ligação ainda é determinado qual o elemento SmartAck que será *Post Master* do par Sensor-Controlador.
- Modo de Operação: É o modo em que a transferência de dados acontece sendo ela SmartAck ou não.

O fluxo de mensagens nestes dois modos é semelhante sendo que a única mudança é o conteúdo dos telegramas. A tabela 7 especifica, consoante o modo, o conteúdo relacionado com o tipo de mensagem.

Tabela 7: Telegramas Smart Ack

Tipo de mensagem	Modo de Aprendizagem	Modo de Operação
<i>Init Telegram</i>	<i>Learn Request</i>	<i>Data</i>
<i>Reply</i>	<i>Learn Reply</i>	<i>Data Reply</i>
<i>Reclaim</i>	<i>Learn Reclaim</i>	<i>Data Reclaim</i>
<i>Acknowledge</i>	<i>Learn Acknowledge</i>	<i>Data Acknowledge</i>

O tipo de mensagem *Reply* não é empregue quando o Controlador é o *Post Master*. A figura 16 exemplifica o fluxo de mensagens.

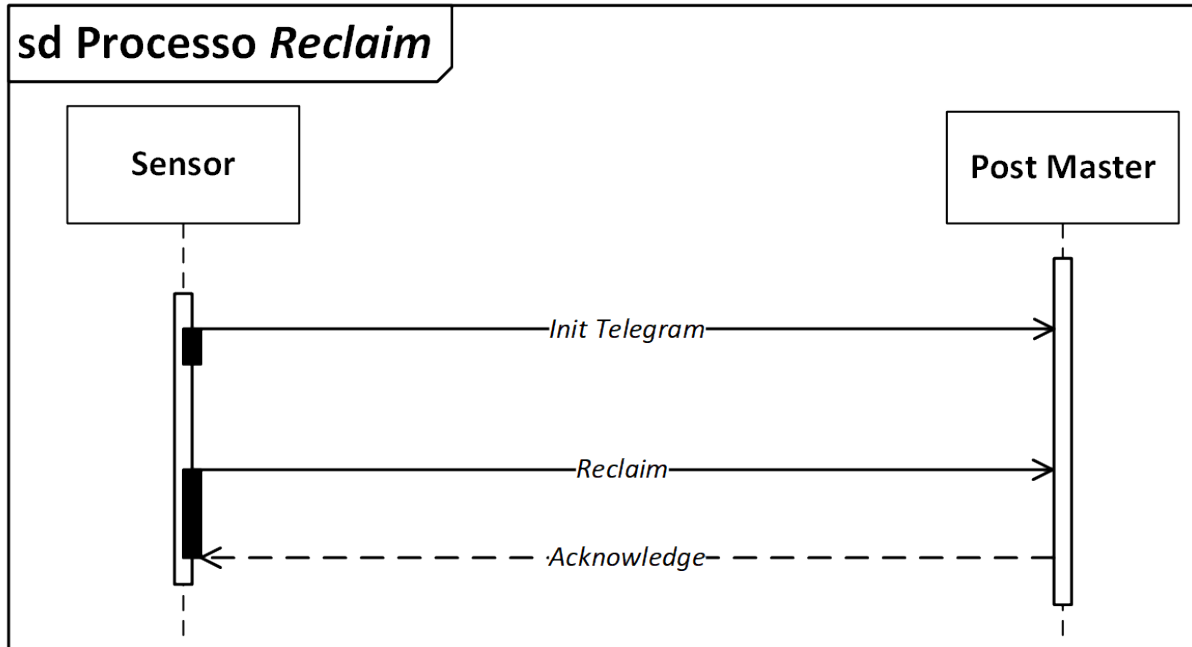


Figura 16: Diagrama de sequencia do processo de *Reclaim*.

O sensor envia o *Init Telegram* aguardando um determinado tempo para que o *Post Master* possa preparar a mensagem de *Acknowledge*. Após esse tempo o Sensor envia uma mensagem de *Reclaim* (iniciando, assim, o processo de *Reclaim*) a qual o *Post Master* responde com uma mensagem de *Acknowledge*. Quando esta não é recebida, um *time-out* é ativado que acaba por desligar o recetor. A atividade deste está ilustrada na figura pelas ativações de cor preta.

O modo de aprendizagem é o processo cujo os dispositivos trocam informação entre eles para que a ligação lógica de uma rede EnOcean seja criada ou removida. Deste processo resulta um *Learn In* (associação) ou um *Learn Out* (remoção).

Este processo decorre da seguinte forma:

- O Controlador entra no modo *Learning*;
- O Sensor entra no modo *Learning* enviando o telegrama *Learning Request*;
- É decidido quem é o *Post Master*;
- Controlador decide se é uma associação ou uma remoção;
- O Sensor envia o telegrama *Learn Reclaim*;
- O Post Master responde com o *Learn Acknowledge*.

A atribuição do *Post Master* de um Sensor numa rede com vários elementos Smart Ack, é feita através de um sistema de prioridade tendo como base quatro parâmetros dos vários elementos candidatos a *Post Master*: se já é um *Post Master* de outro Sensor, se tem espaço para uma *Mail Box* adicional, se o seu *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) é suficiente e se é um dispositivo Controlador ou Repetidor. As prioridades encontram-se relacionadas com os parâmetros na tabela 8.

Tabela 8: Prioridades de um candidato a *Post Master* relacionado com os parâmetros

Prioridade	<i>Post Master</i>	<i>Mail Box</i>	RSSI	Repetidor
15	Sim	Sim	Sim	Não
14	Sim	Sim	Sim	Sim
11	Sim	Não	Sim	Não
10	Sim	Não	Sim	Sim
7	Não	Sim	Sim	Não
6	Não	Sim	Sim	Sim

Todos os candidatos são sujeitos a atribuição de *Post Master* desde que a sua prioridade seja igual ou superior a seis, no caso de só existirem candidatos com prioridade inferior a seis o processo de aprendizagem falha.

A prioridade seis é um caso especial visto que podem existir vários repetidores numa rede, são, portanto, utilizados como critérios de desempate o número de repetições entre o sensor e o controlador ganhando o menor, sendo posteriormente utilizado o RSSI para critério de desempate no caso de o número de repetições ser igual.

A figura 17 ilustra o processo de aprendizagem com um repetidor que ocorre da seguinte forma:

- O Sensor envia o *Learn Request*;
- O *Learn Request* é recebido por um repetidor sendo inserido no telegrama o ID do repetidor, o RSSI do telegrama recebido e um código que detalha os estados de *Post Master* e da *Mail Box* sendo transmitido o *Learn Request* modificado;
- O Controlador recebe o telegrama proveniente de um repetidor, analisa a informação e envia o *Learn Reply* para o repetidor com a maior prioridade, promovendo-o a *Post Master* e criando, assim, a *Mail Box* do par Sensor-Coordenador. O *Learn Reply* recebido pelo *Post Master* contém informações para o Sensor sobre o processo de aprendizagem, este é guardado na *Mail Box* temporária dedicada ao processo de *Learn*;
- O Sensor envia o *Learn Reclaim* esperando obter informações sobre o processo de aprendizagem;
- O *Post Master* responde com o *Learn Acknowledge* que é uma repetição do *Learn Acknowledge*.

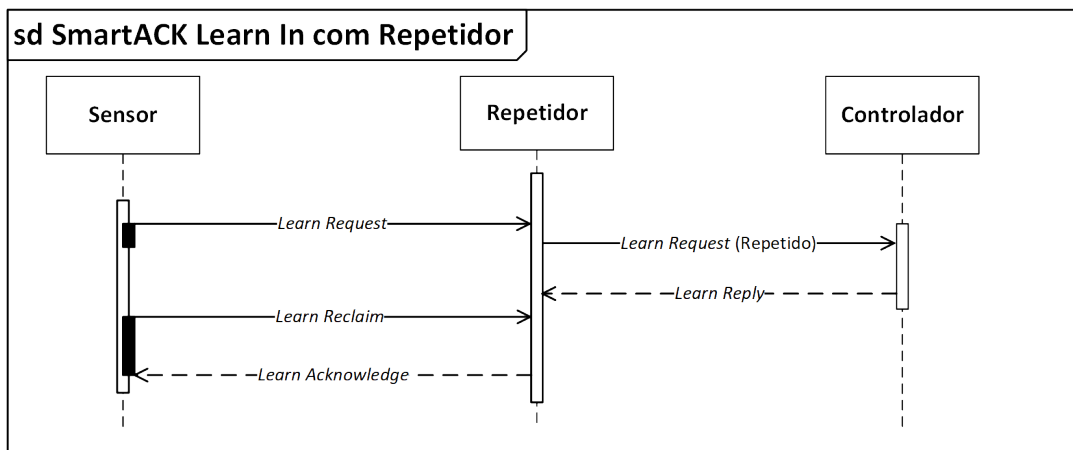


Figura 17: Diagrama de sequência do processo de *Learn In* com repetidor.

É neste processo que o tempo de resposta a ser utilizado no modo de operação é estabelecido pelo Controlador.

O modo de operação é o processo de comunicação de telegramas de um Sensor SmartAck para o Controlador SmartAck.

Este processo decorre da seguinte forma:

- O Sensor envia o telegrama *Data*;
- O Controlador prepara o telegrama de *Data Acknowledge*;
- O Sensor pede o *Data Acknowledge*.

A aplicação no Sensor SmartAck decide a que frequência ocorre uma comunicação de dados e se o processo de *reclaim* é executado como se pode ver na figura 18.

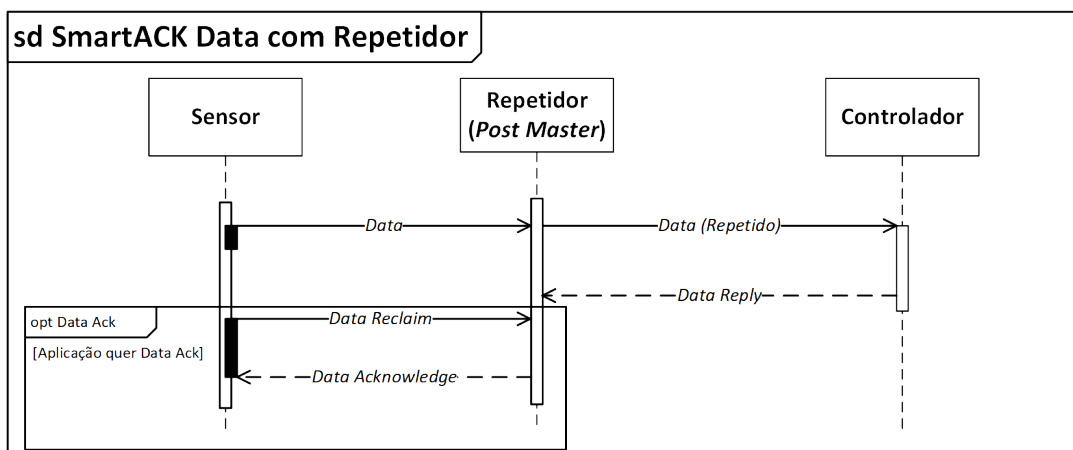


Figura 18: Diagrama de sequência do processo de operação com repetidor.

O Sensor envia o telegrama *Data* e espera o tempo de resposta de modo a que o Controlador tenha tempo de preparar o *Acknowledge* e enviá-lo para o *Post Master*. Após esse tempo, o processo de *reclaim* é iniciado. O Sensor, durante este processo, indica ao *Post Master* de qual *Mail Box* é que pretende receber a informação através da transmissão do index da *Mail Box*, caso queira mais que uma *Mail Box*, o Sensor deverá repetir o processo de *reclaim* mudando o index da *Mail Box*.

No decorrer deste modo pode ainda ocorrer um *Remote Reset*, que activa a execução do modo *Learn* sem contacto direto com o sensor. Este entra no modo *Learn* quando recebe um *Remote Reset Signal*, enviando de seguida um telegrama *Learn Request*.

A única maneira possível de entrar em contacto com o sensor é durante o processo de *reclaim* visto que é apenas neste processo que o Sensor SmartAck recebe telegramas.

2.2.6.3 EnOcean Equipment Profiles

O EnOcean *Equipment Profiles* (EEP), desenvolvido pela EnOcean Alliance, define os dados do utilizador que são inseridos na estrutura de dados do ERP, é aplicado a dispositivos EnOcean capazes de comunicar entre si [18]. O EEP descreve as características técnicas do dispositivo, define os dados do utilizador (consoante o tipo de telegrama e funcionalidade do dispositivo) e é otimizada para transmissões fiáveis e de baixo consumo recorrendo ao ERP. Assim, juntamente com o ERP, é possível transmitir um telegrama com um consumo energético de 50 μ Ws e um tempo de transmissão inferior a um milissegundo, reduzindo, assim, a possibilidade de colisão de dados.

As características técnicas do dispositivo são definidas por um perfil que é constituído por três elementos:

- RORG ou CHOICE - Tipo de telegrama radio do ERP (8 bits);
- FUNC - Funcionalidade do conteúdo dos dados (6 bits);
- TYPE - Tipo de dispositivo e características do mesmo (6 bits).

Existe uma enorme variedade de perfis definidos, sendo, no entanto, possível definir mais perfis caso não haja nenhum perfil que se adegue aos existentes. Este perfil após o seu desenvolvimento deverá ser submetido à EnOcean Alliance para aprovação.

2.2.6.4 EnOcean Serial Protocol 3

O EnOcean *Serial Protocol* (ESP) 3 é um protocolo que define a comunicação série entre um *host* e um módulo EnOcean, este é um protocolo de ponto-a-ponto com uma estrutura de dados por pacote,

podendo este ser um pacote de dados, de comando, de evento ou de mensagens de resposta [19].

Este pacote é composto por um cabeçalho, dados e dados opcionais. O cabeçalho contém o tamanho dos dados, o tamanho dos dados opcionais e o tipo de pacote. Este pacote conta ainda com dois campos de verificação de integridade de dados, um campo de CRC de oito bits para o cabeçalho e outro campo de CRC de oito bits para os dados e os dados opcionais. A estrutura do pacote ESP3 visto na figura 19.

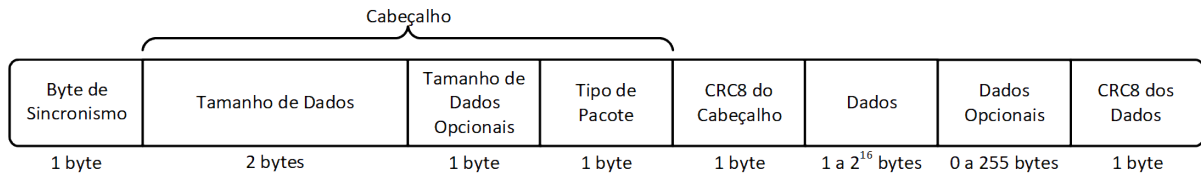


Figura 19: Formato de um pacote ESP3 com o respetivo tamanho associado a cada campo.

2.2.6.5 Dolphin API

O Dolphin API é uma biblioteca de abstração ao *chip* Dolphin, que permite reduzir o *time-to-market* de desenvolvimento do produto, oferecendo [20]:

- Suporte aos protocolos ESP e ERP;
- Rotinas de interface de transmissão e receção da *stack* do ESP e do ERP, rotinas de configuração e interação de saídas/entradas, rotinas de modos de *power down* e rotinas de temporizadores de *software*;
- Interrupção através de temporizador por *hardware* podendo este ser usado como contador ou controlo de *Pulse Width Modulation (PWM)*;
- Análise da *stack* e diagnóstico de erro da aplicação;
- *Preemptive Scheduler* que permite a execução paralela da *task* da aplicação com a *task* do sistema;
- Integração de funcionalidades de repetidor, *SmartACK* e *Remote Management*.

2.2.7 Energy Harvesting

O *energy harvesting* é um processo de produção, conversão e armazenamento de energia através do meio em que um dispositivo se encontra inserido, podendo a energia originar de fontes naturais como a energia solar, a energia hídrica e eólica ou de fontes não-naturais como energia eletromagnética [21, 22].

O elemento responsável pela conversão de uma determinada energia para a energia elétrica, é denominado de transdutor. Os transdutores normalmente não produzem uma energia estável e contínua,

sendo muitas das vezes necessário recorrer a circuitos eletrónicos que permitam a normalização e estabilidade dos valores produzidos, garantindo assim o correcto funcionamento do circuito eletrónico que se encontra a jusante [23].

O *energy harvesting* pode ainda possuir uma vertente de armazenamento sendo esta responsável pela absorção de energia que não pode ser consumida na sua totalidade no momento de produção, desta forma, é possível estender o funcionamento de um dispositivo para lá da sua janela de produção de energia elétrica, recorrendo ao uso de baterias, condensadores e super-condensadores para o armazenamento do excedente da produção energética [24].

A densidade de potência varia consoante a fonte energética e a tecnologia do transdutor, estando compreendida entre 1 nW/cm^2 a 100 mW/cm^2 [25].

2.2.8 Armazenamento de energia

Existem vários tipos de armazenamento de energia que fornecem diferentes características no fornecimento e armazenamento desta. Neste capítulo serão abordadas as características das baterias primárias, das baterias secundárias, dos super-condensadores e dos condensadores.

As baterias primárias, também denominadas de pilhas, são elementos capazes de fornecer energia elétrica, não são carregáveis e têm uma taxa de descarga baixa.

As baterias secundárias, também denominadas de pilhas recarregáveis, são elementos capazes de fornecer e receber energia elétrica, geralmente têm uma densidade energética inferior às pilhas, isto é, para o mesmo volume armazenam quantidades inferiores de energia. Estas normalmente apresentam uma densidade de potência superior, para a mesma capacidade energética conseguem fornecer uma potência superior quando comparadas com as pilhas, tendo como consequência uma taxa de descarga superior a estas. Existem várias tecnologias químicas e diferentes tipos de construção interna de uma bateria, resultando assim em vários tipos de baterias secundárias que oferecem diferentes densidades energéticas e densidades de potência, como pode ser visto na figura 20. As baterias recarregáveis apresentam uma vida útil que varia consoante a tecnologia química da bateria.

A tecnologia de bateria que se destaca é a de iões de lítio, superando as outras tecnologias na densidade energética e na densidade de potência.

Os super-condensadores são elementos capazes de fornecer e receber energia elétrica, Estes normalmente apresentam uma densidade de potência superior, isto é, para a mesma capacidade energética conseguem fornecer uma potência superior quando comparadas com as pilhas recarregáveis tendo como

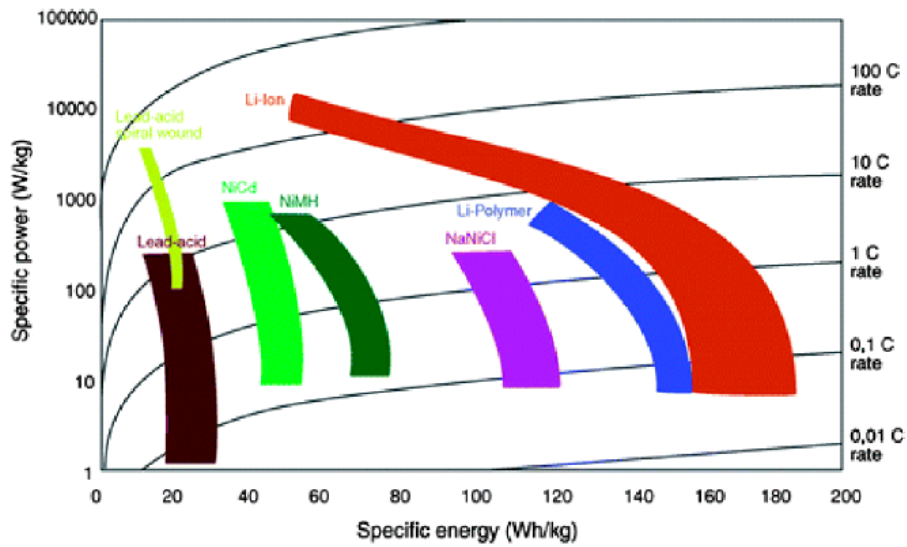


Figura 20: Diagrama de Ragone das diferentes composições químicas de baterias [26].

consequência uma taxa de descarga superior a estas, também apresentam um maior número de ciclos de carga/descarga face às baterias.

Os condensadores são elementos capazes de fornecer e receber energia elétrica, estes normalmente apresentam uma densidade de potência ligeiramente superior, isto é, para a mesma capacidade energética conseguem fornecer uma potência superior quando comparadas com aos super-condensadores tendo como consequência uma taxa de descarga superior a estes.

Na figura 21, recorrendo a um diagrama de Ragone são comparados os diferentes tipos de armazenamento energético.

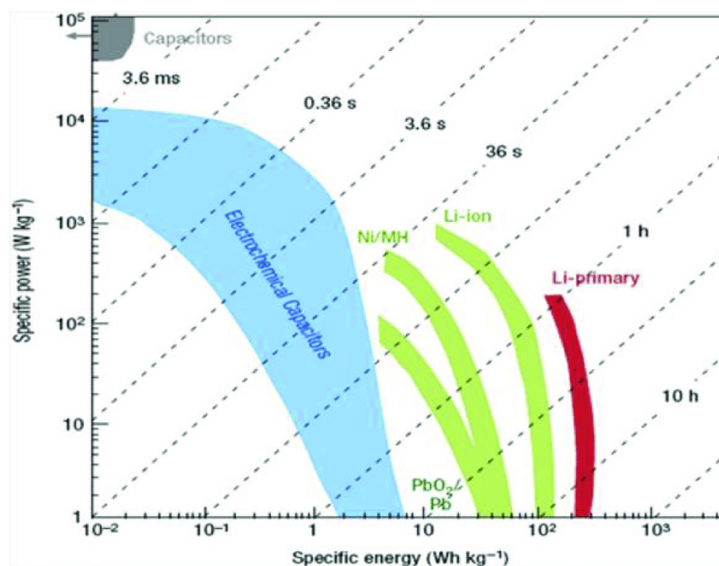


Figura 21: Diagrama de Ragone das diferentes tecnologias de armazenamento energético [27].

As pilhas apresentam características para armazenar uma grande quantidade de energia durante muito tempo (sendo que estas não podem ser recarregadas) e fornece-la de uma forma moderada, são utilizadas em equipamentos de baixo consumo. Geralmente, após o seu esgotamento energético estas são descartadas e substituídas.

As baterias recarregáveis apresentam características para armazenar grandes quantidades de energia e de a fornecer de uma forma mais moderada que os super-condensadores, sendo utilizadas para o armazenamento de energia de recolhida através do *energy harvesting* em que o fornecimento energético deste seja mais estável, uma vez que as baterias têm de ser carregadas seguindo uma especificação que varia consoante a química desta.

Os super-condensadores apresentam características para armazenar grandes quantidades de energia e de a fornecer rapidamente, sendo utilizados para o armazenamento de energia recolhida através do *energy harvesting* que precisa de ser absorvida rapidamente, estes não possuem uma especificação de carregamento como as baterias recarregáveis.

Os condensadores apresentam características para armazenar pouca energia e de a fornecer rapidamente, sendo bastante utilizados para a estabilização da alimentação de circuitos elétricos.

Estas tecnologias são muitas das vezes utilizadas em conjunto, a maioria dos dispositivos eletrónicos portáteis possuem condensadores e baterias primárias ou condensadores e baterias secundárias, também já existem no mercado pilhas híbridas que são constituídas por uma pilha primária e um super-condensador, algumas técnicas de *energy harvesting* possuem um super-condensador e uma bateria sendo que o primeiro trata da rápida absorção da energia sendo esta posteriormente transferida para a bateria de uma forma mais regrada [28, 29].

2.2.9 Message Queuing Telemetry Transport

O MQTT é um protocolo de mensagens desenhado para redes TCP/IP, este foi desenvolvido por um consórcio com o intuito de minimizar a largura de banda e reduzir os requisitos necessários de um dispositivo, garantindo a confiabilidade através dos níveis de entrega (*Quality of Service (QoS)*). Estas características tornaram este protocolo ideal para as comunicações Machine-2-Machine com foco no *Internet of Things (IoT)*, onde a largura de banda e o consumo energético são métricas importantes [30, 31].

O princípio de funcionamento do MQTT assenta sobre um serviço de publicações e subscrições. Um servidor MQTT também denominado de MQTT *broker*, recebe todas as mensagens publicadas sendo estas reencaminhadas posteriormente para todos os clientes que se encontram subscritos ao tópico e

que estejam ligados ao *broker*.

As mensagens publicadas possuem dois campos, o campo *retained* que possui um valor binário e o campo *QoS* que possui um valor de 0 a 2.

O campo *retained* quando ativo, faz com que o *broker* guarde a mensagem do tópico sendo esta substituída posteriormente por outra com o mesmo campo ativo, desta forma é possível que um cliente receba a última mensagem *retained* de um tópico logo após a sua subscrição.

O campo *QoS* define o três níveis de qualidade de serviço permitindo uma ligação mais fidedigna entre o transmissor e o recetor.

O *QoS* 0 apenas transmite uma mensagem para *broker*. O *QoS* 1 transmite a mensagem para *broker* reenviando sempre esta até receber um pacote de *acknowledge*. O *QoS* 2 transmite a mensagem numerada para *broker* reenviando esta sempre com um numero diferente até receber um pacote de *acknowledge* com a mesma numeração. A diferença entre o *QoS* 1 e o *QoS* 2, é que no primeiro, apenas o transmissor sabe que o *acknowledge* foi recebido enquanto que no nível 2 ambos os lados são notificados [32].

2.2.10 Ficheiro JSON

O JSON é um formato de texto que permite a troca de dados de forma independente e leve. É definido através de uma estrutura de dados e de um conjunto de regras estruturadas [33].

A utilização deste tipo de ficheiro para a troca de dados é bastante utilizado na comunicação de aplicações *web* com *web services* não estando limitado apenas a este uma vez que este formato é bastante versátil, sendo que a maior parte das linguagens de programação já possuem métodos para interagir com ficheiros do formato JSON.

2.2.11 Grau de Ingress Protection

O grau de *Ingress Protection* (IP) é um *standart* internacional (definido pela norma IEC 60529) que classifica o grau de proteção contra intrusões sejam estas de partes humanas, poeiras e água [34]. Este *standart* pretende dar informação mais detalhada ao cliente de forma a que este não seja enganado por manobras publicitárias. O grau de proteção IP é definido por um código composto por 2 dígitos seguidos de uma letra (sendo a letra opcional). O primeiro dígito identifica o grau de proteção contra objetos sólidos enquanto que o segundo dígito indica o grau de proteção contra líquidos. Já o terceiro indica o grau de proteção à resistência ao impacto mecânico.

Primeiro dígito:

- 0 - Não protegido
- 1 - Proteção contra objetos sólidos com diâmetro igual ou superior a 50 mm;
- 2 - Proteção contra objetos sólidos com diâmetro igual ou superior a 12,5 mm;
- 3 - Proteção contra objetos sólidos com diâmetro igual ou superior a 2,5 mm;
- 4 - Proteção contra objetos sólidos com diâmetro igual ou superior a 1,0 mm;
- 5 - Proteção contra pó;
- 6 - À prova de pó.

Segundo dígito:

- 0 - Não protegido
- 1 - Protegido contra gotas que caiam na vertical;
- 2 - Protegido contra gotas que caiam na vertical com corpo inclinado até quinze graus;
- 3 - Protegido contra borrifo de água;
- 4 - Protegido contra fluência de água;
- 5 - Protegido contra jatos de água;
- 6 - Protegido contra jatos potentes de água;
- 6K - Protegido contra jatos potentes de água com pressão aumentada;
- 7 - Protegido contra imersão temporária em água até um metro durante trinta minutos;
- 8 - Protegido contra a imersão contínua em água;
- 9K - Protegido contra água proveniente de jatos de vapor e de alta pressão.

Especificação do Sistema

Neste capítulo são elaboradas as especificações do sistema auxiliando o desenvolvimento do sistema, através da definição dos blocos funcionais necessários para o funcionamento do sistema.

3.1 Requisitos do Sistema

Para uma boa conceção do sistema é necessário definir quais serão as funcionalidades deste através da definição de requisitos, que irão auxiliar o processo de escolha e desenvolvimentos dos elementos constituintes do sistema. Foram identificados os seguintes requisitos:

- Desenvolvimento de *hardware* do nó sensor no sistema previamente desenvolvido (Weco);
- Geração de informação sobre o estados dos contentores de forma periódica;
- Enviar, periodicamente, o nível dos contentores para um dispositivo coordenador;
- Enviar, periodicamente, os valores provenientes dos nós sensores para camada superior;
- Arquitetura do sistema modular;
- Nó sensor com *form-factor* reduzido;
- Grau de Proteção IP67 em todos os nós da rede;
- Dispositivo sensor com longa autonomia, de preferência superior a 15 anos;
- Dispositivo coordenador autossustentáveis energeticamente;
- Sistema de fácil instalação.

3.2 Restrições

Foram impostas restrições que envolvem a utilização de tecnologias no sistema sendo estas:

- Utilização tecnologia EnOcean na rede de sensor sem fios;
- Utilização de tecnologia Arm no nó coordenador;
- Utilização do módulo SIM800L da SIMCom no coordenador.

3.3 Arquitetura do Sistema

A arquitetura deste sistema segue uma topologia em estrela na rede de sensores sem fios, uma vez que cada nó sensor comunica com o nó coordenador da respetiva ilha ecológica como representado na figura 22.

O nó sensor será a componente responsável pela aquisição do nível de enchimento do contentor, esta aquisição será transmitida para o nó coordenador através da rede de sensores sem fios.

O nó coordenador agrega as leituras provenientes dos nós sensores presentes na sua rede, este é ainda responsável pela transmissão destes valores para o micro-serviço *web* recorrendo a um dispositivo gateway (SIM800L). Os parâmetros de funcionamento da rede podem ser modificados através de valores recebidos pelo micro-serviço *web*.

O micro serviço *web* será responsável pela atualização dos parâmetros de funcionamento de todas as redes de sensores existentes e receção das leituras provenientes destas redes.

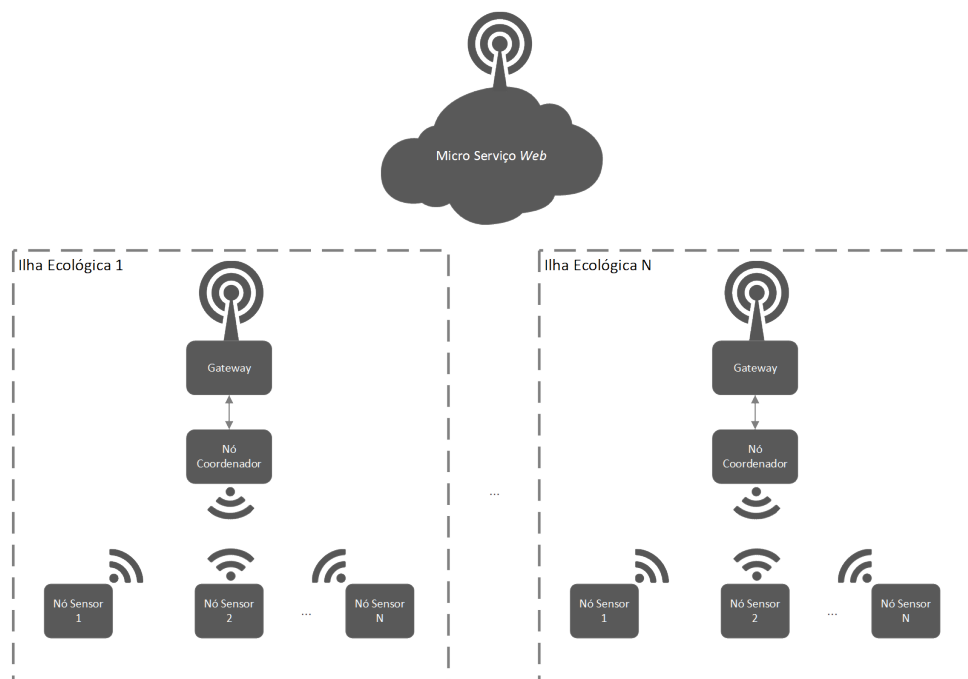


Figura 22: Arquitetura do sistema.

Cada uma das ilhas estabelece uma ligação com o micro-serviço *web* podendo também receber ou enviar mensagens de texto (SMS) caso o micro-serviço *web* não esteja online. Esta abordagem permite a introdução de um sistema de comunicação redundante com a camada superior, permitindo assim notificar o sistema da ocorrência de falhas na comunicação entre componentes.

3.4 Especificação do Nó Sensor

O dispositivo nó sensor é o componente na arquitetura ilustrada na figura 22 responsável pela aquisição do nível de enchimento do contentor e da respetiva transmissão do valor para o nó coordenador.

3.4.1 Especificação do Hardware

Tendo em conta os requisitos e funcionalidades definidos no capítulo 3.1 idealizou-se o diagrama de blocos do *hardware* exibido na figura 23 com base no sistema previamente desenvolvido.

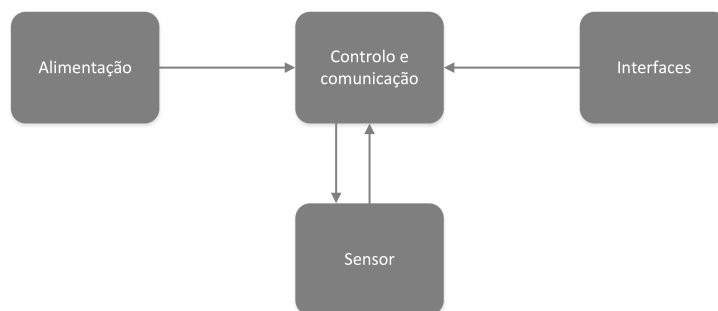


Figura 23: Diagrama de blocos do nó sensor.

O dispositivo, no bloco de alimentação deverá conter todos os componentes necessários para o correto funcionamento do sistema, este bloco do dispositivo deverá cumprir com os requisitos elétricos dos restantes blocos, nomeadamente, as potências nominais de funcionamento e potências instantâneas de todo o sistema. A energia deverá ser proveniente de uma bateria primária uma vez que estas oferecem baixas taxas de *self discharge* quando comparadas com baterias secundárias.

O bloco de controlo e comunicação deverá conter um microcontrolador que permita converter a leitura do sensor e ainda de transmitir este valor para o nó coordenador. Um dos aspetos mais relevantes deste tipo de sensores na aplicação aqui estudada é a longevidade da sua autonomia, pois devem requerer nenhuma ou muito reduzida manutenção e consequentemente alteração com pouca frequência da sua bateria. Assim, este componente deverá ser capaz de gerir sua energia eficientemente, ao mesmo tempo que é composto por componentes eletrónicos adequados, capazes de reduzir os consumos energéticos.

O bloco sensor da figura 23 que tem como tarefa adquirir o nível de enchimento do contentor, podendo este possuir uma interface digital ou analógica, deverá ainda conter a eletrónica necessária para o seu bom funcionamento. Atendendo ao sistema que foi desenvolvido previamente, o sensor deverá ser um da marca MaxBotix.

O bloco de interfaces deverá conter elementos que permitam a interação física com este nó sensor, tendo como objetivo a modificação simplificada do tipo de contentor que o nó sensor representa e a possibilidade de despoletar o processo de aprendizagem através da interação de um botão.

A placa de circuito impresso (que conterà as componentes acima referidas) deverá ser integrada numa caixa que ofereça um grau de proteção IP67. Por sua vez, o sensor eletrónico selecionado deverá oferecer um grau de proteção IP igual ou superior ao da caixa.

3.4.2 Especificação do Software

O nó sensor deverá ser capaz de operar em diversos modos de funcionamento, de forma a ajustar o seu comportamento às várias fases do funcionamento de toda a rede CPS. Assim, foram identificados três modos de operação, sendo eles: o modo de aprendizagem, o modo de leitura e o modo de *sleep*. O modo aprendizagem será ativado através de um botão de *learn*, neste modo, o nó sensor enviará uma mensagem de aprendizagem, ficando à escuta de uma resposta por parte do coordenador, esta mensagem adiciona o sensor à rede de sensores do coordenador se este ainda não se encontrar adicionado ou remove-o se este estiver conectado à rede do coordenador.

O modo de aquisição é despoletado periodicamente, neste modo, o nó sensor irá adquirir o nível de enchimento e comunicá-lo para o nó coordenador através de uma mensagem. Esta conterà ainda outros campos, como o tipo de contentor, número de leituras executadas e tentativa de transmissões. Após o envio da mensagem, o nó sensor aguardará um determinado tempo pela receção de uma mensagem proveniente do coordenador, podendo esta modificar os seus parâmetros de funcionamento.

O modo de *sleep* será o modo mais constante do nó sensor, neste modo, o dispositivo estará num estado de baixo consumo energético que permitirá aumentar significativamente a sua autonomia, este modo será possível devido funcionalidades de *low-power* do microcontrolador a definir e à utilização de *hardware* que permita alcançar baixos consumos energéticos.

É esperado que o nó sensor seja capaz de adquirir o nível de enchimento de um contentor e de comunicar a leitura periodicamente para um nó coordenador, após esta sequência o dispositivo deverá entrar numa fase de baixo consumo energético, estendendo assim, a autonomia do dispositivo. Tendo

em consideração estas funcionalidades, especificou-se a máquina de estados representada na figura 24.

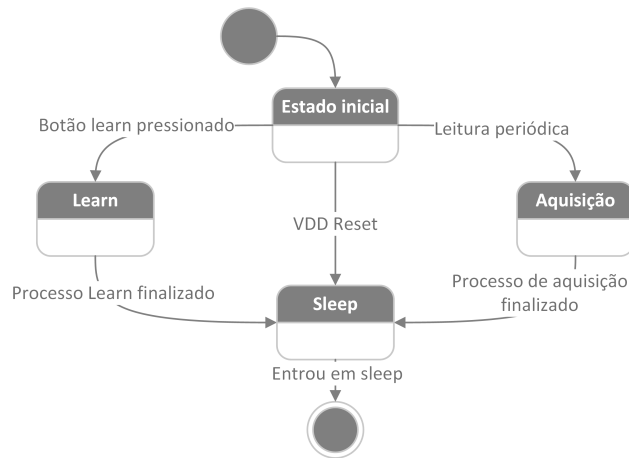


Figura 24: Máquina de estados do princípio de funcionamento dos nós sensores.

3.5 Especificação do Nó Coordenador

O nó coordenador é o dispositivo responsável pela agregação dos níveis de enchimento provenientes dos nós sensores ligados à rede de sensores sem fios e deverá comunicar periodicamente as leituras para a camada superior.

3.5.1 Especificação do *Hardware*

Tendo em conta os requisitos definidos no capítulo 3.1 idealizou-se o diagrama de blocos do *hardware* exibido na figura 25.

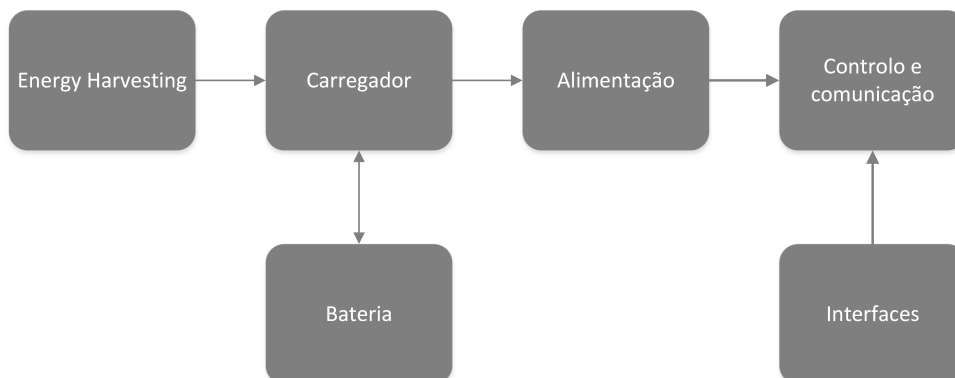


Figura 25: Diagrama de blocos do nó coordenador.

O nó coordenador, no bloco de *energy harvesting* conterá uma fonte de energia renovável que deverá ser devidamente dimensionada para suportar o consumo de toda a eletrónica contida neste. Este bloco, conterá ainda os circuitos necessários para a recolha e conversão eficiente da energia proveniente da fonte de energia renovável. A fonte de energia renovável escolhida é a energia solar uma vez que esta apresenta maior densidade energética e a sua presença é constante, sendo esta uma fonte presente na maioria do ano na meteorologia de Portugal Continental. Para o armazenamento energético definiu-se que o tipo a ser utilizado é uma bateria recarregável, uma vez que é necessário armazenar e fornecer energia. A escolha não recaiu para o super-condensador devido à sua taxa de *self discharge* ser superior à de uma bateria recarregável.

O bloco carregador será responsável pelo carregamento da bateria e pela seleção da fonte de alimentação do dispositivo nó coordenador, isto é, caso a fonte de energia renovável não forneça potência suficiente para alimentar o sistema, este bloco deverá seleccionar a bateria como fonte de alimentação.

O bloco alimentação deverá conter todos os componentes necessários para o correto funcionamento do sistema, esta componente do dispositivo deverá cumprir com os requisitos elétricos dos restantes blocos, tais como tensões nominais de funcionamento, a intensidade nominal de corrente elétrica de funcionamento e a intensidade instantânea de corrente elétrica de todo o sistema.

O bloco de controlo e comunicação deverá conter um microcontrolador e os módulos necessários de comunicação sem fios que permitam estabelecer uma ligação com os nós sensores e com a camada superior, sendo que as restrições apresentadas em 3.2 impõem a utilização do módulo SIM800 da SIM-Com. A camada superior será um micro serviço *web*, sendo este acedido através de uma ligação com a *internet*.

O bloco de interfaces deverá conter elementos capazes de fornecer *feedback* visual sobre o estado do coordenador e uma interação física que permita habilitar/desabilitar o modo de aprendizagem deste elemento.

A PCB a desenvolver conterá as componentes acima referidas e deverá ser integrada numa caixa que ofereça um grau de proteção IP67, esta será posteriormente colocada num poste perto da ilha ecológica.

3.5.2 Especificação do Software

O nó coordenador terá três modos de funcionamento: o modo de aprendizagem, o modo de comunicação local e o modo de comunicação com a Internet.

O modo aprendizagem será ativado através de um botão de *learn*, neste modo, o nó coordenador

ficará à espera de mensagens de aprendizagem provenientes de nós sensores. Após a receção de uma mensagem deste tipo, o nó coordenador transmitirá uma mensagem de resposta que valida a agregação do nó sensor à sua rede (se este ainda não se encontrar adicionado) ou validando a remoção (caso este já se encontre agregado). A resposta também poderá negar a aprendizagem, isto é, no caso de o nó coordenador não ser capaz de agregar mais elementos à sua rede ou no caso de uma mensagem recebida possuir sinal fraco. Este processo é ilustrado na figura 26.

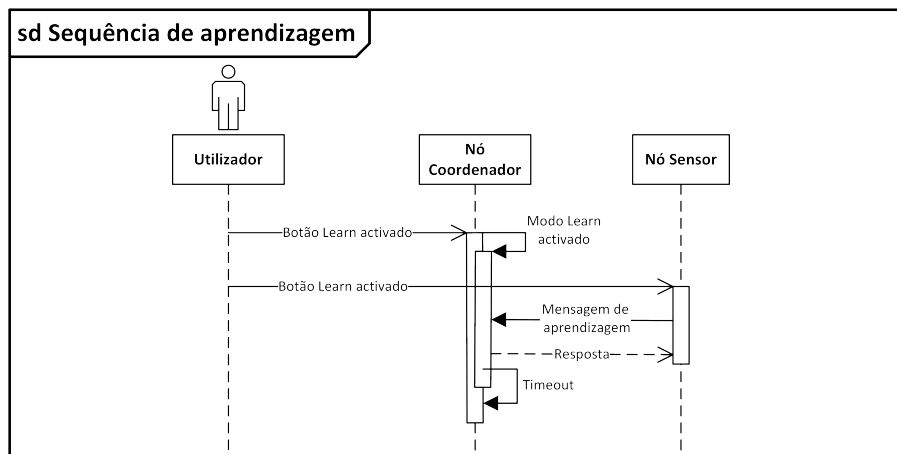


Figura 26: Diagrama de sequência do modo de aprendizagem.

O modo de comunicação local é modo em que o nó coordenador estará disponível para receber as mensagens provenientes dos nós sensores, este será o modo mais constante do nó coordenador uma vez que este deverá encontrar-se disponível para a receção das mesmas. Após a receção das mensagens o nó coordenador poderá transmitir uma mensagem para o nó sensor, que permitirá a modificar o tempo entre leituras do nó sensor. Este processo é ilustrado na figura 27.

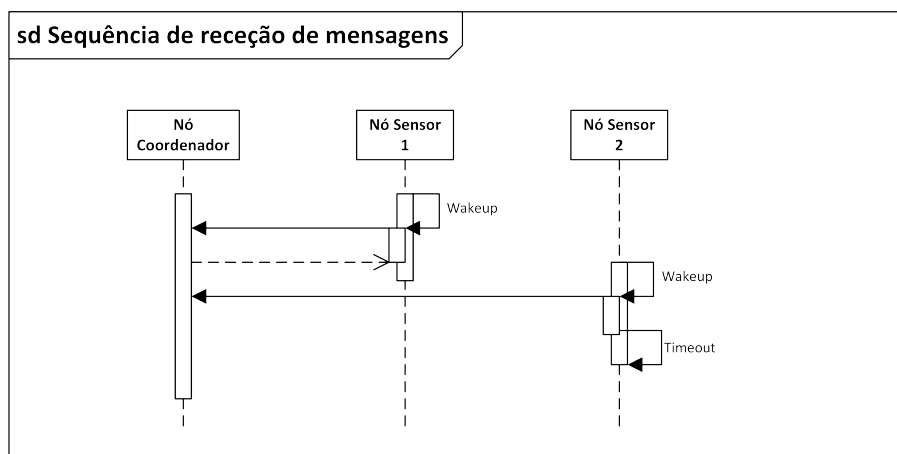


Figura 27: Diagrama de sequência de recepção de mensagens dos nós sensores.

O modo de comunicação com a *Internet* é o estado em que o nó coordenador transmitirá para o micro serviço *web* os dados da sua rede de sensores sem fios. Nesta comunicação será enviada para a camada superior os identificadores dos nós sensores, a informação de enchimento destes, os tipos de contentores e o ultimo tempo de receção de dados. Nesta fase também poderão ser modificados os parâmetros de funcionamento do coordenador como a periodicidade de ligação à *Internet* e o tempo entre leituras dos nós sensores. Durante a execução deste estado, o módulo de comunicação com a *Internet* é ativado no inicio e desativado no fim, uma vez que esta comunicação ocorre periodicamente, não é necessário que este módulo esteja constantemente ligado, reduzindo assim o consumo energético proveniente deste módulo.

É esperado que o nó coordenador seja capaz de criar uma rede sem fios, e através desta comunicar com os nós sensores, obtendo assim o nível de enchimento dos contentores. A informação recolhida será enviada periodicamente para um micro serviço *web* através da *Internet* recorrendo ao SIM800.

3.6 Especificação do Micro Serviço Web

É esperado que os nós coordenadores do sistema comuniquem através da internet com um micro serviço *web*. Tendo em consideração os requisitos funcionais do sistema e o âmbito técnico em que este se insere optou-se por utilizar um *broker* MQTT como o micro serviço *web*. Não estando previsto o desenvolvimento de um no decorrer da dissertação, será utilizado para efeitos de teste o *broker* Eclipse Mosquitto que implementa a versão 3.1.1 do protocolo MQTT e um cliente de teste através do programa MQTT Explorer [35].

3.6.1 Tópicos MQTT

Uma vez que esta topologia de comunicação é baseada num modelo de publicações e subscrições de tópicos, é necessário definir a estruturação destes. Deverá existir um tópico raiz seguido de um identificador único do dispositivo, dentro deste estarão 3 tópicos:

- Tópico *connection_rate*: Configuração do intervalo entre ligações de um nó coordenador ao *broker* MQTT. Este tópico será do tipo *retained*;
- Tópico *read_rate*: Configuração do intervalo de leituras dos nós sensores associados a um nó coordenador. Este tópico será do tipo *retained*;

- Tópico *reads*: Tópico de transmissões de leituras dos nós sensores associados a um nó coordenador.

A figura 28 ilustra as publicações e subscrições do nó coordenador e do cliente de teste.

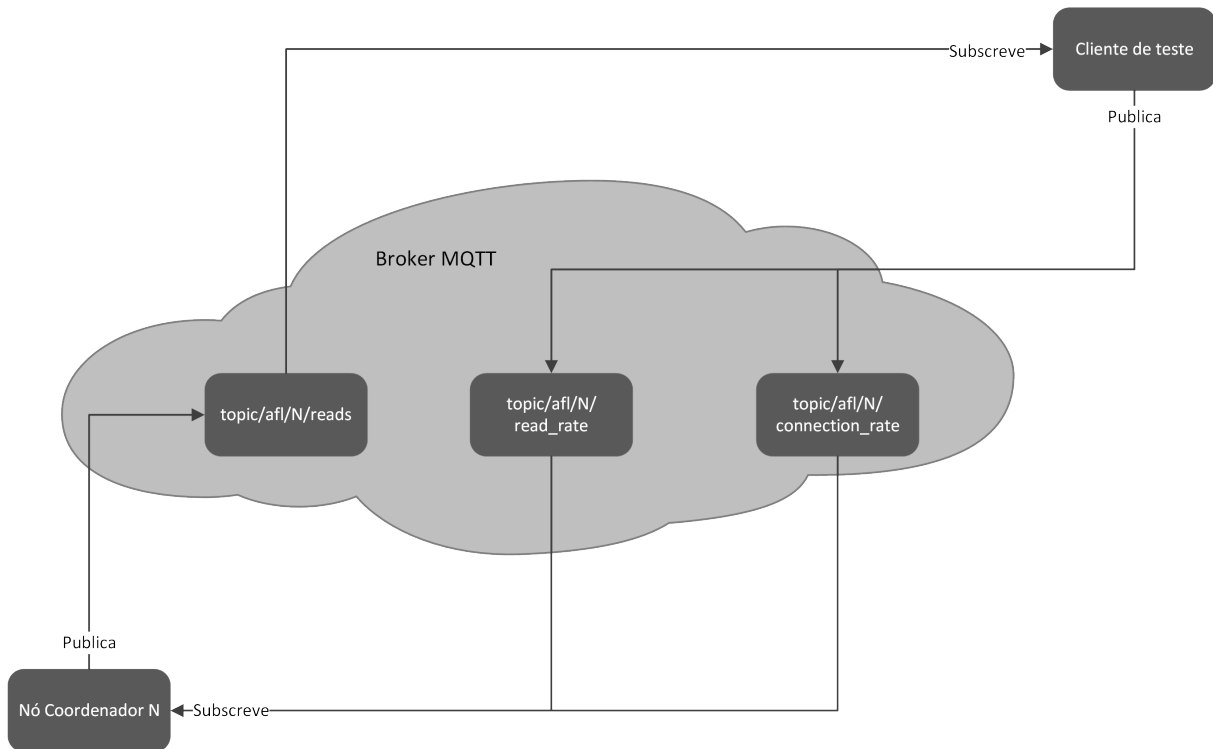


Figura 28: Interação com o broker MQTT.

Desenvolvimento do Sistema

Neste capítulo são detalhados os componentes a utilizar no dispositivo do nó sensor e no dispositivo nó coordenador, tendo como base as especificações apresentadas no capítulo anterior.

4.1 Desenvolvimento do Nó Sensor

O nó sensor, é o dispositivo que estará colocado dentro do contentor, na parte superior deste, e é responsável pela aquisição do nível de enchimento do contentor. Neste módulo, estão implementados os circuitos responsáveis pela ativação do sensor, o circuito de alimentação e o sistema de comunicação sem fios baseado em tecnologia EnOcean, sendo este último um requisito tecnológico.

4.1.1 Sensor

O sensor é o dispositivo responsável pela aquisição do nível de enchimento do contentor, este será ativado sempre que for necessário adquirir uma nova leitura e desactivado após a obtenção de nível de enchimento, reduzindo assim o seu consumo energético. Relembrando as especificações definidas para o sensor no capítulo anterior, executou-se um estudo de mercado da MaxBotix para a escolha do sensor. Esta pesquisa baseou-se no requisito da proteção IP67 diferentes saídas e uma distância de leitura igual ou superior a cinco metros.

Tendo em consideração a tabela 9 que resume a pesquisa efetuada escolheu-se o sensor MaxBotix MB7072-100 (figura 29), pelo seu custo/benefício e pela sua frequência de leitura ser superior garantindo que este está ativo durante menos tempo refletindo num consumo médio inferior ao MB7360 e MB7589 quando o tempo de arranque e de três leituras é considerado.

Este possui uma gama de tensão de alimentação entre os 3 V e 5,5 V contínuos, um ângulo projeção

Tabela 9: Estudo de mercado dos sensores de ultrassons.

	MaxBotix MB7589-100	MaxBotix MB7360-100	MaxBotix MB7072-100
Distância Mínima (cm)	30	30	20
Distância Máxima (cm)	500	500	765
Frequência de leitura (Hz)	0,55	7,5	10
Ângulo Acústico(°)	11	11	11
Resolução (mm)	1	1	10
Corrente Média (mA)	68	2,9	3,4
Tensão de Funcionamento (V)	2,7 a 5,5	2,7 a 5,5	3 a 5
Preço (\$)	110,2	83,6	75,9

acústica de 11°, uma gama de leitura de 20 cm a 765 cm, rejeição de ruído, uma gama de temperatura de operação de -40 °C a +85 °C e calibração automática [36].

O sensor escolhido tem um custo de 90,44 € para uma unidade e um preço de 62,46 € para quantidades superiores a 100 unidades.



Figura 29: Sensor de ultrassons MaxBotix MB7072.

Este sensor possui duas entradas digitais, a primeira (pino 1) determina o funcionamento da saída digital do pino 5, caso o pino 1 se encontre com o nível lógico alto ou em aberto, a saída digital irá funcionar como uma saída série, caso o pino 1 esteja no nível lógico baixo, o pino 5 irá transmitir um pulso que pode servir para a ativação de outro sensor. A segunda entrada (pino 4) possui a funcionalidade de desativar a medição do sensor reduzindo o consumo do sensor, esta funcionalidade está ativa quando o pino se encontra com o valor lógico baixo.

Este sensor possui três saídas sendo duas delas analógicas e uma digital. A saída digital (pino 5) é baseada no protocolo série RS232 assíncrono (com o nível lógico baixo a 0V e o nível lógico alto à tensão de alimentação), a trama enviada é constituída pelo carácter *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) R, seguido dos dígitos ASCII que representam o valor da distância em centímetros terminando com o símbolo ASCII de *carriage return*. Esta transmissão de dados é executada com um *baudrate* de 9600, 8 bits, sem paridade e com um *stop bit*. A primeira saída analógica (pino 2) envia

um envelope analógico que representa o retorno acústico do sinal transmitido, este sinal tem uma escala temporal de 58 μs por centímetro e a amplitude representa o retorno acústico. A segunda saída analógica (pino 3) envia o valor da leitura em tensão que pode ser convertido para centímetros através da fórmula 4.1.

$$Distância_{(Leitura)}(cm) = \frac{Leitura(mV) * 1024}{V_{cc}(mV)} \quad (4.1)$$

4.1.1.1 Circuito de ativação do sensor

A nível energético, este sensor para uma tensão de alimentação de 3,3 V consome 2,1 mA de corrente média e 50 mA de corrente de pico, já para uma tensão de alimentação de 5 V os valores são de 3,4 mA e 100 mA respetivamente.

O sensor MaxBotix MB7072-100, como já mencionado, possui um modo de funcionamento que desabilita a funcionalidade de medição reduzindo o seu consumo médio, no entanto o seu consumo nesse modo não se enquadra num valor de *ultra low power*, sendo necessário a implementação de um circuito que permita ativação e desativação do fornecimento de energia ao sensor, reduzindo drasticamente o consumo deste quando a sua funcionalidade principal não é necessária. O circuito desenhado (figura 30) implementa funcionalidade pretendida, habilitando o fornecimento de energia ao sensor (através da saída SensorVCC) quando a entrada Sensor_Enable possui o nível lógico alto, e desabilita quando a entrada possui o nível lógico baixo. O circuito integrado NX3008CBK da Nexperia integra um MOSFET do tipo P e outro do tipo N num *package* de dimensões reduzidas, estes MOSFETS apresentam uma corrente de fuga de 1 μA e uma corrente de condução máxima de 200 mA.

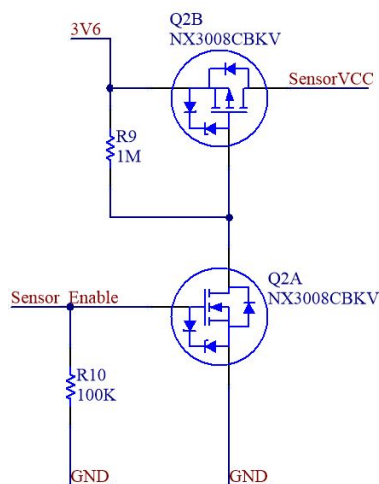


Figura 30: Circuito de ativação do sensor.

4.1.2 Módulo de Comunicação e de Processamento

O microcontrolador é o dispositivo que irá recolher periodicamente o valor da leitura e transmiti-la através de um módulo que possua tecnologia de comunicação sem fios EnOcean. O microcontrolador a escolher, atendendo as funcionalidades pretendidas, deverá deter uma arquitetura de 8 bits, possuir características *low power*, conter um *Analog to Digital Converter (ADC)* com dois canais, uma *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)* e alguns pinos de *General Purpose Input/Output (GPIO)*.

O módulo de comunicação será o dispositivo encarregue da comunicação sem fios utilizando tecnologia ERP da EnOcean na gama dos 868,3 MHz. A tabela 10 demonstra os dispositivos que a EnOcean tem actualmente no mercado.

Tabela 10: Estudo de mercado dos módulos de comunicação EnOcean.

	STM 300	TCM 300	TCM 310	TCM 515
Funcionalidade	<i>Sensor Node</i>	<i>Line powered</i>	<i>Gateway</i>	<i>Gateway</i>
Corrente de <i>Sleep</i> (uA)	0,3	0,3	0,3	50
Programável	Sim	Sim	Não	Não
<i>Energy Harvesting</i>	Sim	Não	Não	Não
Preço (€)	21,25	18,26	9,26	10,56

Os dispositivos EnOcean apresentados têm diferentes aplicações que possibilitam duas abordagens, uma em que um módulo *gateway* é utilizado juntamente com um microcontrolador e outra em que apenas um módulo programável é utilizado. A tabela 11 demonstra as vantagens e desvantagens das duas abordagens.

Tabela 11: Comparação da utilização de um módulo programável EnOcean com módulo *gateway* EnOcean e microcontrolador.

	Módulo Programável	Módulo Gateway
Custo	-	+
Flexibilidade de programação	-	+
Consumo Energético	+	-
Componentes	+	-
Espaço	+	-

Os módulos *gateway* custam cerca de metade do preço dos programáveis (sendo que um microcontrolador de 8 bits comum não custa mais de 2 €) e possuem a vantagem da flexibilidade de programação

através do microcontrolador auxiliar, uma vez que os restantes módulos da EnOcean têm de ser programados utilizando a biblioteca Dolphin API que oferece uma camada de abstração ao *chip* contido nos módulos EnOcean, sendo esta disponibilizada no formato de biblioteca pré-compilada. Os módulos programáveis apresentam um consumo energético muito inferior ao módulo *gateway* TCM515, cerca de 250 vezes inferior e o módulo TCM 310 apresenta um consumo superior de 1,5 vezes ao do STM 300 [37, 38]. A abordagem do módulo *gateway* irá exigir mais componentes como o microcontrolador necessário para esta abordagem, condensadores, uma pilha com mais capacidade, tendo também como consequência o aumento da área que estes componentes irão ocupar na PCB.

Atendendo às vantagens e desvantagens das duas abordagens apresentadas, conclui-se que abordagem que utiliza módulos detentores da funcionalidade *gateway* não se enquadra para a finalidade do nó sensor, sendo a principal desvantagem o consumo energético bastante superior à outra abordagem. A implementação escolhida é a que utiliza apenas um módulo programável da EnOcean. O STM 300 e TCM 300 apresentam o mesmo consumo energético, no entanto, o módulo STM 300 foi desenvolvido para uma aplicação de nó sensor, enquanto que o TCM 300 foi desenvolvido para uma aplicação que possui alimentação contínua. Considerando este último ponto, o módulo escolhido é o EnOcean STM 300 (figura 31).



Figura 31: Módulo EnOcean STM 300.

Este módulo possui um *Central Processing Unit* (CPU) 8051 com um oscilador interno de 16 MHz, 32 kB de memória FLASH e 2 kB de memória *Static Random-Access Memory* (SRAM). O EnOcean STM 300 para além de um periférico de radio frequência contém duas entradas com funcionalidades de *wake-up*, 14 pinos que podem ser configurados como entradas ou saídas, um ADC de 10 *bits* com três canais, um periférico de UART, um periférico de *Serial Peripheral Interface* (SPI) e um periférico de PWM.

4.1.3 Entradas e Saídas do Microcontrolador

Seleção do Tipo de Contentor

O nó sensor pode ser inserido em contentores que possuem diferentes tipos de resíduos (como o papel, o vidro ou resíduos indiferenciados), sendo necessário ser identificado qual o tipo que este está a monitorizar, uma vez que certos camiões só recolhem um tipo de resíduos. Desta forma inseriu-se um seletor que contém três interruptores possibilitando a utilização de oito identificadores, a tabela 12 relaciona o tipo de contentor com o valor e o respetivo posicionamento do interruptor.

Tabela 12: Identificadores do tipo de contentor.

	Valor	Sel1	Sel2	Sel3
Cartão	0	0	0	0
Plástico	1	0	0	1
Vidro	2	0	1	0
Indiferenciado	3	0	1	1
Orgânicos	4	1	0	0

O circuito desenhado para a seleção deste valor (figura 32(a)) é alimentado através da ativação do pino de output DVDD do STM300 que habilita/desabilita o fornecimento de energia sempre que o microcontrolador entra/sai de um estado de baixo consumo.

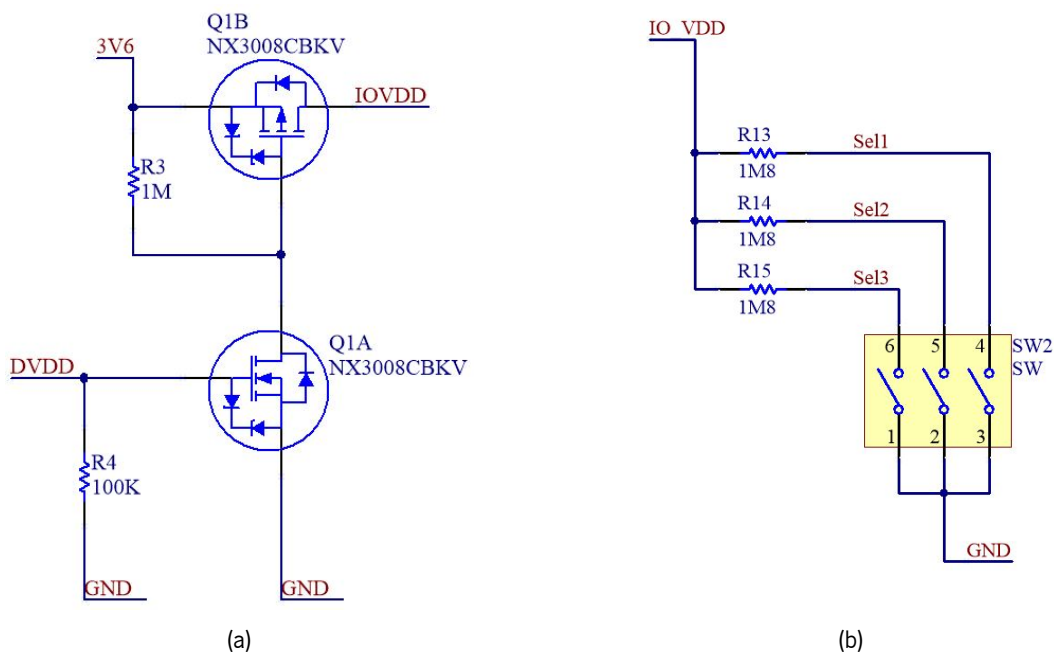


Figura 32: Circuito de fornecimento de energia aos inputs/outputs (a) e circuito de seleção do tipo de contentor (b)

Botão de Learn In

O nó sensor possuirá um botão de pressão que o executa o processo de *learn in* ou de *learn out*, sendo que este deverá ocorrer independentemente do estado do sensor, para isso é necessário utilizar a entrada WAKE1 (*Learn*) do microcontrolador que permite que este seja acordado através de uma transição descendente no seu nível lógico, porém como esta está associada ao módulo de *ultra low power* do microcontrolador, é necessário utilizar o output UVDD do microcontrolador que fornece uma tensão de 1,8V para ser utilizada nos pinos do módulo de *ultra low power*. A figura 33 ilustra o circuito implementado.

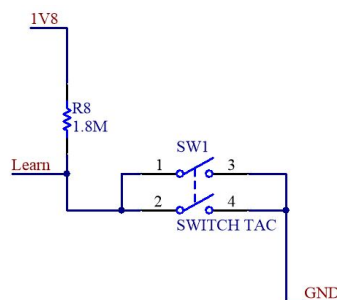


Figura 33: Circuito de ativação do processo *Learn*.

Interfaces com o sensor

O sensor MaxBotix MB7072-100 possui três saídas das quais duas são analógicas, no entanto o ADC do microcontrolador STM300 só consegue converter valores analógicos de 0 V até 1,8 V. Por esse motivo, recorreu-se a um divisor de tensão resistivo com uma razão de transformação de 0,5. Quanto à saída digital, esta vem no formato série RS232 (com níveis lógicos de 0 V a VCC) é necessário convertê-la, uma vez que o microcontrolador não consegue interpretar o formato série RS232. Recorreu-se a uma porta lógica do tipo NOT (figura 34), convertendo assim o formato RS232 para o formato série TTL que pode ser interpretado pelo STM300.

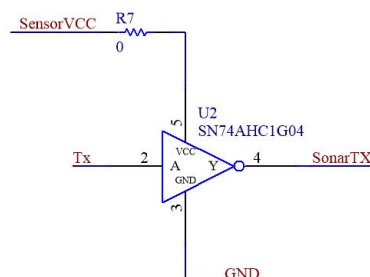


Figura 34: Circuito de conversão do formato série RS232 para o formato série TTL.

4.1.4 Sistema de Alimentação

O circuito de alimentação é responsável por fornecer a energia elétrica aos restantes componentes tendo em consideração as tensões nominais de funcionamento, as correntes elétricas de pico e a corrente nominal de funcionamento. O microcontrolador e o sensor são os elementos mais sensíveis às variações que podem surgir na alimentação, o dimensionamento incorreto do componente de fornecimento de energia elétrica poderá levar a comportamentos instáveis destes componentes eletrónicos, resultando em leituras erradas e falhas de transmissão de pacotes ERP. A tabela 13 agrega as principais características elétricas nominais dos dois componentes segundo os seus documentos técnicos.

Tabela 13: Requisitos elétricos do microcontrolador e do sensor.

	STM 300	MB7072
Gama de tensão de alimentação (V)	2,6 a 4,5	3 a 5,5
Corrente de pico (mA)	43	50 @ 3,3 V 100 @ 5 V
Corrente média (mA)	1	2.1 @ 3,3 V 3.1 @ 5 V
Corrente em sleep (nA)	200	20

A gama de tensão de alimentação para o correto funcionamento dos componentes apresentados encontra-se entre os 3 V e os 4,5 V. O sistema de alimentação deverá ter a capacidade de fornecer as correntes de pico, sendo que a corrente de pico máxima é a soma da corrente de pico do sensor e da corrente de média do microcontrolador. Uma vez que o pico deste só ocorre quando a uma transmissão é executada e esta nunca ocorre quando o sensor está ligado (o pico de corrente do sensor ocorre quando se dá transmissão do pulso sónico), a corrente de pico do sistema é de 51 mA para 3,3 V.

O sistema de alimentação será composto por uma bateria primária (pilha) e um ou vários condensadores, estes últimos terão a funcionalidade de fornecer a resposta aos transientes de corrente uma vez que as pilhas primárias desenvolvidas para aplicações de *ultra low power* não possuem essa capacidade.

Tendo em consideração os requisitos e as especificações foi executado um estudo de mercado de baterias primárias, como se pode verificar pela tabela 14.

A bateria selecionada é a LS17500 da Saft Batteries (figura 35 (a)), que apesar de apresentar um custo superior às restantes, é a que possui maior capacidade nominal e certificação RoHS sendo desenvolvida para aplicações que possam atingir mais de 20 anos de duração uma vez que apresenta taxas de *self discharge rate* inferiores a 1 % a uma temperatura de 20 °C [39]. Esta bateria primária tem maior capacidade corrente contínua máxima em comparação com as restantes.

Tabela 14: Estudo de mercado de baterias primárias.

	EVE ER17505	Tadiran SL-860/S	Saft LS17500	Saft LS17500-20F
Tensão Nominal (V)	3,6	3,6	3,6	3,6
Capacidade Nominal (Ah)	3,6	2,4	3,6	3,6
Corrente contínua máxima (mA)	130	60	100	100
Corrente de pico (A)	0,18	0,12	0,25	1
Tempo de vida (Anos)	10	10	5 a 20+	5 a 10
Preço (€)	6,9	5,5	9,5	NA
Certificado RoHS	Não	Sim	Sim	Sim



(a)



(b)

Figura 35: Bateria primária LS17500 (a) e bateria híbrida LSP17500-20F (b) da Saft Batteries.

A tabela conta ainda com a presença da bateria híbrida LS17500-20F (figura 35 (b)) que é constituída por uma bateria primária (Saft LS17500) e um condensador de iões de lítio de 20 Farads ligados em paralelo, porém esta ainda não se encontra disponível no mercado, pelo o que não é possível adquiri-la. O condensador que esta possui auxilia na capacidade de fornecer correntes de pico com o compromisso da diminuição do tempo de vida, uma vez que aumenta a taxa de *self discharge*.

O sistema de alimentação será composto pela a bateria primária LS17500 e por condensadores de estabilização necessários para o correto funcionamento dos dispositivos. A bateria selecionada apresenta uma tensão estável ao longo da sua vida, sendo que o valor desta só decai quando esta perde grande parte da sua capacidade, sendo assim, não há necessidade de inserir reguladores de tensão uma vez que todos os componentes suportam a tensão nominal fornecida pela bateria primária Saft LS17500.

4.1.5 Invólucro do nó sensor

A eletrônica do nó sensor deverá estar protegida por um invólucro que garanta os níveis de estanquidade IP67, o mesmo do sensor escolhido. A PCB será desenhada com as dimensões necessárias para que seja contida dentro da caixa selecionada. A caixa escolhida é a Hammond 1554B2 (figura 36) que apresenta dimensões de 65x65x40 mm³, certificação RoHS e proteção IP67, conta ainda com furação na parte traseira que permite, assim, a sua fixação.



Figura 36: Caixa Hammond 1554B2.

4.1.6 Nó Sensor

Atendendo aos circuitos eletrônicos e os vários elementos apresentados procedeu-se ao desenho de componentes e de esquemáticos através do programa Altium Designer. Recorrendo a estes desenhou-se a placa de circuito impresso do nó sensor (figura 37(a)) culminando na produção placa da figura 37(b). Os esquemáticos da placa do nó sensor podem ser visualizados no anexo I.

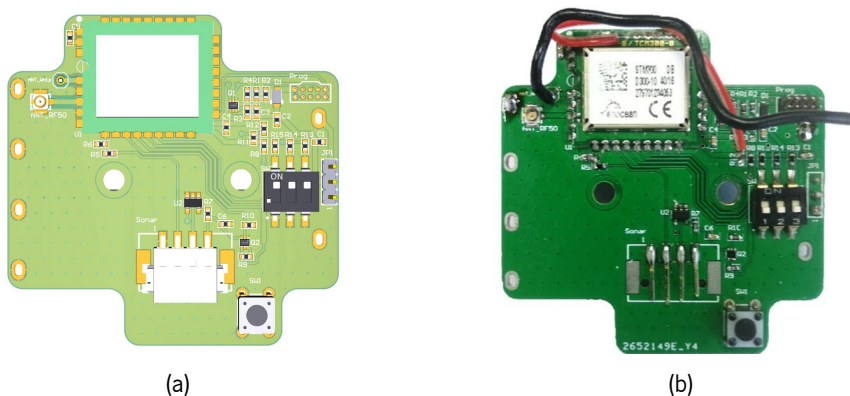


Figura 37: Virtualização da placa de circuito impresso do nó sensor (a) e placa de circuito impresso do nó sensor (b).

Após a montagem da PCB (37(b)) procedeu-se à montagem do nó sensor resultando no dispositivo da figura 38, tendo sido necessário colocar um espaçador para que o sensor não batesse na PCB do nó sensor.



Figura 38: Nó Sensor.

4.1.7 Telegrama Transmitido

O nó sensor após o seu ciclo de leitura transmitirá um telegrama Enocean, este telegrama será transmitido com o RORG 4BS do *EnOcean Equipment Profile* que contém quatro *bytes* de informação, nos quais serão contidos os seguintes dados:

- Estado - Este dado ocupará 1 byte e representará uma informação de estado (tabela 16);
- Valor de RSSI do último telegrama recebido - Este dado ocupa 8 bits, possuindo valores de 0 a 255, sendo que o valor 255 representa que ainda não recebeu um telegrama. Os valores transmitidos correspondem ao valor negativo de RSSI;
- Ciclo de medição - Este dado ocupará 3 bits e representará o tempo de leituras (tabela 15), o valor *default* é o correspondente a uma hora;
- Tipo de contentor - Este dado ocupará 3 bits e representará o tipo de contentor de acordo com os valores da tabela 12;

- Valor da medição - Este dado ocupará 10 bits, possuindo valores de 0 a 765 centímetros, sendo que o valor 0 representa uma leitura inválida.

A organização dos dados encontra-se ilustrada na figura 39.

Tabela 15: Descrição do valor do campo Ciclo.

Valor	Descrição
0x00	Periodicidade de 1 minuto
0x01	Periodicidade de 5 minutos
0x02	Periodicidade de 15 minutos
0x03	Periodicidade de 30 minutos
0x04	Periodicidade de 1 horas
0x05	Periodicidade de 2 horas
0x06	Periodicidade de 4 horas
0x07	Periodicidade de 8 horas

Tabela 16: Descrição do valor do campo Estado

Valor	Descrição
0x01	<i>Learned in, acknowledge</i> no primeiro <i>ack</i>
0x02	<i>Learned in, acknowledge</i> no segundo <i>ack</i>
0x03	<i>Learned in, acknowledge</i> no terceiro <i>ack</i>
0x04	<i>Learned in, falha no reclaim</i>
0x05	<i>Learned in, mailbox vazia</i>
0xDD	<i>Learned out, Botão de learn-in</i> pressionado
0xEE	<i>Learned out, watchdog reset</i>
0xFF	Arranque do nó sensor, primeiro telegrama

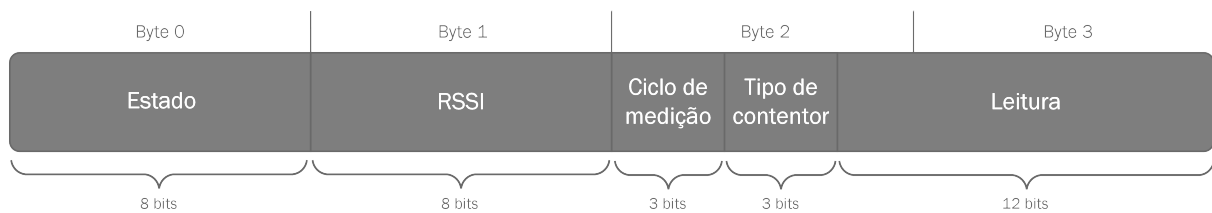


Figura 39: Organização de dados do telegrama 4BS transmitido.

4.1.8 System Stack

O *system stack* visa ilustrar a ligação entre as três camadas existentes do sistema: *hardware*, *software* e aplicação.

Na camada do *hardware* estão presentes todos os elementos que interagem diretamente com a aplicação através de recursos presentes na camada *software*. Os elementos que a constituem são o microcontrolador, o sensor e os pinos de GPIO, nomeadamente o selector, o botão de *learn* e o *enable* do sensor. O sensor comunica com o STM300 através da porta série, sendo necessário a utilização desse periférico no STM300, assim como a utilização dos pinos de GPIO que interagem com o seletor e o botão. Nesta camada ainda é utilizado o periférico de rádio presente no STM300 para executar a comunicação.

Na camada *software* domina a EnOcean API que é a interface disponibilizada pela EnOcean para aceder a todas as funcionalidades do microcontrolador.

Na camada aplicação contém as rotinas necessárias para a aquisição de dados, comunicação e gestão energética que são fundamentais para o bom funcionamento do dispositivo. O esquema de cores presente na figura 40 associa o hardware com as rotinas utilizadas na aplicação.

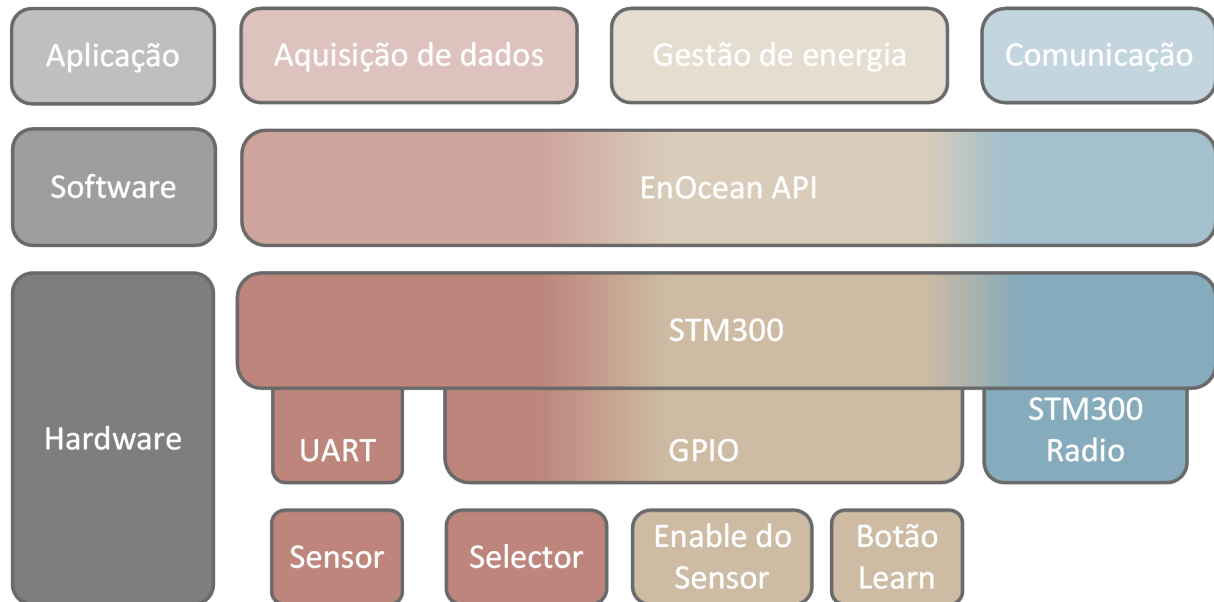


Figura 40: System Stack do nó sensor.

4.1.9 Software

O software do nó sensor foi desenvolvido no programa Keil uVision5 com a toolchain C51 (como recomendado pela EnOcean), uma vez que o chip Dolphin contido no STM 300 é baseado no 8051. Para a geração da biblioteca EnOcean foi utilizado o DolphinStudio que gera os ficheiros necessários para utilizar as funcionalidades do STM 300. A programação é executada através de uma placa contida no EDK 300.

4.1.9.1 Fluxo Principal

Após o arranque do nó sensor, o sistema é inicializado garantindo o correto funcionamento do STM 300, é ainda executado uma leitura a uma memória não volátil onde o ID do controlador da rede EnOcean se encontra gravado. Este em seguida verifica o motivo do seu *wake up*, podendo este ser uma falha na alimentação, um *watchdog reset*, ou uma ativação do modo learn, no caso das últimas duas a flag *reclaim* é ativada. O processo de *reclaim* é executado de acordo com o estado da flag *reclaim*. Após este passo,

o módulo entra no modo sleep, fazendo *reset* ao sistema quando este despoleta um *wake-up*. Este fluxo encontra-se ilustrado no fluxograma da figura 41.

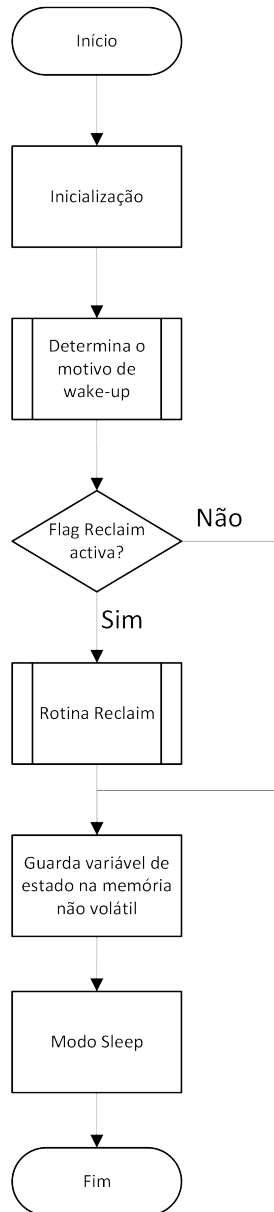


Figura 41: Fluxograma do ciclo principal do nó sensor.

4.1.9.2 Determinação do *wake up*

Este sub-processo verifica o motivo do nó sensor ter acordado, no caso de ser um *power on reset* (VDD Reset) este aguarda dez segundos de forma a carregar os elementos capacitivos do nó sensor, modifica o estado para 0xFF e transmite o telegrama de dados, fazendo um ciclo de leitura.

Se o dispositivo é acordado através da entrada do botão Learn, este envia um telegrama SmartACK Learn Request, ativando posteriormente a flag *reclaim*.

Se o dispositivo acordar através do *overflow* do *watchdog*, este verifica se o sensor está associado a uma rede EnOcean (através do ID do controlador guardado na memória não volátil) caso esteja, este ativa a flag *reclaim* e transmite o telegrama de dados. Caso o nó sensor não esteja associado a uma rede EnOcean este desativa a flag *reclaim*, modifica o estado para o valor 0xEE e transmite o telegrama de dados.

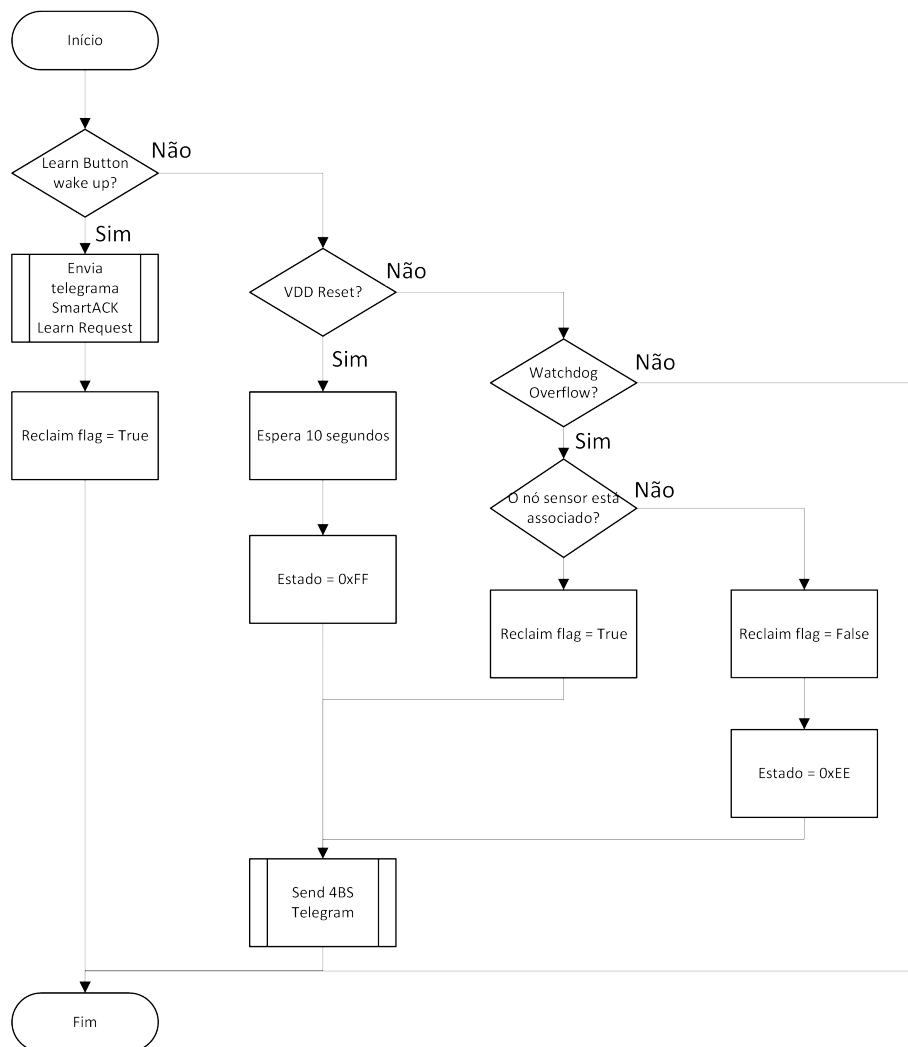


Figura 42: Fluxograma do sub-processo de *wake up* do nó sensor.

4.1.9.3 Rotina de *reclaim*

Este sub-processo é executado quando a *flag reclaim* se encontra ativa, esta rotina aguarda o tempo de *reclaim* (previamente definido através do processo *learn* ou do valor máximo quando este não se

encontra associado) enviando posteriormente o telegrama de *reclaim*. Após a recepção de um telegrama, este só é processado se for do tipo SmartAck ou do tipo 1BS. Quando é tipo 1BS este é processado sendo extraído o novo tempo entre ciclos de leitura. No caso de o telegrama recebido ser do tipo SmartAck este processa-o podendo resultar num processo de *learn-in* ou de *learn out*.

Se não existir nenhuma resposta por parte do coordenador após três tentativas o nó sensor sai deste processo indicando, através do seu estado, que não houve resposta ao *reclaim* após três tentativas, sendo este estado transmitido no próximo telegrama.

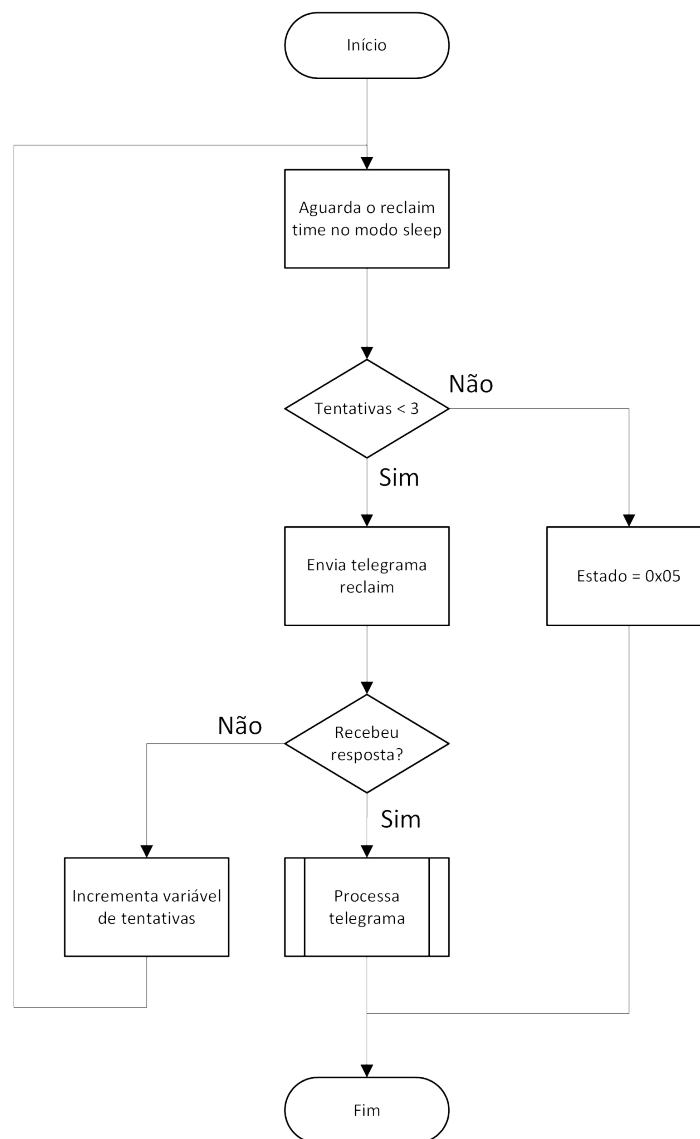


Figura 43: Fluxograma do sub-processo de *reclaim* do nó sensor.

4.2 Desenvolvimento do Nó Coordenador

O nó coordenador é o dispositivo que estará instalado fora do contentor, perto da ilha ecológica, e é responsável pela comunicação com os nós sensores e a posterior comunicação com o micro serviço *web*. Neste módulo, estão implementados os circuitos responsáveis pelo *energy harvesting*, o circuito de carregamento da bateria, circuito de alimentação e respetivos módulos de comunicação, sendo um deles baseado em tecnologia EnOcean de forma a comunicar com os nós sensores. Um microcontrolador dotado de tecnologia Arm está encarregue de gerir as comunicações provenientes da rede de nós sensores e do micro serviço *web*.

4.2.1 Gateway EnOcean

O *Gateway* é o dispositivo que estará encarregue da interface entre o microcontrolador e a rede EnOcean. Relembrando a tabela 10, apesar do STM 300 e do TCM 300 serem capazes de fazer de *gateway* sendo necessário programá-los para alcançar essa funcionalidade, acabam por ser mais dispendiosos que os módulos dedicados a essa funcionalidade, o TCM 310 e TCM 515. A tabela 17 compara as características dos dois módulos.

Tabela 17: Comparação entre os módulos gateway EnOcean TCM 310 e TCM 515.

	TCM 310	TCM 515
Frequência (MHz)	868,3 (ASK)	868,3 (ASK)
Data rate (kbps)	125	125
<i>Receiver sensitivity</i> (dBm)	-96	-92
Potência de transmissão (dBm)	+3	+10
Interface série	UART	UART
Protocolo série	ESP3	ESP3
Gama de tensão de funcionamento (V)	2,6 a 4,5	2 a 3,6
Consumo de corrente em modo RX (mA)	24	25
Consumo de corrente em modo TX (mA)	33	25
Consumo de corrente em modo sleep (uA)	0,3	50
Gama de temperatura de funcionamento (°C)	-25 a 85	-40 a 85
Dimensões (mm ³)	22 x 19 x 3	19 x 14,7 x 3
Custo (€)	9,26	10,56

O módulo TCM 515 é uma atualização do módulo TCM 310 apresentando assim melhores características funcionais relativamente ao outro módulo, porém, na altura do desenvolvimento o TCM 515 ainda não se encontrava disponível no mercado, sendo que a escolha do módulo *gateway* a utilizar recaiu para TCM 310. Esta escolha em termos de interface de comunicação não apresenta alterações uma vez que

a especificação do protocolo série utilizado é o mesmo, no entanto, as dimensões e respetivo *footprint* variam, implicando que a placa de circuito impresso seja redesenhada para acomodar um módulo TCM 515 [37]. A nível de consumo energético o TCM 515 apenas supera na transmissão, sendo que na receção a diferença é de 1 mA, no modo *sleep* o TCM 310 supera o seu sucessor, isto deve-se ao facto de TCM310 entrar num modo de *deep sleep* em que este acorda após o tempo determinado pelo comando ESP que este recebeu, enquanto que o TCM 515 possui a funcionalidade de acordar através da receção de comandos ESP, sendo que esta funcionalidade acarreta consumos uma vez que o periférico da porta série necessita de estar ativo [38].

4.2.2 SIM800L

Este módulo será responsável pela interface de comunicação entre o microcontrolador e o micro serviço *web*, deverá ser de pequenas dimensões e ter uma interface série. O módulo SIM800L (figura 44) da SIMCOM, é um dispositivo 2G (GSM/*General Packet Radio Service* (GPRS)), que funciona nas frequências GSM 850MHz, EGSM 900 MHz, DCS 1800 MHz and PCS 1900 MHz. Este apresenta uma tensão nominal de funcionamento de 5 V e um consumo em *sleep* de 0,7 mA, durante a transmissão GSM este dispositivo atinge correntes de pico de 2 A durante 557 μ s, possuindo um consumo médio de 350 mA [40]. O preço do SIM800L é inferior a 5 €.

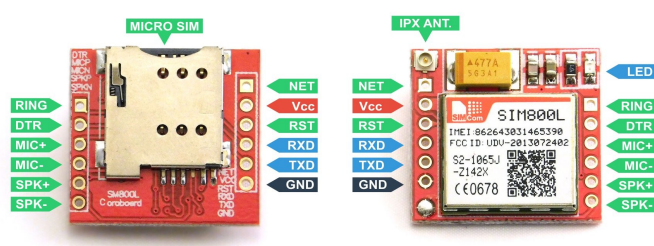


Figura 44: Módulo GSM SIM800L da SIMCOM.

Este módulo comunicará com o microcontrolador através de comunicação série a 115200 bps, 8 bits, 1 stop bit e sem paridade, sendo utilizado os comandos AT necessários para o correto funcionamento do dispositivo [41].

4.2.3 Microcontrolador

O microcontrolador, como referido anteriormente, deverá possuir tecnologia ARM, ser do segmento de baixo consumo e deter pelo menos duas UARTs. Atendendo a estas características verificou-se a oferta da

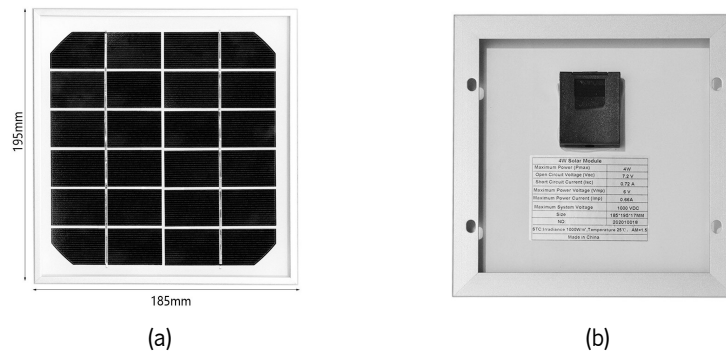


Figura 46: Vista frontal do painel solar (a) e vista traseira do painel solar (b).

O painel solar não fornece uma potência constante ao longo tempo, uma vez que existem variações da irradiância solar, sendo portanto necessário a implementação de um circuito que consiga extrair a potência máxima disponível do painel solar consoante a radiação a que este está sujeito recorrendo a técnicas de MPPC ou *Maximum Power Point Track* (MPPT) [45]. A irradiância solar varia consoante o ano, sendo esta influenciada por diversas variáveis como o tempo atmosférico, a região, o dia e mês do ano. Foi necessário recorrer-se à base de dados *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) que agrega estas variáveis, possuindo uma ferramenta que permite calcular a potência gerada por um determinado painel solar ao longo de um ano [46].

Foi necessário parametrizar esta ferramenta como se pode ver pela figura 47, tendo sido utilizada a localização do pólo de Azurém da Universidade do Minho, foi ainda ativada a opção de otimização do ângulo de inclinação e do azimute, resultando num grau de inclinação de 35° e num azimute de 3° .

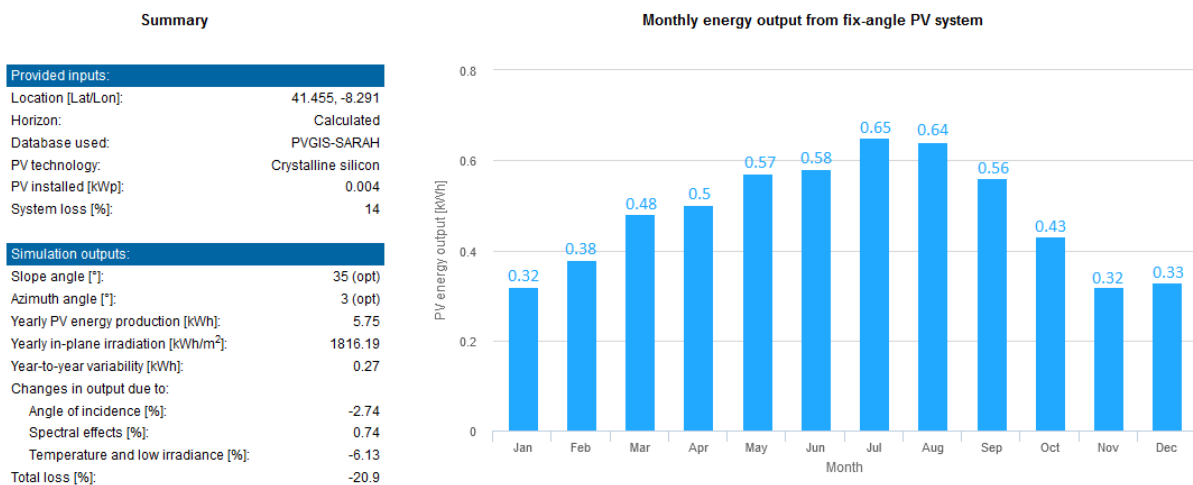


Figura 47: Energia mensal fornecida pelo painel solar escolhido.

O painel solar escolhido, segundo a PVGIS, consegue extrair 320 Wh no seu pior mês resultando

numa energia diária de 10,6 Wh, já no seu melhor mês este extrai uma energia de 650 Wh resultando numa energia diária de 20,9 Wh. Estas energias já contemplam um fator de perda de 14 %.

4.2.4.2 Conversor CC-CC

A tensão de saída pretendida deste circuito é de 5 V e o painel solar pode variar a tensão de saída acima ou abaixo deste valor, com esta restrição o circuito conversor *Continuous Current to Continuous Current* (CC-CC) a implementar será do tipo *buck-boost*. Fez-se um estudo de mercado (que se encontra na tabela 18) de conversores deste tipo de conversores da Analog Devices.

Tabela 18: Estudo de Conversores CC-CC do tipo *buck-boost* da Analog Devices.

	LTC3130	LTC4121-4.2	LTC3129
Gama de tensão de entrada (V)	2,4 a 25	4,4 a 40	2,5 a 15
Gama de tensão de saída (V)	1 a 25	4,2	1,4 a 15,75
Corrente máxima de saída (A)	0,6	0,4	0,2
Funcionalidade MPPC/MPPT	Sim	Sim	Sim
Preço (€)	3,85	3,03	3,72

O circuito integrado LTC3130 apresenta a maior gama de tensão de entrada e de saída dos dispositivos apresentados, apesar de ser o mais caro este também é o que possui maior fornecimento de corrente. O LTC3130 da Analog Devices foi desenvolvido para aplicações de regulação energética de painéis solares, apresenta um sistema programável (através de um divisor resistivo) de controlo do ponto máximo de potência e a sua saída é definida através de um divisor resistivo, tendo uma corrente máxima de saída de 0,6 A [47]. Em termos de eficiência para uma saída de 5 V, o LTC3130 apresenta eficiências de 82 % a 92 % quando utilizado no modo Burst, no modo PWM a eficiência deste baixa significativamente para correntes de carga inferiores a 50 mA. A vantagem do modo PWM é a redução do *ripple* da tensão da saída para correntes mais elevadas, no entanto este quando está no modo *burst* e a corrente consumida é elevada, o dispositivo muda automaticamente para o modo PWM, resultando numa maior eficiência, aumentando da estabilidade do *loop* de controlo e reduzindo o *ripple* quando comparado com os conversores tradicionais *buck-boost*, desta forma o LTC3130 está configurado no modo Burst.

A tensão de saída é definida por um divisor resistivo entre a saída do LTC3130, o pino de *feedback* e a referência (GND), os valores das resistências são definidos através da seguinte fórmula:

$$V_{out}(V) = 1 + \frac{R_{14}}{R_{15}} \quad (4.2)$$

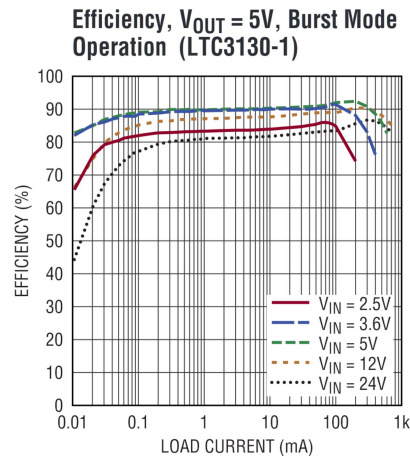


Figura 48: Eficiência do LTC3130 no modo *burst* consoante a carga para uma tensão de saída de 5 V [47].

Dimensionou-se para uma tensão de saída de 5 V, resultando no valor de 2 M Ω e 250 K Ω , de forma a reduzir o *ripple* da tensão de saída e aumentar a resposta a transientes (conforme detalhado no documento técnico do LTC3130) acrescentou-se ainda em paralelo com R14, uma resistência cujo o valor deverá ser vinte vezes inferior à de R14 e um condensador que pode ser calculado através da seguinte formula:

$$C13(pF) = \frac{40}{R14(M\Omega)} \quad (4.3)$$

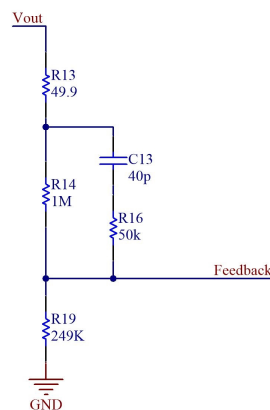


Figura 49: Circuito de definição de tensão de saída.

A funcionalidade do MPPC ajusta dinamicamente a corrente da indutância do circuito de conversão de forma a manter uma tensão de entrada mínima maximizando a transferência de potência na entrada e impedindo que a tensão de entrada reduza devido à carga ligada à saída do sistema.

Segundo o documento técnico do LTC3130, o valor da tensão de MPPC é correspondente a 0,75 da tensão de circuito aberto do painel solar escolhido, sendo este valor de 5,4 V uma vez que o painel solar escolhido apresenta uma tensão de circuito aberto de 7,2 V. A configuração deste valor no LTC3130, é estabelecida através de um divisor resistivo entre a entrada do LTC3130, o pino de MPPC e a referência (GND), os valores das resistências são definidos através da fórmula 4.4.

$$V_{mppc}(V) = 1 + \frac{R17}{R20} \quad (4.4)$$

Dimensionou-se para uma tensão de MPPC de 5,4 V, resultando no valor de 1 MΩ para R17 e 227 kΩ para R20 como se pode ver pela figura 50.

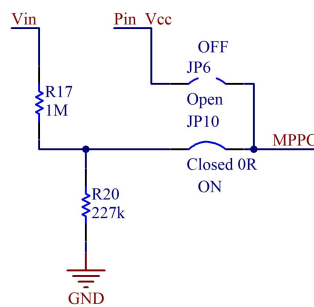


Figura 50: Circuito de definição do valor do MPPC.

4.2.5 Bateria

A bateria do sistema deverá armazenar a energia proveniente do circuito de *energy harvesting*, esta deverá ter a capacidade de absorver a potência máxima fornecida por este e possuir a capacidade de fornecer as potências necessárias para o circuito a jusante. Desta forma escolheu-se um pack de baterias de iões de lítio constituído por três células Samsung INR18650-29EC ligadas em paralelo, possuindo assim, uma capacidade combinada de 8000 mAh. As dimensões do pack são de 55,1x21,5x60 mm³.



Figura 51: Bateria do nó coordenador.

4.2.6 Carregador de bateria

O sistema necessita de um carregador de bateria uma vez que as baterias de íons de lítio têm de ser carregadas segundo um padrão [48]. O carregador escolhido é o BQ24073 da Texas Instruments, este é capaz de carregar a bateria com uma corrente de 1,5 A e pode fornecer correntes 4,5A ao circuito que se encontra ligado à saída do BQ24073 [49]. A tensão nominal de entrada deste dispositivo situa-se entre os 4,35 V e os 6,4 V, a tensão nominal de saída é de 4,4 V.

O dispositivo é capaz de fornecer energia ao sistema e carregar a bateria em simultâneo de forma independente, desta forma é possível reduzir o número de ciclos de carga/descarga da bateria, permitindo ainda que a terminação do carregamento ocorra devidamente e que o sistema funcione caso a bateria se deteriore.

O BQ24073 possui vários sensores de corrente que juntamente com uma unidade de controlo integrada, permitem averiguar o comportamento do sistema e executar técnicas de gestão de energia através da funcionalidade *Dynamic Power Path Management (DPPM)*. Esta funcionalidade permite fazer a gestão do fornecimento energético da saída consoante a energia de entrada e do estado da bateria, possibilitando o fornecimento de energia diretamente da entrada ao sistema ligado à saída deste. Caso a bateria se encontre cheia, esta pode ainda suplementar quando a potência de entrada não esteja no nível necessário para potência exigida pelo circuito ligado à saída, e no caso de o circuito não necessitar de tanta energia este carrega a bateria com a restante.

Este circuito integrado detém várias configurações que são definidas através da utilização de resistências, sendo uma delas um limitador de corrente de entrada. A configuração desta funcionalidade é definida de acordo com o valor lógico dos pinos EN1 e EN2 do BQ24073, as definições deste podem ser vistas na tabela 19.

Tabela 19: Comparação entre os módulos gateway EnOcean TCM 310 e TCM 515.

EN1	EN2	Corrente de limitação
0	0	100 mA
1	0	500 mA
0	1	Definida através de uma resistência entre pino ILIM e a massa.
1	1	2,5 mA

Considerando que o painel solar escolhido pode fornecer correntes superiores a 500 mA e optou-se por utilizar a definição da limitação de corrente com recurso a uma resistência R_{lim} . O cálculo desta é executado através da fórmula 4.5.

$$R_{Ilim}(\Omega) = \frac{K_{Ilim}}{I_{Ilim}(A)} \quad (4.5)$$

O valor de K_{Ilim} é fornecido pelo documento técnico do dispositivo, sendo este de 1610. Para uma corrente 1,5 A o valor da resistência é de 1073,33 Ω , no entanto este valor não é um valor padrão, foi então utilizada um valor de 1100 Ω resultando numa corrente limitada de entrada de 1,46 A.

O BQ24073 também possui uma configuração que permite definir a corrente máxima de carregamento da bateria, esta é definida com a ligação de uma resistência entre o pino ISET e a massa. O valor da resistência de ISET (R_{Iset}) é calculada com através da fórmula 4.6.

$$R_{Iset}(\Omega) = \frac{K_{Iset}}{I_{CHG}(A)} \quad (4.6)$$

O valor de K_{Iset} também é fornecido pelo documento técnico do dispositivo, sendo este de 890. Para uma corrente 1,5 A o valor da resistência é de 593,3 Ω , no entanto este valor não é um valor padrão, foi então utilizada um valor de 590 Ω resultando numa corrente máxima de carregamento de 1,508A.

A funcionalidade de que desabilita o carregamento após a conclusão do mesmo está ativa através do pino TD, estando este ligado à massa.

4.2.7 Circuitos de regulação

Uma vez que o circuito do carregador fornece um tensão contínua de 4,4 V é necessário converter esta para as tensões nominais do STM32L073, do TCM 310 e do SIM800L. A tabela 20 especifica os requisitos elétricos destes.

Tabela 20: Requisitos elétricos do STM32L073, do TCM310 e do SIM800L.

	STM32L073	TCM 310	SIM800L
Gama de tensão de alimentação (V)	1,65 a 3,6	2,6 a 4,5	5
Corrente de pico (A)	0,003	0,043	2
Corrente média (mA)	3	0,043	350
Corrente em sleep (μ A)	0,29	0,2	700

O SIM800L necessita de mais tensão do que aquela que o carregador consegue fornecer, portanto será necessário recorrer a um regulador do tipo boost que permita a elevação para 5 V e que consiga fornecer os transientes de corrente que o SIM800L necessita para o seu funcionamento. Escolheu-se o

regulador boost TPS61022 da Texas Instruments, este consegue fornecer correntes de 8 A, e a sua tensão de saída é definida por duas resistências, R_{34} e R_{36} , uma ligada entre a saída e o pino de *feedback* (FB) e a outra ligada entre o pino FB e a massa [50].

O calculo da tensão de saída é executado através da formula 4.7, o valor de V_{Ref} é fornecido pelo documento técnico do dispositivo, o seu valor é de 0,6 V. Calculou-se o valor de R_{34} e R_{36} considerando a tensão de funcionamento do SIM800L, o valor destas é de 733 k Ω e de 100 k Ω respetivamente.

$$V_{Out}(V) = V_{Ref}(V) * \left(1 + \frac{R_{34}(\Omega)}{R_{36}(\Omega)} \right) \quad (4.7)$$

Este dispositivo possui um pino (EN) que ativa o funcionamento do regulador e a sua saída quando o nível lógico é alto, quando este é baixo o regulador é desativado assim como a sua saída. Desta forma é possível desativar o SIM800L, reduzindo o consumo em *sleep* de 700 μ A para 0,6 μ A. O TPS61022 possui ainda a funcionalidade de *soft start* quando este é ativado.

O pino MODE é responsável pelo funcionamento comutado do TPS61022, este possui dois modos de comutação, o modo Forced PWM e o modo Auto PFM. O modo Forced PWM é o que oferece uma eficiência mais baixa no entanto este como possui uma frequência de comutação estática, eliminando o ruído audível da corrente que atravessa a indutância. O modo Auto PFM é o que oferece uma maior eficiência, neste modo a frequência de comutação varia quando a corrente de saída é inferior a 150 mA.

Optou-se por utilizar o modo Auto PFM uma vez que este é o modo mais eficiente como se pode ver pela figura 52 (b), sendo que o ruído gerado por este não é determinante para a aplicação que se insere.

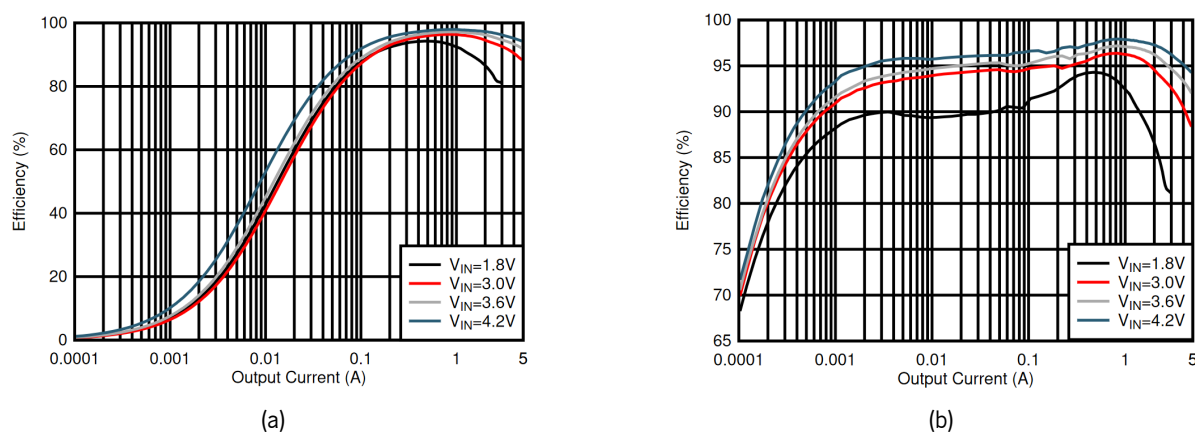


Figura 52: Eficiência do TPS61022 da Texas Instruments no modo Forced PWM(a) e no modo Auto PFM(b) [50].

Estas configurações colmataram na definição do circuito ilustrado pela figura 53.

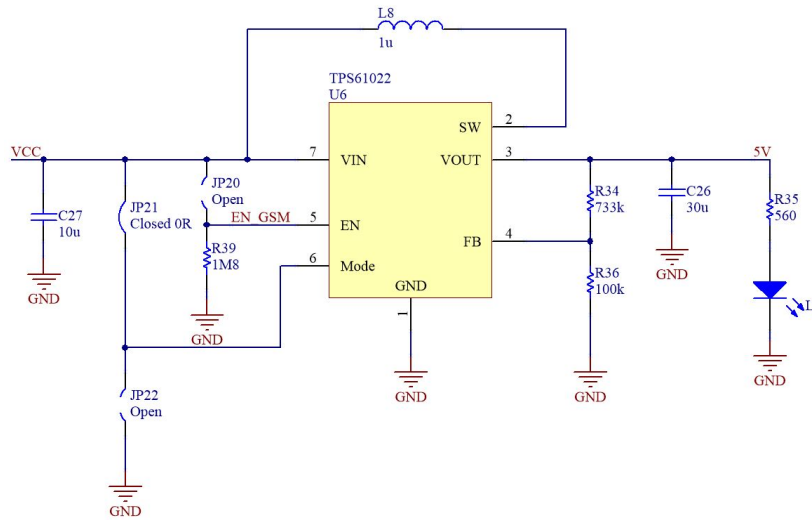


Figura 53: Circuito de regulação da tensão do SIM800L.

O microcontrolador e o gateway EnOcean irão partilhar o mesmo barramento de tensão de 3,6 V. Para a regulação desta tensão optou-se pela utilização de um regulador *Low Drop-Out* (LDO), desta forma, este barramento de tensão garante maior imunidade (quando comparado com uma regulação comutada) aos transientes de corrente do SIM800L que ocorrem durante a transmissão. Esta tipologia também possui menos componentes, ocupando assim menos espaço. O regulador LDO escolhido é o TLV70036 da Texas Instruments, este consegue fornecer uma corrente máxima de 200 mA, que se encontra dentro das características dos dois dispositivos ligados a este barramento de tensão [51]. Na figura 54 é apresentado o circuito desta regulação, como se pode ver, apenas são necessários três componentes para o seu correto funcionamento.

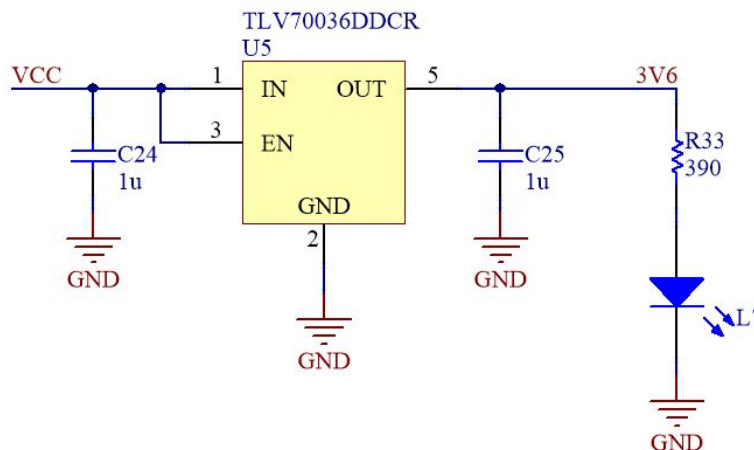


Figura 54: Circuito de regulação da tensão do TCM 310 e do STM32L073.

4.2.8 Invólucro do nó coordenador

A eletrônica do nó coordenador deverá estar protegida por um invólucro que garanta os níveis de estanquidade IP67. A PCB será desenhada com as dimensões necessárias para que esta seja contida dentro da caixa selecionada, sendo esta a Hammond 1554F2GYCL (figura 55) que apresenta dimensões de 119x89x61 mm³, certificação RoHS e proteção IP67 [52].



Figura 55: Caixa Hammond 1554F2GYCL.

A caixa escolhida é selada de forma a garantir os níveis estanquidade IP67 no entanto é necessário realizar a passagem de cablagem proveniente do painel solar para o interior desta. Desta forma é necessário utilizar um bucim IP67 e respetivos vedantes para a entrada da cablagem do painel solar, mantendo assim, os níveis de estanquidade do sistema.



Figura 56: Bucim de entrada de cablagem do painel solar.

4.2.9 Nó Coordenador

Atendendo aos circuitos eletrónicos e os vários dispositivos apresentados procedeu-se ao desenho de componentes e de esquemáticos através do programa Altium Designer. Recorrendo a estes desenhou-se a placa de circuito impresso do nó coordenador culminando na produção placa da figura 57(a). Os esquemáticos da placa do nó coordenador podem ser visualizados no anexo II.

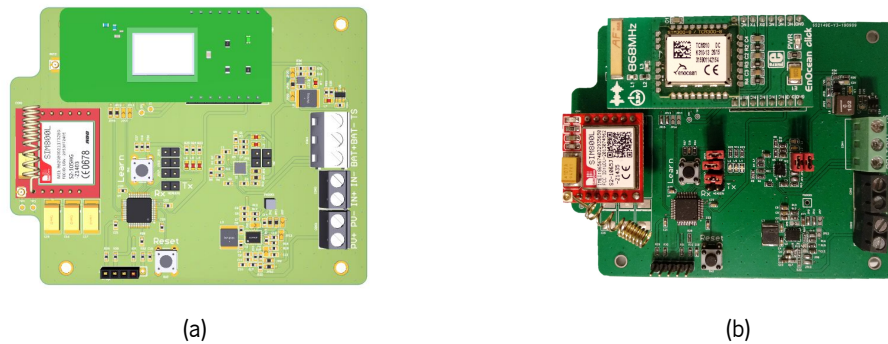


Figura 57: Virtualização da placa de circuito impresso do nó coordenador (a) e placa de circuito impresso do nó coordenador (b).

Após a montagem da PCB (57(b)) procedeu-se à montagem do nó coordenador resultando no dispositivo da figura 58.

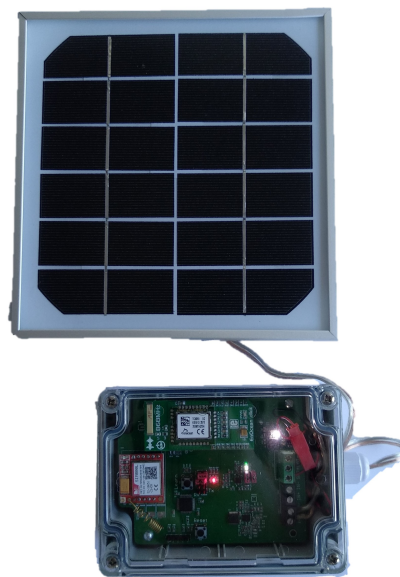


Figura 58: Nó coordenador.

4.2.10 Trama de comunicação

A comunicação com a camada superior, realizada através de MQTT seguindo as especificações previamente definidas, relativamente ao conteúdo dos tópicos, no tópico `connection_rate` deverá conter o número de minutos entre ligações e no tópico `read_rate` deverá conter identificador (tabela 15) que especifica o intervalo entre leituras dos nós sensores.

No tópico `reads` este deverá enviar um JSON inicial com a estrutura presente na figura 59.


```

{
  "time_stamp": "20/07/2021 12:00:00",
  "devices": [
    {
      "id": "0x11111111",
      "value": ""
    },
    {
      "id": "0xFFFFFFFF",
      "value": ""
    }
  ]
}

```

Figura 59: Ficheiro JSON a transmitir na primeira ligação.

O campo *time_stamp* indica a data e hora da ligação no fuso horário UTC, este é seguido de um vector de *devices*, sendo apenas transmitidos os identificadores dos nós sensores associados ao nó coordenador, o campo *value* é deixado em branco para identificar que se trata de uma primeira transmissão.

Posteriormente, na próxima ligação, o JSON será preenchido com a estrutura de dados ilustrada na figura 60.

```

{
  "time_stamp": "20/07/2021 14:00:00",
  "devices": [
    {
      "id": "0x11111111",
      "value": "020",
      "last_read": "20/07/2021 13:57:00",
      "container_type": "0",
      "rssi": "-40",
      "read_cycle": "02"
    },
    {
      "id": "0xFFFFFFFF",
      "value": "765",
      "last_read": "20/07/2021 13:55:00",
      "container_type": "3",
      "rssi": "-10",
      "read_cycle": "02"
    }
  ]
}

```

Figura 60: Ficheiro JSON a transmitir depois da primeira ligação.

Este novo formato apenas acrescenta os seguintes campos aos elementos de *devices*: *last_read*, *container_type*, *rssi* e *read_cycle*. O campo *value* passa a ser preenchido com o valor (em centímetros) da última leitura, campo *last_read* é preenchido com a data e hora da leitura no fuso horário UTC, o campo *container_type* identifica o tipo de contentor de acordo com a tabela 12, o campo *rssi* apresenta o RSSI do nó sensor e o campo *read_cycle* identifica o tempo entre leituras do nó sensor de acordo com a tabela 15. Esta trama foi elaborada para efeitos de teste, sendo necessário proceder-se a otimização dos

campos a transmitir.

4.2.11 System Stack

O *system stack* visa ilustrar a ligação entre as três camadas existentes do sistema: *hardware*, *software* e aplicação.

Na camada do *hardware* estão presentes todos os elementos que interagem diretamente com a aplicação através de recursos presentes na camada *software*. Os elementos que a constituem são o microcontrolador, o SIM800L, o TCM310, o botão, os LEDs e o pino de ativação da alimentação do SIM800. O periférico TIM7 é utilizado para fazer o *debounce* do botão, sendo a LPUART1 utilizada para efeitos de *debug* e o *Systick* responsável pelo controlo temporal das rotinas.

Na camada *software* dominam os HAL Drivers que são fornecidos pela STMicroelectronics, estes possuem bibliotecas de interface aos periféricos abstraindo do *hardware* do microcontrolador, através destas é possível mudar de microcontrolador da mesma família sem modificar o código da aplicação.

Na camada aplicação estão contidas as rotinas necessárias para a comunicação com o módulo TCM310 através do protocolo série ESP3, e as rotinas necessárias para a comunicação série com o módulo SIM800L sendo posteriormente utilizado protocolo MQTT quando ocorre a ligação TCP/IP. Esta camada conta ainda com uma rotina de gestão dos nós sensores que é responsável pela agregação dos sensores associados numa tabela de *hash*, atualizando os dados quando a informação é recebida da camada inferior ou da camada superior. O esquema de cores presente na figura 61 associa o *hardware* com as rotinas utilizadas na aplicação.

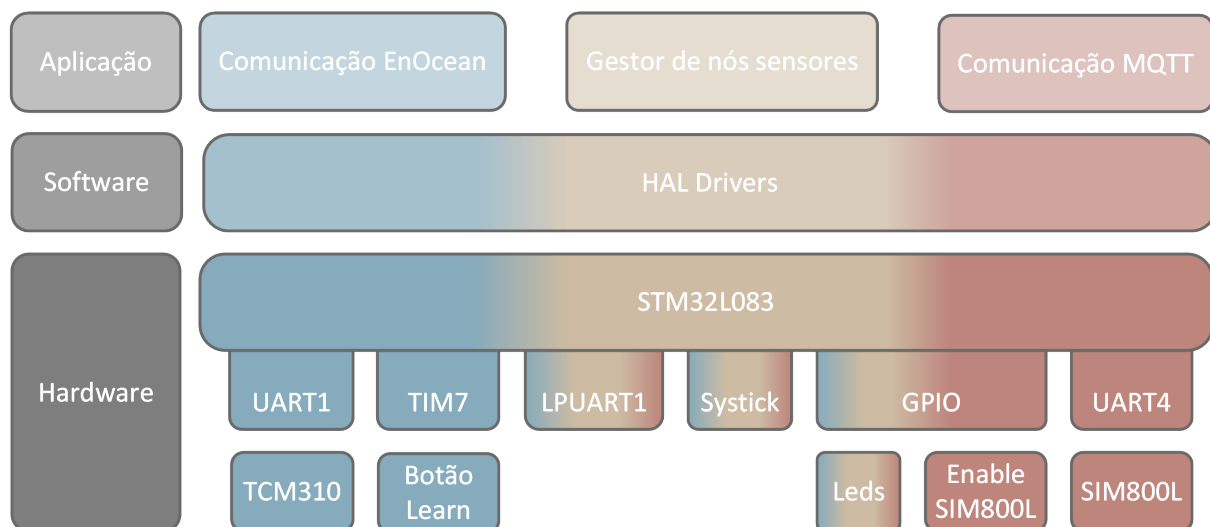


Figura 61: System Stack do nó coordenador.

4.2.12 Software

O software do nó coordenador foi desenvolvido no programa STM32IDE sendo utilizada a ferramenta STM32Cube para a geração das bibliotecas *Hardware Abstraction Layer* (HAL). A programação do nó coordenador é executada através de um ST-Link V2 contido numa placa de desenvolvimento Nucleo.

4.2.12.1 Fluxo Principal

Após o arranque do nó coordenador, o sistema é inicializado garantindo o correto funcionamento do STM32L083 este em seguida inicializa a o SIM800, garantindo que este se encontre desativado, posteriormente o módulo EnOcean é configurado no modo *post master*, sendo retirada deste a informação dos nós associados e inserida numa tabela *hash*, em seguida o sistema entra num ciclo infinito. Este fluxo encontra-se ilustrado na figura 62.

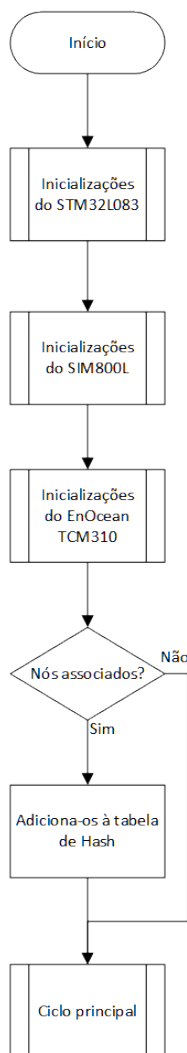


Figura 62: Fluxograma de arranque do nó coordenador.

No ciclo infinito podem decorrer três rotinas, a rotina do processo *learn*, a rotina da ligação de transmissão para o *broker* MQTT e a rotina da recepção da mensagem.

A rotina do processo *learn* só decorre quando a *flag* do modo *learn* está ativada, sendo esta ativa quando o botão *Learn* presente na placa do nó coordenador é pressionado. Nesta rotina é executado todo o processo de adição e remoção dos nós sensores consoante o estado destes.

A rotina do processo da ligação de transmissão decorre no arranque do sistema de forma a adquirir os valores dos tempos de transmissão e do ciclo de leitura dos nós sensores. Após esta aquisição a rotina decorre com um período definido pelo conteúdo do tópicos *connection_rate*.

Sempre que um telegrama é recebido de um nó sensor associado ao nó coordenador é executada a atualização dos dados presentes na tabela de *hash*.

Este fluxo encontra-se ilustrado na figura 63.

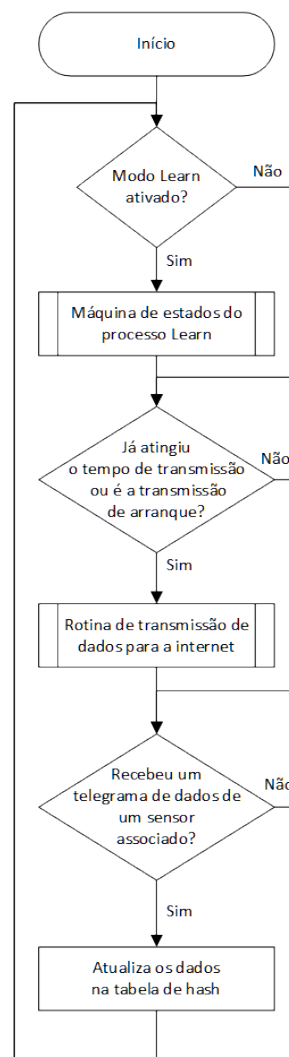


Figura 63: Fluxograma do ciclo principal do nó coordenador.

4.2.12.2 Modo Learn

A ativação deste modo é executada sempre que o botão Learn é pressionado, habilitando assim que o TCM310 entre no modo *learn* e que o nó coordenador esteja disponível para o processamento dos telegramas do tipo *SmartAckLearn*. Desta forma esta rotina verifica se o dispositivo recebeu um telegrama do tipo *SmartAckLearn* caso não receba nenhum telegrama um minuto após a ativação o nó coordenador desativa o modo *learn*. Após a a receção de um telegrama *SmartAckLearn* é verificado se o sensor se encontra adicionado à tabela de hash, sendo transmitido um telegrama de Learn Out e os dados do sensor removidos da tabela caso este se encontre presente na tabela de hash, no caso de se tratar de um sensor que não esteja associado ao nó coordenador, é transmitido um telegrama de *Learn In* sendo posteriormente adicionador à tabela de hash. Este fluxo encontra-se ilustrado na figura 64.

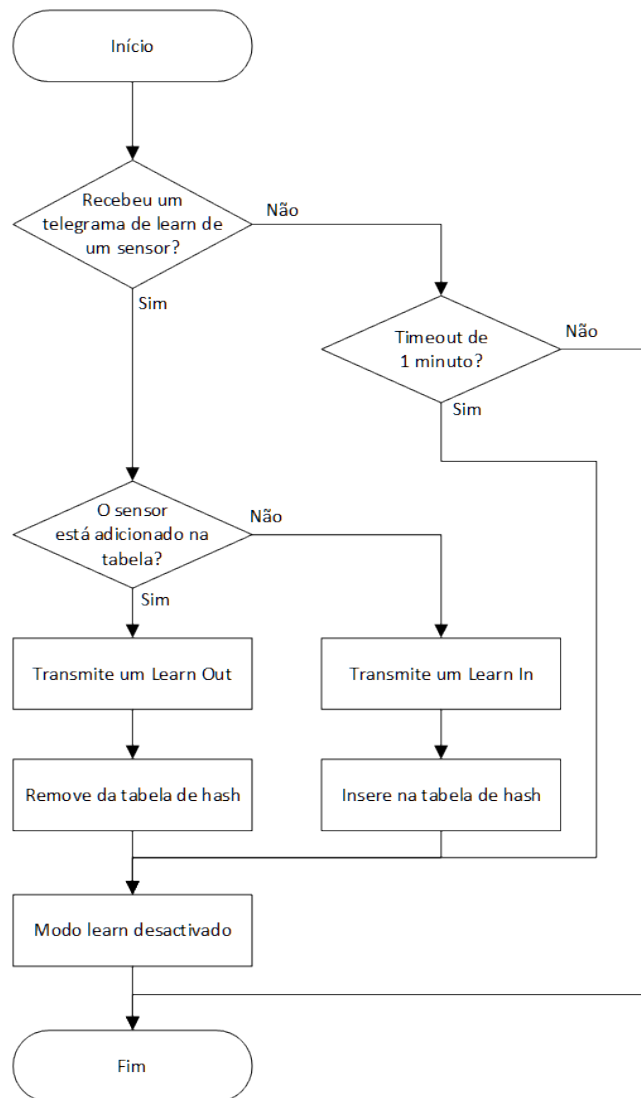


Figura 64: Fluxograma da rotina do processo *learn* do nó coordenador.

4.2.12.3 Ligação à internet

Esta rotina é responsável pela transmissão periódica dos dados presentes na tabela de *hash* para o *broker* MQTT através de um ficheiro JSON, sendo que no decorrer desta rotina os valores da transmissão periódica e o do ciclo de leitura podem ser modificados.

Este fluxo encontra-se ilustrado na figura 65.

Inicialmente é ativada a alimentação do SIM800, sendo este devidamente inicializado de forma a garantir o seu correto funcionamento, nesta fase também é extraída a data e hora da ligação que será utilizada para inserir os *timestamps*. Após a inicialização é verificado se a ligação com o *broker* foi estabelecida com sucesso, no caso de esta não o ser à terceira tentativa o ciclo de atualização é adiado para a próxima transmissão.

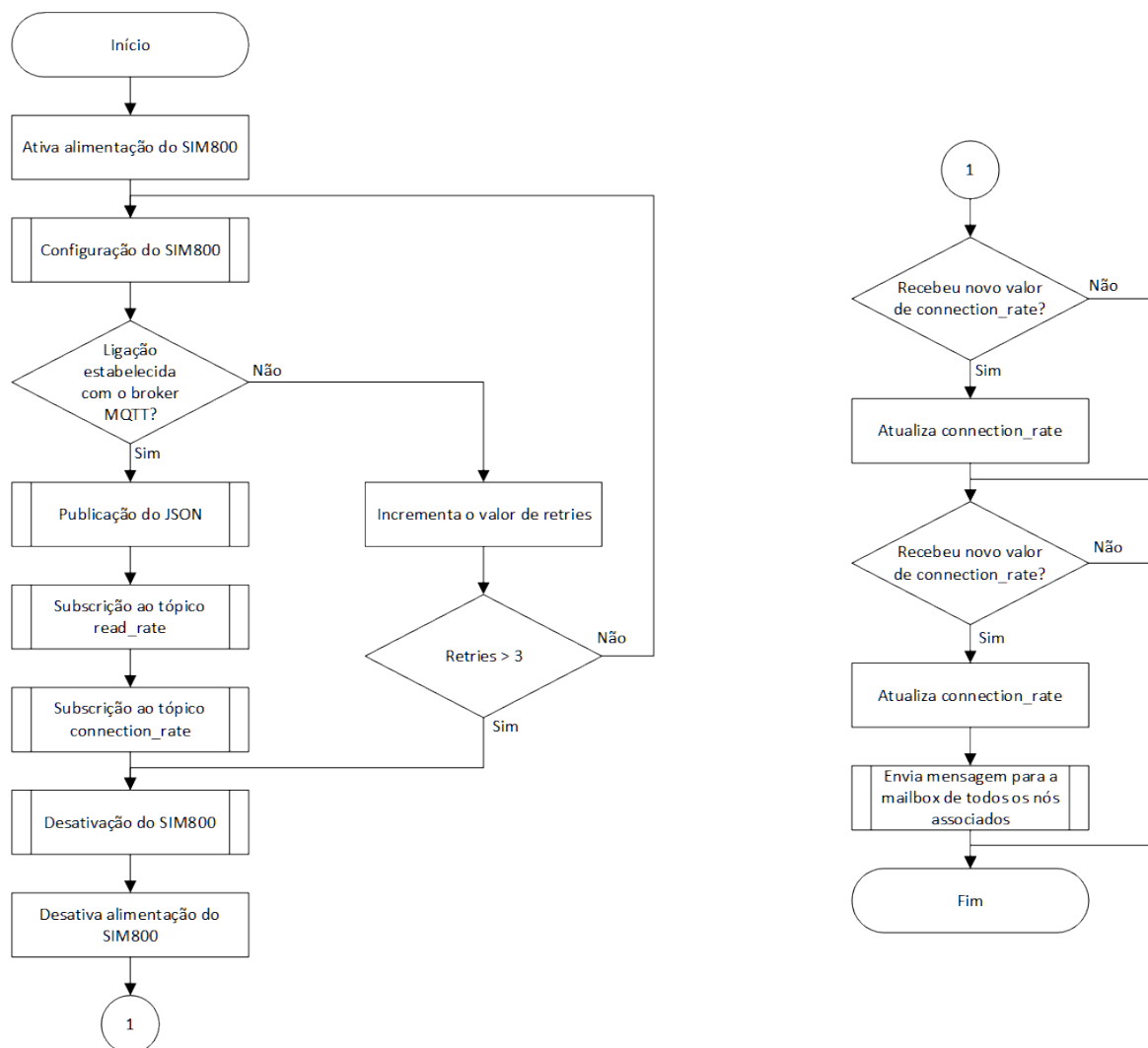


Figura 65: Fluxograma do ciclo de ligação à internet.

Após a ligação com o *broker* MQTT o ficheiro JSON é publicado para o tópico reads do respetivo dispositivo, sendo posteriormente executada a subscrição dos tópicos *read_rate* e *connection_rate*, dada a receção destes dados é iniciado o processo de desativação do SIM800, em que a ligação com o *broker* e a respetiva alimentação do SIM800 são desativadas de forma encadeada.

Posteriormente o valor de *connection_rate* é atualizado sendo executada uma verificação se o valor de *read_cycle* é diferente do anterior, caso seja decorre o processo de atualização das *mailboxes* dos nós sensores, sendo transmitidos os telegramas para o TCM310 que os guardará até ao próximo processo de *reclaim* de cada nó sensor.

Resultados

Neste capítulo são demonstrados os testes executados ao sistema desenvolvido. Demonstrando o funcionamento do nó sensor do nó coordenador e da rede, validando também, o correto funcionamento da eletrônica contida nestes dispositivos. Estes testes também contemplarão a verificação dos consumos energéticos do nó sensor e do nó coordenador.

5.1 Validação da rede EnOcean

Este teste terá como foco associação de um dispositivo à rede EnOcean, validando o funcionamento através do protocolo de comunicação SmartACK da EnOcean.

A rede foi configurada com apenas um nó sensor e o coordenador da rede.

A informação sobre as tramas de comunicação entre os elementos que compõem a rede é apresentada através do programa DolphinView, recorrendo a um setup de validação composto pela placa EVA320-2 (contida no EDK300) . A EVA320-2 contém um STM300 que foi carregado (através do DolphinView) com o programa Dolphin Sniffer que permite visualizar as tramas SmartACK, uma vez que o gateway USB300 (também contido no EDK300) não permite essa visualização.

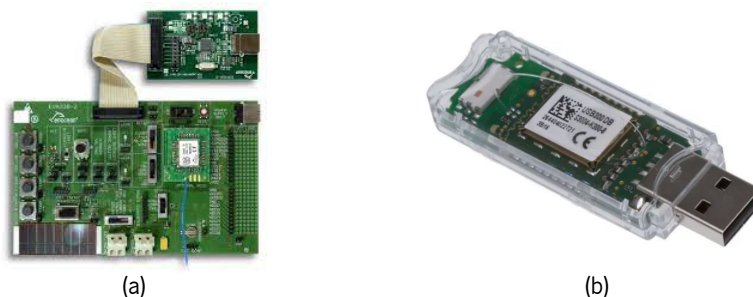


Figura 66: Placa EVA320-2 e o programador EOP300-2 (a) e USB300 (b).

Uma vez que só se pretende apresentar as ocorrências na rede EnOcean, optou-se por desativar a funcionalidade de comunicação com a camada superior, esta será apresentada num próximo teste.

O seguinte procedimento de testes foi realizado de forma a validar o funcionamento da rede, e consequentemente dos nós presentes na rede.

- 1 - O coordenador e o nó sensor foram ativados sem estarem associados a uma rede. O nó sensor transmite a primeira mensagem, indicando através do valor do primeiro byte do campo data visível na figura 67, que é a primeira mensagem de arranque do sistema. O segundo byte apresenta o valor RSSI do último telegrama recebido, uma vez que é o primeiro ciclo não existe um valor de RSSI válido, este vem como 0xFF que representa a inexistência do valor de RSSI da última mensagem recebida. O terceiro byte agrega vários parâmetros, permitindo extrair informação como taxa de amostragem (1 minuto), tipo de contentor (cartão) e os dois bits mais significativos da leitura estão a 0. O último byte possui os restantes bits da leitura, esta é de 170 cm. Esta trama segue o formato especificado no capítulo 4.1.7.

Direction	Port	Date Time	ID	RORG	Data	OptionalData	Status	dBm	Subt	DestinationID	Security	TimeDiff.
→	COM9	2021-06-28 00:37:21.747	01A54FEF	4BS	FF FF 00 AA		00	-49	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.000

Figura 67: Teste 1: Mensagem de arranque do nó sensor.

Na figura 68, podemos verificar o log do coordenador, este arranca e verifica que não existem nós sensores associados. A receção da primeira mensagem é ignorada uma vez que este só processa as mensagens provenientes dos nós que estão associados à sua rede EnOcean, como especificado pelo fluxograma da figura 62.

```
0:37:19.056> Init Coordinator!
0:37:21.061> Function ret: : 0
0:37:21.061> Number of clients: 0
0:37:21.061>
```

Figura 68: Teste 1: Log de arranque do coordenador.

- 2 - O módulo sensor transmite a segunda mensagem (figura 69), esta contempla no primeiro byte que o módulo não se encontra aprendido, mantendo o mesmo valor de RSSI da mensagem anterior, após esta mensagem o nó sensor define o seu tempo de *sleep* para o máximo como se pode verificar pelo valor 0xE0 no terceiro byte. A leitura contida neste telegrama é de 169 cm;

→	COM9	2021-06-28 00:37:22.755	01A54FEF	4BS	EE FF E0 A9	00	-51	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:01.007
---	------	-------------------------	----------	-----	-------------	----	-----	---	----------	-----	--------------

Figura 69: Teste 1: Segunda mensagem de arranque do nó sensor.

- 3 - Ativou-se o modo de aprendizagem no nó coordenador, pressionando o botão Learn sendo posteriormente pressionado o botão Learn do nó sensor. Esta ultima ação despoleta a transmissão de mensagens do tipo SmartACK.

O coordenador recebe o pedido, respondendo ao nó sensor com um telegrama com o R-ORG SM_LRN_ANS que envia no quarto byte do telegrama a informação de que o nó foi adicionado à sua rede. No log pode ser visto o *output* do nó coordenador, em que se verifica que o módulo coordenador entrou no modo Learn e que respondeu ao pedido aprendizagem com um *Learn In*.

→	COM9	2021-06-28 00:37:30.511	01A54FEF	SM_LRN_REQ	F8 FF BB AA CC 00 00 00 00 00	8F	-49	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:07.755
→	COM9	2021-06-28 00:37:30.583	01A54FEF	SM_LRN_REQ	08 FF BB AA CC 2C 01 8E CC 20	01	-45	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.071
→	COM9	2021-06-28 00:37:31.098	01A54FEF	SM_REC	00	8F	-49	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.515
→	COM9	2021-06-28 00:37:31.129	019987E8	SM_LRN_ANS	02 00 64 00 00 00 00 00	8F	-60	1	01A54FEF	N/A	00:00:00.000

Figura 70: Teste 1: Mensagens do processo Learn-In de SmartACK.

```
0:37:29.094> Entering learn mode
0:37:29.094> TCM310_SA_WR LearnMode Ret: 0
0:37:30.787> Received CONFIRM_LEARN
0:37:30.787> PostMaster: 0x019987E8
0:37:30.787> ClientID: 0x01A54FEF
0:37:30.787> RSSI: 0
0:37:30.787> EEP: 0xBBAACC
0:37:30.787> ManuID: 255
0:37:30.787> Priority: 7
0:37:30.787> HopCount: 0
0:37:30.787> Confirm Learn IN: 0
0:37:30.787> TCM310_SA_WR LearnMode Ret: 0
```

Figura 71: Teste 1: Log do processo Learn-In de SmartACK.

- 4 - Após cinco segundos do início do processo de *Learn In*, o nó sensor transmite duas mensagens (figura 72), a primeira contém um telegrama com o R-ORG 4BS, este no primeiro campo já informa que o nó sensor está associado a uma rede EnOcean e que obteve resposta a um *reclaim* na primeira tentativa. No segundo byte este recebe o valor 0x31 que se traduz num RSSI do último telegrama recebido de -49 dBm. O terceiro byte informa que o seu tempo de *wakeup* está definido para o valor mais alto e a leitura do sensor é de 169 cm.

→	COM9	2021-06-28 00:37:36.650	01A54FEF	4BS	01 31 E0 A9	00	-49	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:05.551
→	COM9	2021-06-28 00:37:36.763	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-51	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.113
→	COM9	2021-06-28 00:37:36.786	019987E8	1BS	03	8F	-60	1	01A54FEF	N/A	00:00:05.657

Figura 72: Teste 1: Mensagens após o processo de Learn-In de SmartACK.

A recepção desta mensagem no coordenador pode ser vista na figura 73.

Após este telegrama, o nó sensor aguarda um determinado tempo, este serve para que o coordenador conseguia processar a informação atempadamente. Após a espera o nó sensor envia um telegrama de *reclaim*, requisitando a informação ao coordenador, respondendo a este com um telegrama cujo o R-ORG é 1BS, onde é contido o ciclo de *sleep*, este foi redefinido para 30 segundos.

```
0:37:36.588> Received ERP1 packet!
0:37:36.588>
0:37:36.588> Status: 0x01!
0:37:36.588> Node Rx RSSI: -49 dBm
0:37:36.588> Container type: 0
0:37:36.588> Sleep cycle: 7
0:37:36.588> Read: 169 cm
0:37:36.588>
0:37:36.588> Sender ID: 0x01A54FEF!
0:37:36.588> Status: 0x00!
```

Figura 73: Teste 1: Log das mensagens recebidas.

- 5 - Na figura 74 pode-se verificar que entrou em vigor o novo ciclo de leitura, no entanto como o coordenador tem a *mailbox* do nó sensor vazia, a resposta ao *reclaim* muda. Esta possui um R-ORG do tipo SIG e a informação contida neste telegrama informa o nó sensor que não existe nenhuma mensagem na sua *mailbox*. Como se pode ver pela figura 74, após a recepção de um telegrama com R-ORG SIG, o primeiro byte da mensagem é modificado para o valor 0x05, significando que o sensor se encontra adicionado a uma rede EnOcean mas não recebeu nenhum telegrama de dados anteriormente.

→	COM9	2021-06-28 00:38:07.375	01A54FEF	4BS	01 31 60 AA	00	-52	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:30.612
→	COM9	2021-06-28 00:38:07.491	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-52	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.115
→	COM9	2021-06-28 00:38:07.517	019987E8	SIG	01	8F	-60	1	01A54FEF	N/A	00:00:30.731
→	COM9	2021-06-28 00:38:37.444	01A54FEF	4BS	05 31 60 AA	00	-52	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:29.952
→	COM9	2021-06-28 00:38:37.562	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-52	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.118
→	COM9	2021-06-28 00:38:37.589	019987E8	SIG	01	8F	-60	1	01A54FEF	N/A	00:00:30.072
→	COM9	2021-06-28 00:39:07.509	01A54FEF	4BS	05 31 60 AA	00	-54	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:29.946
→	COM9	2021-06-28 00:39:07.644	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-55	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.135
→	COM9	2021-06-28 00:39:07.668	019987E8	SIG	01	8F	-60	1	01A54FEF	N/A	00:00:30.078

Figura 74: Teste 1: Troca de mensagens com a *mailbox* vazia.

```
0:38:07.264> Received ERP1 packet!
0:38:07.264>
0:38:07.264> Status: 0x01!
0:38:07.720> Node Rx RSSI: -49 dBm
0:38:07.720> Container type: 0
0:38:07.720> Sleep cycle: 3
0:38:07.720> Read: 170 cm
0:38:07.720>
0:38:07.720> Sender ID: 0x01A54FEF!
0:38:07.720> Status: 0x00!
0:38:37.444> Received ERP1 packet!
0:38:37.444>
0:38:37.444> Status: 0x05!
0:38:37.444> Node Rx RSSI: -49 dBm
```

(a)

```
0:38:37.444> Container type: 0
0:38:37.444> Sleep cycle: 3
0:38:37.444> Read: 170 cm
0:38:37.444>
0:38:37.444> Sender ID: 0x01A54FEF!
0:38:37.444> Status: 0x00!
0:39:07.462> Received ERP1 packet!
0:39:07.462>
0:39:07.462> Status: 0x05!
0:39:07.462> Node Rx RSSI: -49 dBm
0:39:07.462> Container type: 0
0:39:07.462> Sleep cycle: 3
0:39:07.462> Read: 170 cm
0:39:07.462>
0:39:07.462> Sender ID: 0x01A54FEF!
0:39:07.462> Status: 0x00!
```

(b)

Figura 75: Teste 1: Log de recepção de mensagens.

- 6 - Depois do envio das mensagens o nó coordenador define um novo ciclo de leituras enviando uma mensagem com a nova definição para a *mailbox* do nó sensor. Após receber o *reclaim*, e perante o facto da *mailbox* se encontrar preenchida é transmitida a mensagem para o nó sensor. Este recebe-a e altera o ciclo de leitura, mudando o campo dedicado a este parâmetro no próximo telegrama enviado (figura 76).

→	COM9	2021-06-28 00:39:37.610	01A54FEF	4BS	05 31 60 AA	00	-51	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:29.965
→	COM9	2021-06-28 00:39:37.723	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-51	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.113
→	COM9	2021-06-28 00:39:37.747	019987E8	1BS	04	8F	-61	1	01A54FEF	N/A	00:00:30.079
→	COM9	2021-06-28 00:40:38.414	01A54FEF	4BS	01 31 80 AA	00	-49	3	FFFFFFFF	N/A	00:01:00.691
→	COM9	2021-06-28 00:40:38.527	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-49	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.112
→	COM9	2021-06-28 00:40:38.550	019987E8	SIG	01	8F	-61	1	01A54FEF	N/A	00:01:00.803

Figura 76: Teste 1: Redefinição do ciclo de envio.

- 7 - Nesta fase desligou-se o nó coordenador antes da transmissão do primeiro telegrama presente na figura 77, este foi ligado depois do envio do telegrama por parte do nó sensor. Verificou-se que não existe uma resposta ao *reclaim*, uma vez que o nó coordenador se encontra desligado. No segundo telegrama enviado pelo nó sensor, verifica-se que o primeiro byte contém o valor 0x04, indicando que o módulo encontra-se adicionado a uma rede EnOcean mas que não houve resposta após três *reclaims*. No log (figura 78) podemos ver que o nó coordenador é iniciado e que este verifica que existe um nó associado à sua rede EnOcean.

→	COM9	2021-06-28 00:41:38.559	01A54FEF	4BS	05 31 80 AA	00	-52	3	FFFFFFFF	N/A	00:01:00.031
→	COM9	2021-06-28 00:41:38.691	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-52	3	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.132
→	COM9	2021-06-28 00:42:38.699	01A54FEF	4BS	04 31 80 AA	00	-55	3	FFFFFFFF	N/A	00:01:00.007
→	COM9	2021-06-28 00:42:38.835	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-55	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.136
→	COM9	2021-06-28 00:42:38.858	019987E8	1BS	04	8F	-61	1	01A54FEF	N/A	00:02:00.308

Figura 77: Teste 1: Troca de mensagem sem resposta do coordenador.

```

0:41:56.519> Init Coordinator!
0:41:58.579> Function ret: : 0
0:41:58.579> Number of clients: 1
0:41:58.579>
0:41:58.579> Chain 9:
0:41:58.579>           Allocated at: 0x20000EB8
0:41:58.579>           Client ID: 0x01A54FEF
0:41:58.579>           Controller ID: 0x019987E8
0:42:38.637> Received ERP1 packet!
0:42:38.637>
0:42:38.637> Status: 0x04!
0:42:38.637> Node Rx RSSI: -49 dBm
0:42:38.637> Container type: 0
0:42:38.637> Sleep cycle: 4
0:42:38.637> Read: 170 cm
0:42:38.637>
0:42:38.637> Sender ID: 0x01A54FEF!
0:42:38.637> Status: 0x00!
    
```

Figura 78: Teste 1: Log de arranque do coordenador.

- 8 - Nesta fase, desligou-se o nó sensor de forma a auferir o comportamento do sistema. Como se pode verificar pela figura 79, o nó sensor transmite uma mensagem com o primeiro byte preenchido com o valor 0xFF, representando que é a primeira mensagem de arranque do sensor, no entanto como o nó sensor está adicionado a uma rede EnOcean o processo de *reclaim* é despoletado (uma vez que o ID EnOcean do coordenador é guardado numa memória não volátil), no qual o nó coordenador transmite a mensagem a ele destinado. Esta possui o novo valor de ciclo de medição (1 minuto) uma vez que após a desativação de alimentação do nó sensor este faz *reset* ao seu ciclo de medição para 1 segundo.

→	COM9	2021-06-28 00:44:38.070	01A54FEF	4BS	FF FF 00 AA	00	-52	3	FFFFFFF	N/A	00:01:59.235
→	COM9	2021-06-28 00:44:38.185	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-52	1	FFFFFFF	N/A	00:00:00.114
→	COM9	2021-06-28 00:44:38.209	019987E8	1BS	04	8F	-60	1	01A54FEF	N/A	00:01:59.350
→	COM9	2021-06-28 00:45:38.873	01A54FEF	4BS	01 31 80 AA	00	-54	3	FFFFFFF	N/A	00:01:00.687
→	COM9	2021-06-28 00:45:39.008	01A54FEF	SM_REC	80	8F	-54	1	FFFFFFF	N/A	00:00:00.134
→	COM9	2021-06-28 00:45:39.033	019987E8	SIG	01	8F	-64	1	01A54FEF	N/A	00:01:00.823

Figura 79: Teste 1: Mensagens do processo Learn-In de SmartACK.

- 9 - Ativou-se o modo de aprendizagem no nó coordenador, pressionando o botão Learn presente neste, posteriormente pressionou-se o botão Learn do nó sensor, despoletando a transmissão de mensagens do tipo SmartACK.

→	COM9	2021-06-28 00:45:49.194	01A54FEF	SM_LRN_REQ	F8 FF BB AA CC 00 00 00 00	8F	-52	3	FFFFFFF	N/A	00:00:10.185
→	COM9	2021-06-28 00:45:49.225	01A54FEF	SM_LRN_REQ	08 FF BB AA CC 2A 01 8E CC 20	01	-45	3	FFFFFFF	N/A	00:00:00.031
→	COM9	2021-06-28 00:45:49.769	01A54FEF	SM_REC	00	8F	-52	1	FFFFFFF	N/A	00:00:00.544
→	COM9	2021-06-28 00:45:49.799	019987E8	SM_LRN_ANS	02 00 64 20 00 00 00 00	8F	-60	1	01A54FEF	N/A	00:00:10.766

Figura 80: Teste 1: Mensagens do processo Learn-Out de SmartACK.

O coordenador recebe o pedido, respondendo ao nó sensor com um telegrama com o R-ORG do tipo SM_LRN_ANS que envia no quarto byte do telegrama a informação de que o nó foi removido da sua rede. No log pode ser visto o *output* do nó coordenador, em que se verifica que o nó coordenador entrou no modo Learn e que respondeu ao pedido aprendizagem com um *Learn Out*.

```

0:45:47.191> Entering learn mode
0:45:47.396> TCM310_SA_WR_LearnMode Ret: 0
0:45:49.379> Received CONFIRM_LEARN
0:45:49.379>   PostMaster: 0x019987E8
0:45:49.379>   ClientID: 0x01A54FEF
0:45:49.379>   RSSI: 0
0:45:49.379>   EEP: 0xBBAACC
0:45:49.379>   ManuID: 255
0:45:49.379>   Priority: 15
0:45:49.379>   HopCount: 0
0:45:49.379> Confirm Learn out: 0
0:45:51.196> TCM310_SA_WR_LearnMode Ret: 0

```

Figura 81: Teste 1: Log do coordenador do processo de Learn Out.

- 10 - Após a desassociação da rede EnOcean o nó sensor muda o seu ciclo de leitura para 8 minutos como se pode verificar na figura 82, nesta imagem também se verifica que o primeiro byte da mensagem possui o valor 0xEE informando que não se encontra adicionado a uma rede EnOcean. Nesta altura também se modificou o seletor, colocando todos os *switches* para cima, esta ação reflete-se no terceiro byte da trama enviada.



Figura 82: Teste 1: Mensagens do nó sensor após o processo de learn out.

Com este teste valida-se a transmissão de telegramas por parte do nó sensor recorrendo ao protocolo SmartACK. Verifica-se a criação de uma rede EnOcean bidirecional baseada no protocolo SmartAck através do processo de *Learn* destes dispositivos. É também executada uma verificação funcional da modificação de parâmetros de funcionamento do nó sensor, bem como casos de falha do nó sensor e do nó coordenador.

5.2 Medição do consumo energético do Nó Sensor

O nó sensor é alimentado por uma bateria primária tendo sido desenvolvido com o foco de obter o consumo mais baixo possível de forma a estender ao máximo o seu tempo de vida útil. De forma a determinar se a componente de alimentação que consiste na pilha Saft LS17600 garante os requisitos impostos no capítulo 3.1 relativamente à autonomia do nó sensor, este foi sujeito a vários testes com a finalidade de analisar os seus consumos energéticos. Desta forma recorreu-se a um multímetro de bancada, o DMM7510 da Keithley, sendo este utilizado como amperímetro de forma a medir correntes elétricas contínuas [53].

O Keithley DMM7510 (figura 83) permite medir correntes elétricas com uma resolução variável de 1 pA a 1 μ A em função do alcance de medição, podendo este variar entre 10 μ A e 10 A.



Figura 83: Keithley DMM7510

Procedeu-se à medição do consumo elétrico, através do Keithley DMM7510, sobre a forma de corrente do nó sensor durante o processo referente ao estado de aquisição, a figura 84 ilustra a captura do ecrã da ferramenta de medição.

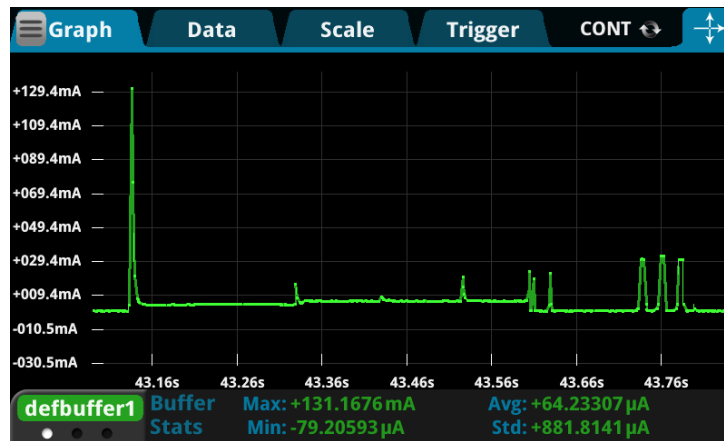


Figura 84: Teste 2: Consumo do nó sensor.

Estes dados foram exportados para um ficheiro *Comma-Separated Values* (CSV), resultando na imagem da figura 85 onde foram identificadas as diferentes fases de funcionamento. A fase 1 é o *wake up* do sistema do *watchdog reset*, após esta o nó entra na fase de inicialização do sonar esperando cerca de 200 ms, após este tempo o microcontrolador recebe três leituras válidas transmitindo o telegrama de dados (sendo este constituído por três-subtelegramas). Após a fase 4, o nó sensor espera no modo *sleep* aguardando que decorra o processamento do nó coordenador, decorrido esse tempo este entra na fase 6. Nesta fase o microcontrolador acorda e transmite os 3 *reclaims* uma vez que não obtém resposta do nó coordenador. Na última fase o nó entra novamente no modo *sleep*.

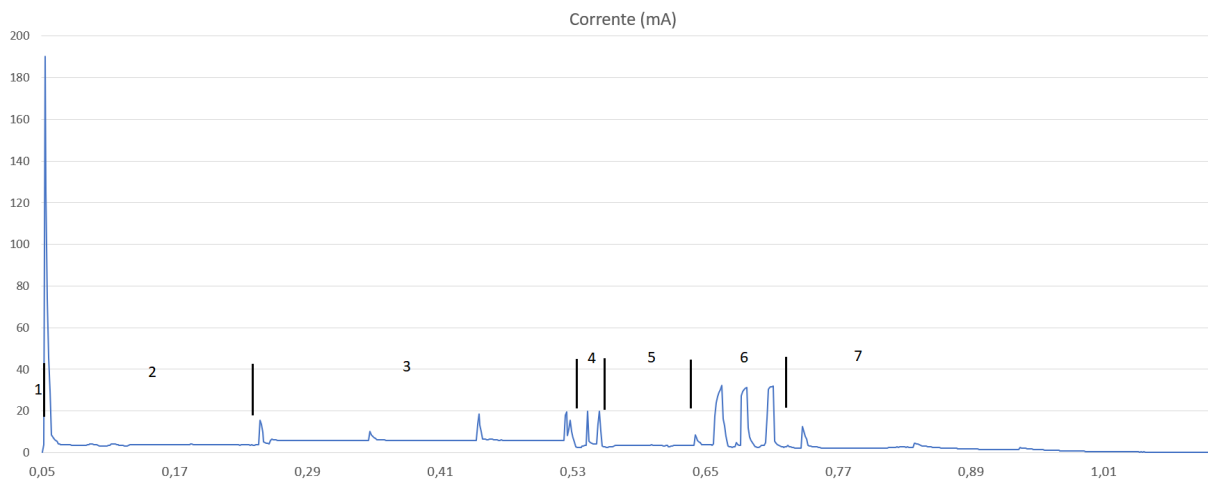


Figura 85: Teste 2: Consumo do nó sensor num ciclo de leitura.

A tabela 21 apresenta os consumos elétricos sobre a forma de corrente elétrica para as diferentes fases.

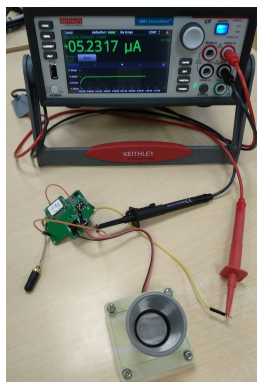
Tabela 21: Teste 2: Consumos das diferentes fases de um ciclo de leitura.

	Consumo médio (mA)	Duração (ms)
Fase 1	1,935	3,938
Fase 2	6,621	193,378
Fase 3	6,173	276,025
Fase 4	7,151	37,369
Fase 5	3,637	96,0
Fase 6	10,385	81,241
Fase 7	1,59	367,399

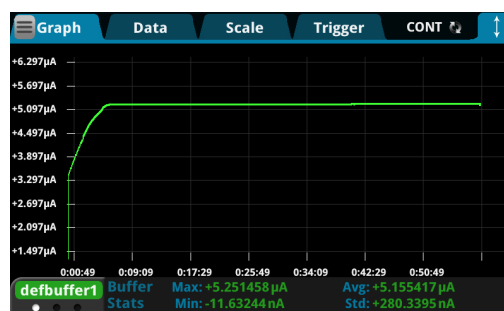
O consumo médio sobre a forma de corrente elétrica de uma aquisição de leitura é de 4,76 mA durante 1,05 s, no pior caso, quando a leitura do nível de enchimento proveniente do sonar não é válida durante a execução do estado de aquisição, este possui um consumo de 5,34 mA com uma duração de 1791,41 ms.

A medição do consumo em *sleep* foi recolhida através de um *Source Meter*, o 2461 SourceMeter da Keithley sendo este configurado para fornecer tensão e medir corrente [54]. A tensão de saída foi configurada para 3,6 V e a escala de medição da corrente foi definida para os 10 μA , possuindo uma resolução de 500 pA. O nó sensor foi configurado para acordar de 8 em 8 horas sem nenhuma funcionalidade uma vez que os picos de corrente iriam interferir com a escala de medição.

Como podemos ver pela figura 86 o valor de corrente instantânea inicial medida é de 3,5 μA , no entanto com o decorrer do tempo este estabiliza nos 5,25 μA após sete minutos de funcionamento.



(a)



(b)

Figura 86: Teste 2: a) Ligações do sistema de teste b) Consumo do nó sensor em *sleep* medido pelo *Source Meter* durante uma hora.

5.2.1 Autonomia teórica do nó sensor

Considerando os resultados obtidos anteriormente e capacidade da pilha escolhida, não é possível verificar empiricamente a autonomia do nó sensor atempadamente, no entanto é possível estimar a autonomia do nó sensor matematicamente. Com base nos resultados obtidos anteriormente é possível calcular do consumo hora do nó sensor através da seguinte fórmula:

$$\text{Consumo}_{AVG}(mAh)_{(N)} = \frac{N * I_{Wake} * t_{Wake}(s) + I_{Sleep} * (3600 - N * t_{Wake}(s))}{3600} \quad (5.1)$$

Considerando o pior caso, em que existe a necessidade de repetir as leituras utilizou-se o I_{wake} com valor de 5,34 mA, o valor de t_{Wake} de 1,791 s sendo o valor de I_{Sleep} de 5,25 μ A.

A autonomia do nó sensor pode ser calculada através da formula 5.2. A pilha primária selecionada Saft LS17500 apresenta uma capacidade de 3600 mAh, esta segundo o seu documento técnico apresenta uma taxa de *self discharge* inferior a 1 % a cada ano, considerou-se um fator de desgaste da bateria de 40 % assumindo uma autonomia superior a esta.

$$\text{Autonomia(Anos)} = \frac{\text{Capacidade}_{Bat}(mAh)}{\text{Consumo}_{AVG}(mAh)_{(N)} * 24 * 365} \quad (5.2)$$

A tabela 22 demonstra a autonomia do nó sensor consoante o número de leituras por hora, como se pode verificar nesta tabela, o nó sensor pode ser configurado para fazer até 3 leituras por hora, cumprindo o requisito especificado no capítulo 3.1. Foram considerados para o cálculo deste os valores para o pior cenário e a bateria primária com uma capacidade de 60 %.

Tabela 22: Teste 2: Autonomia para diferentes amostragens.

Número de leituras/hora	Autonomia (Anos)
1	31,1
2	23,3
3	18,6
4	15,5
5	13,2
6	11,6
7	10,3
9	8,45

5.3 Validação da comunicação com a camada superior

Este teste terá como foco a comunicação entre o coordenador da rede e a camada superior, é esperado que as modificações dos parâmetros de funcionamento exercidas na camada superior tenham efeito no comportamento da rede.

A rede EnOcean encontra-se configurada com dois nós sensores associados ao coordenador da rede. A placa de desenvolvimento EVA320-2 da EnOcean foi utilizada para implementar um nó sensor, foi programada com o mesmo código do nó sensor (tendo sido removida a parte da aquisição do sonar uma vez que só se adquiriu um sensor, o valor transmitido por esta será nulo).

A visualização da comunicação é apresentada através do programa DolphinView e da placa gateway USB300 contida no EDK 300 da EnOcean. É ainda utilizado o *broker* Mosquitto e o programa MQTT Explorer para a visualização dos dados na camada superior.

Na figura 87 podemos ver a troca de telegramas que decorreu ao longo do teste.

Date Time	ID	RORG	Data	dBm	Subtel	DestinationID	Security	TimeDiff.
2021-08-17 15:01:21.977	01004B0B	4BS	FF FF 00 00	-41	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.000
2021-08-17 15:01:22.119	019987E8	SIG	01	-58	1	01004B0B	N/A	00:00:00.000
2021-08-17 15:01:24.908	01A54FEF	4BS	FF FF 00 B1	-45	1	FFFFFFFF	N/A	00:00:00.000
2021-08-17 15:01:25.056	019987E8	SIG	01	-57	1	01A54FEF	N/A	00:00:02.936
2021-08-17 15:02:22.377	01004B0B	4BS	05 37 00 00	-42	1	FFFFFFFF	N/A	00:01:00.400
2021-08-17 15:02:22.512	019987E8	1BS	01	-58	1	01004B0B	N/A	00:00:57.456
2021-08-17 15:02:25.380	01A54FEF	4BS	05 3D 00 B1	-44	1	FFFFFFFF	N/A	00:01:00.472
2021-08-17 15:02:25.534	019987E8	1BS	01	-58	1	01A54FEF	N/A	00:00:03.022
2021-08-17 15:07:25.726	01004B0B	4BS	01 37 20 00	-41	1	FFFFFFFF	N/A	00:05:03.348
2021-08-17 15:07:25.840	019987E8	SIG	01	-57	1	01004B0B	N/A	00:05:00.306
2021-08-17 15:07:28.257	01A54FEF	4BS	01 40 20 B1	-42	1	FFFFFFFF	N/A	00:05:02.876
2021-08-17 15:07:28.389	019987E8	SIG	01	-57	1	01A54FEF	N/A	00:00:02.548
2021-08-17 15:12:27.622	01004B0B	4BS	05 36 20 00	-41	1	FFFFFFFF	N/A	00:05:01.896
2021-08-17 15:12:27.735	019987E8	1BS	02	-57	1	01004B0B	N/A	00:04:59.346
2021-08-17 15:12:30.513	01A54FEF	4BS	05 3D 20 B1	-44	1	FFFFFFFF	N/A	00:05:02.256
2021-08-17 15:12:30.626	019987E8	1BS	02	-57	1	01A54FEF	N/A	00:00:02.890
2021-08-17 15:27:34.259	01004B0B	4BS	01 37 40 00	-41	1	FFFFFFFF	N/A	00:15:06.636
2021-08-17 15:27:34.384	019987E8	SIG	01	-55	1	01004B0B	N/A	00:15:03.757
2021-08-17 15:27:37.310	01A54FEF	4BS	01 3D 40 B2	-42	1	FFFFFFFF	N/A	00:15:06.796
2021-08-17 15:27:37.441	019987E8	SIG	01	-55	1	01A54FEF	N/A	00:00:03.056

Figura 87: Telegramas transmitidos durante o teste 3.

Inicialmente foi ligado o nó coordenador e os dois nós sensores, como se pode ver pela figura 88 a) o nó coordenador liga-se com sucesso ao *broker* MQTT, conseguindo atualizar o tempo de atualização (*connection_rate*) para tempo especificado no tópico *connection_rate* (sendo este de dez minutos), ainda é recebido o valor de *read_rate* que define o ciclo de atualização de todos os nós sensores. O coordenador transmite para o tópico *reads* o ficheiro JSON correspondente à primeira ligação associada ao arranque do sistema.

Como podemos verificar pelo JSON transmitido, o nó coordenador possui dois dispositivos associados,

o *timestamp* transmitido no fuso horário UTC, coincide com o da conversão do *log* uma vez que este encontra-se no formato UTC+1 devido às definições locais da computador.

```

15:00:44.093 [RX] - Init Coordinator!
15:00:46.128 [RX] - Number of learned clients: 2
      Client ID: 0x01004B08
      Controller ID: 0x019987E8
      Client ID: 0x01A54FEF
      Controller ID: 0x019987E8
Connecting to server...
15:01:41.169 [RX] - Connection established!
15:01:46.155 [RX] - Subscribing to
topic/af1/0x09473832373431370040003A/read_rate!
15:01:51.171 [RX] - Subscribing to
topic/af1/0x09473832373431370040003A/connection_rate!
Shutting down!
15:01:59.003 [RX] - Updated connection rate to 10 minutes!
Updating read rate to type 1!
Updating cycle of 0x01004B08 to 1
Updating cycle of 0x01A54FEF to 1
                
```

(a)

```

{
  "time_stamp": "17/08/2021 14:01:52",
  "devices": [
    {
      "id": "0x01004B08",
      "value": ""
    },
    {
      "id": "0x01A54FEF",
      "value": ""
    }
  ]
}
                
```

(b)

Figura 88: Primeira ligação ao *broker* MQTT: *Log* (a) e JSON transmitido (b).

Após a atualização do *read_rate* os dispositivos são atualizados com este valor (que se traduz num ciclo de leitura de 5 minutos) após o processo de *reclaim*.

Como se pode verificar pela figura 89 a atualização ocorre às 15:02 sendo as próximas mensagens recebidas cinco minutos depois, às 15:07.

<pre> 15:02:22.263 [RX] - Client ID: 0x01004B08 Container: 0x00 Read cycle: 0x00 Read: 0 cm RSSI: -55 dbm Read tick: 99498 </pre>	<pre> 15:07:25.636 [RX] - Client ID: 0x01004B08 Container: 0x00 Read cycle: 0x01 Read: 0 cm RSSI: -55 dbm Read tick: 403873 </pre>
<pre> 15:02:25.275 [RX] - Client ID: 0x01A54FEF Container: 0x00 Read cycle: 0x00 Read: 177 cm RSSI: -61 dbm Read tick: 102522 </pre>	<pre> 15:07:28.173 [RX] - Client ID: 0x01A54FEF Container: 0x00 Read cycle: 0x01 Read: 177 cm RSSI: -64 dbm Read tick: 406419 </pre>

Figura 89: *Log* de receção de telegramas após a primeira ligação ao *broker* MQTT.

Recorrendo ao programa MQTT Explorer, modificou-se o tópico *read_rate* para o valor de 2 (que se traduz num ciclo de leitura de 15 minutos) e o tópico *connection_rate* para o valor de 20, através de duas publicações do tipo *retained*. Estas modificações podem ser vistas na figura 90.

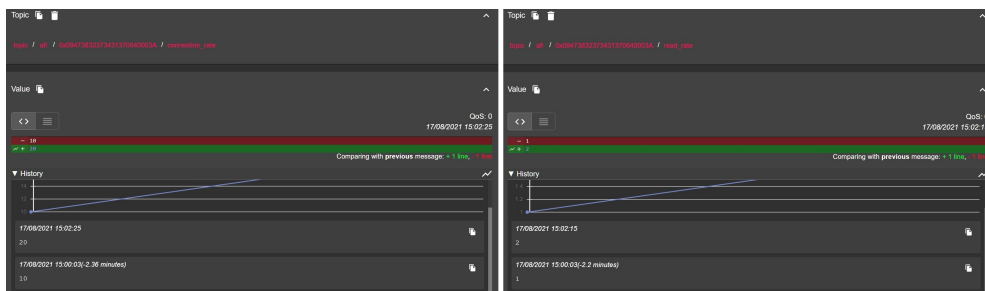


Figura 90: Atualização dos tópicos `/connection_rate` e `/read_rate`.

Após terem decorridos 10 minutos da primeira ligação ao *broker*, o coordenador liga-se novamente ao *broker* MQTT, recebendo os dados acima mencionados e transmitindo o JSON para o tópico reads.

<pre> 15:10:44.127 [RX] - Connecting to server... 15:11:39.153 [RX] - Connection established! 15:11:44.167 [RX] - Subscribing to topic/af1/0x09473832373431370040003A/read_rate! 15:11:49.165 [RX] - Subscribing to topic/af1/0x09473832373431370040003A/connection_rate! Shutting down! 15:11:58.050 [RX] - Updated connection rate to 20 minutes! Updating read rate to type 2! Updating cycle of 0x01004B0B to 2 Updating cycle of 0x01A54FEF to 2 </pre>	<pre> { "time_stamp": "17/08/2021 14:11:49", "devices": [{ "id": "0x01004B0B", "value": "000", "last_read": "17/08/2021 14:07:26", "container_type": "0", "rssi": "-55", "read_cycle": "01" }, { "id": "0x01A54FEF", "value": "177", "last_read": "17/08/2021 14:07:28", "container_type": "0", "rssi": "-64", "read_cycle": "01" }] } </pre>
(a)	(b)

Figura 91: Segunda ligação ao *broker* MQTT: a) Log b) JSON transmitido.

Os valores de *read_rate* são atualizados como se pode verificar pelo campo *read cycle* na figura 92.

<pre> 15:12:27.505 [RX] - Container: 0x00 Read cycle: 0x01 Read: 0 cm RSSI: -54 dbm Read tick: 706780 </pre>	<pre> Client ID: 0x01004B0B </pre>	<pre> 15:27:34.198 [RX] - Container: 0x00 Read cycle: 0x02 Read: 0 cm RSSI: -55 dbm Read tick: 1616333 </pre>	<pre> Client ID: 0x01004B0B </pre>
<pre> 15:12:30.405 [RX] - Container: 0x00 Read cycle: 0x01 Read: 177 cm RSSI: -61 dbm Read tick: 709688 </pre>	<pre> Client ID: 0x01A54FEF </pre>	<pre> 15:27:37.234 [RX] - Container: 0x00 Read cycle: 0x02 Read: 178 cm RSSI: -61 dbm Read tick: 1619398 </pre>	<pre> Client ID: 0x01A54FEF </pre>

Figura 92: Log de receção de telegramas após a segunda ligação ao *broker* MQTT.

Após terem decorridos 20 minutos da segunda ligação ao *broker*, o coordenador liga-se novamente ao *broker*, transmitindo o JSON para o tópico reads. Uma vez que os valores de *connection_rate* e *read_rate* são os mesmos, estes não são atualizados.

<pre> 15:30:40.345 [RX] - Connecting to server... 15:31:35.403 [RX] - Connection established! 15:31:40.389 [RX] - Subscribing to topic/af1/0x09473832373431370040003A/read_rate! 15:31:45.401 [RX] - Subscribing to topic/af1/0x09473832373431370040003A/connection_rate! Shutting down! </pre>	<pre> { "time_stamp": "17/08/2021 14:31:45", "devices": [{ "id": "0x01004B0B", "value": "000", "last_read": "17/08/2021 14:27:34", "container_type": "0", "rssi": "-55", "read_cycle": "02" }, { "id": "0x01A54FEF", "value": "178", "last_read": "17/08/2021 14:27:37", "container_type": "0", "rssi": "-61", "read_cycle": "02" }] } </pre>
(a)	(b)

Figura 93: Terceira ligação ao *broker* MQTT: a) Log b) JSON transmitido.

As publicações para o tópico reads podem ser vistas na figura 94, estas foram recebidas pelo o programa MQTT Explorer, sendo possível verificar que a transmissão por parte do nó coordenador é executada.

```

▼ History
17/08/2021 15:31:46
{"time_stamp":"17/08/2021 14:31:45","devices": [ {"id": "0x01004B0B","value": "000","last_read":"17/08/2021

17/08/2021 15:11:51(-19.93 minutes)
{"time_stamp":"17/08/2021 14:11:49","devices": [ {"id": "0x01004B0B","value": "000","last_read":"17/08/2021

17/08/2021 15:01:52(-9.98 minutes)
{"time_stamp":"17/08/2021 14:01:52","devices": [ {"id": "0x01004B0B","value": ""}, {"id": "0x01A54FEF","value"

```

Figura 94: Receção do JSON por parte do programa MQTT Explorer.

5.4 Medição do tráfego de dados do Nó Coordenador

Recorrendo à plataforma online da *Hologram*, onde é possível verificar o estado dos cartões e toda a telemetria associada à utilização destes, verificou-se o tráfego de dados ocorrido durante o teste demonstrado no capítulo 5.3.

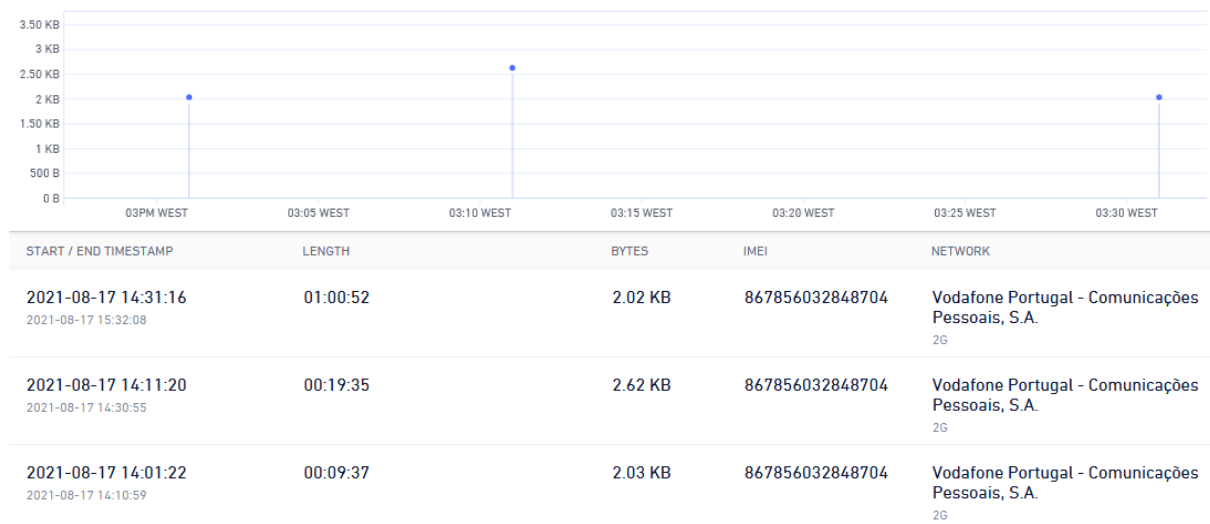


Figura 95: Tráfego de dados.

Como podemos verificar pela figura 95, numa transmissão o consumo máximo de dados foi de 2,62 kB e o consumo mínimo de dados foi de 2,02 kB. Assumindo o consumo máximo e um tempo de atualização de uma hora, um nó coordenador num mês de 31 dias alcançaria um consumo mensal inferior a 2 MB.

5.5 Medição do consumo energético do Nó Coordenador

O nó coordenador é alimentado por uma bateria secundária tendo sido desenvolvido com o foco de ser capaz de recolher energia solar recarregando a bateria sempre que possível, no entanto podem existir dias onde a energia proveniente do sol não é capaz de carregar a bateria, sendo portanto necessário obter um baixo consumo energético mantendo as funcionalidades do nó coordenador.

De forma a estimar a duração da bateria é necessário verificar os consumos energéticos do nó coordenador, verificando se a bateria secundária escolhida foi devidamente dimensionada e se cumpre os requisitos elétricos do sistema. Recorreu-se novamente ao *Source Meter 2461* da Keithley, sendo configurado para medir a intensidade da corrente elétrica e fornecer uma tensão de 4,2 V uma vez que este foi ligado no sitio da bateria. Esta ligação deve-se ao facto de o BQ24073 possuir uma corrente máxima de entrada de 1,5 A, não sendo esta suficiente para as exigências elétricas do SIM800L. A saída do BQ24073 consegue fornecer uma intensidade máxima da corrente de 4,5 A desde que esta seja fornecida pela bateria.

A primeira medição (figura 96) foi executada com o intuito de obter os consumos do sistema na fase ativa, englobando esta duas fases distintas. A primeira (fase de comunicação com a rede) permitiu verificar o consumo do sistema durante uma ligação à rede, nesta fase, o microcontrolador, o *transceiver* EnOcean e o SIM800L encontram-se ativos. Já a segunda permitiu verificar o consumo do sistema durante a fase da comunicação EnOcean, em que o SIM800L se encontra desativado sendo que o microcontrolador e o *transceiver* EnOcean encontram-se ativos.

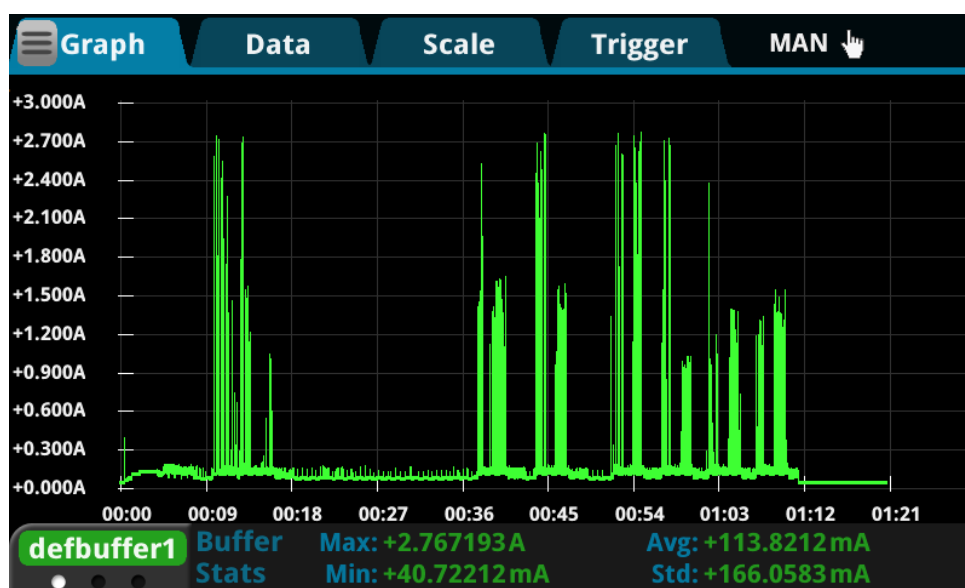


Figura 96: Medição do consumo nas fases de comunicação.

Os dados da figura 96 foram exportados para um ficheiro CSV que permitiu verificar a duração, o consumo médio de corrente e o consumo máximo de corrente nas duas fases supra mencionadas.

Tabela 23: Consumos da fase da comunicação e da fase ativa.

	Duração (s)	Consumo médio (mA)	Consumo máximo (A)
Fase da comunicação da rede	70,84	123,5	2,76
Fase da comunicação EnOcean	9,3	43,79	0,0465

A segunda medição foi executada com o intuito de obter os consumos do sistema na fase *low power*, nesta o *transceiver* EnOcean encontrava-se no modo *sleep*, o microcontrolador no modo *Ultra Low Power Stop Mode* e o SIM800L desativado, foi ainda removido o LED de alimentação dos 3,6 V uma vez que este apenas serve para *debug*.

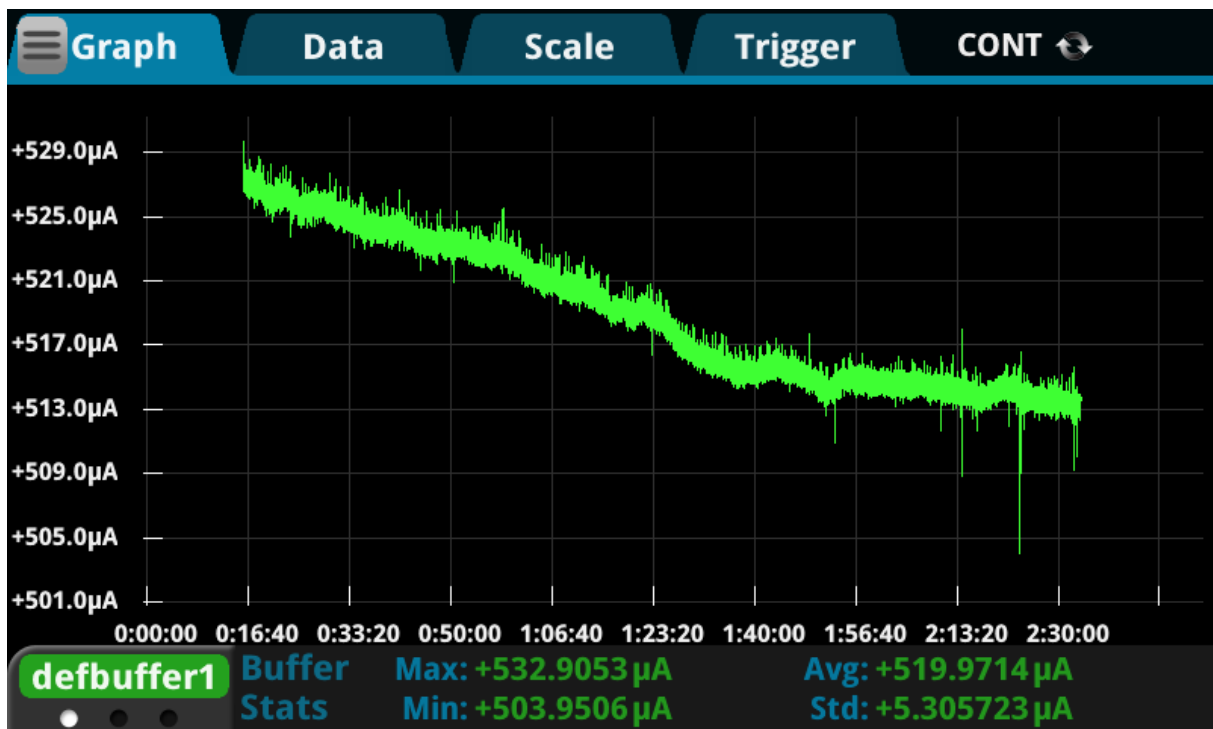


Figura 97: Medição do consumo em *sleep* do nó coordenador.

A medição do consumo no modo *sleep* (figura 97) teve uma duração de duas horas e meia, onde se verificou que o consumo de corrente do nó coordenador no modo *sleep* é inferior a 1 mA, tendo o consumo da corrente estabilizado nos 515 µA.

5.5.1 Autonomia teórica do nó coordenador

Uma vez que podem existir períodos onde a exposição solar pode não ser suficiente para carregar a bateria, é necessário calcular o tempo que esta é capaz de fornecer energia ao sistema sem ser carregada.

Foram utilizados dois cenários:

- 1º Caso - O nó coordenador está configurado para comunicar de hora em hora e constantemente no modo ativo.
- 2º Caso - O nó coordenador está configurado para comunicar de hora em hora, está ativo 5 minutos por cada nó sensor na sua rede (considerando 3 com uma comunicação de hora em hora) estando o restante tempo no modo *sleep*.

Considerando o primeiro caso e os resultados obtidos anteriormente é possível calcular consumo hora do nó coordenador sem a funcionalidade de *sleep* através da seguinte fórmula:

$$Consumo_{AVG}(mAh) = \frac{I_{GSM} * t_{GSM}(s) + I_{Active} * (3600 - t_{GSM}(s))}{3600} \quad (5.3)$$

A bateria recarregável selecionada apresenta uma capacidade de 8000 mAh, considerou-se ainda um fator de desgaste da bateria de 10 % uma vez que não foi possível auferir no documento técnico a taxa de *self discharge*. A autonomia do nó coordenador pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$Autonomia(Dias) = \frac{Capacidade_{Bat}(mAh)}{Consumo_{AVG}(mAh) * 24} \quad (5.4)$$

Calculando o consumo médio do nó coordenador através da fórmula 5.3, verifica-se que este é de 45,35 mAh que se traduz na autonomia de 6,61 dias (recorrendo à fórmula 5.4).

Considerando o segundo caso e os resultados anteriormente recolhidos, é possível calcular o consumo médio por hora do nó coordenador através da seguinte fórmula:

$$\begin{cases} t_{Active} = 3 * 5 * 60 \\ t_{Sleep} = 3600 - t_{Active} - t_{GSM} \\ Consumo_{AVG}(mAh) = \frac{I_{GSM} * t_{GSM}(s) + I_{Active} * t_{Active}(s) + I_{Sleep} * t_{Sleep}(s)}{3600} \end{cases} \quad (5.5)$$

Calculando, através da fórmula 5.3, o consumo médio do nó coordenador com a funcionalidade de *sleep*, verifica-se que este é de 6,54 mAh que se traduz na autonomia de 45,86 dias (recorrendo à fórmula 5.4).

Desta forma é possível verificar que a bateria tem capacidade de alimentar o sistema durante mais de seis dias sem a funcionalidade de *sleep* quando habilitado este modo, o sistema de alimentação é capaz de fornecer energia durante mais de quarenta e cinco dias.

5.6 Validação do MPPC do circuito de *energy harvesting*

O circuito integrado LTC3130 é responsável pela extração da energia do painel solar, este possui uma funcionalidade de Maximum Power Point Controller. É com esta funcionalidade que sistema extrai a potência máxima disponível de um painel solar.

De forma a validar esta funcionalidade ligou-se a um potenciômetro de $50\ \Omega$ em série com a entrada LTC3130 que está configurado com os parâmetros especificados em 4.2.4.2 sendo ligado à sua saída uma resistência de $51,1\ \Omega$. Este circuito foi alimentado com uma tensão de 6 V.

Variou-se o valor resistivo do potenciômetro de forma a simular a falta de radiância do painel solar. Recorreu-se a um osciloscópio digital de dois canais para verificar a tensão no pino MPPC e o valor da tensão no pino de saída do LTC3130, resultando na captura da imagem da figura 98.

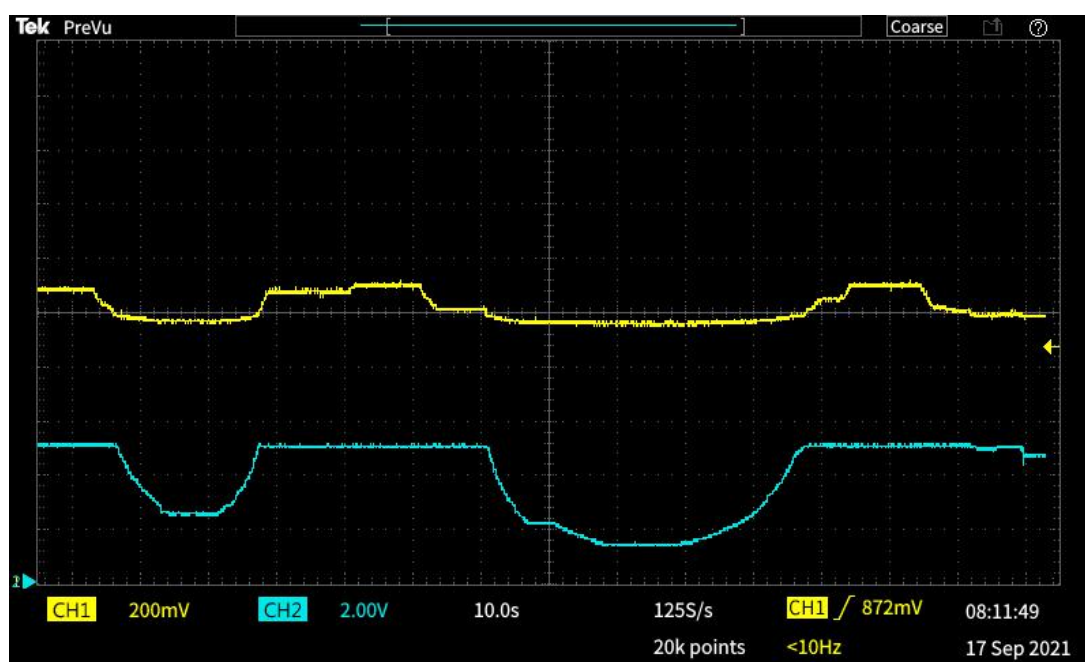


Figura 98: Teste MPPC: Variação da tensão V_{MPPC} e da tensão V_{LTCOut}

Na figura 98, o canal um (representado pela linha amarela e com uma escala de 200 mV) exibe a tensão no pino MPCC (V_{MPPC}) enquanto que o canal dois (representado pela linha azul e com uma escala de 2 V) exibe a tensão de saída do LTC3130 (V_{LTCOut}). Como se pode verificar sempre que a tensão de V_{MPPC} fica com o valor inferior a 1 V, a tensão (V_{LTCOut}) é reduzida de forma a que a carga consuma menos potência, quando a tensão V_{MPPC} possui um valor igual ou superior a 1 V o LTC3130 apresenta à sua saída a tensão definida (5 V).

Na figura 99, o canal um (representado pela linha amarela e com uma escala de 200 mV) exibe a tensão no pino MPCC (V_{MPPC}) enquanto que o canal dois (representado pela linha azul e com uma escala de 1 V) exibe a tensão de entrada do LTC3130 (V_{LTCin}).

Como se pode verificar sempre que a tensão de V_{MPPC} fica com o valor inferior a 1 V, a tensão V_{LTCIn} é mantida nos 5,2 V uma vez que o sistema não se encontra a produzir energia suficiente para a carga. Quando a tensão V_{MPPC} possui um valor igual a 1 V o LTC3130 apresenta à sua entrada a tensão definida de 5,4 V e à sua saída a tensão definida de 5 V, neste ponto o sistema encontra-se a extrair a potência necessária para a sua carga. Quando a tensão de V_{MPPC} é superior a 1 V, significa que há um excedente de energia, ou seja, o painel produz mais energia do que é necessário, neste caso o LTC3130 sobe a sua tensão de entrada.

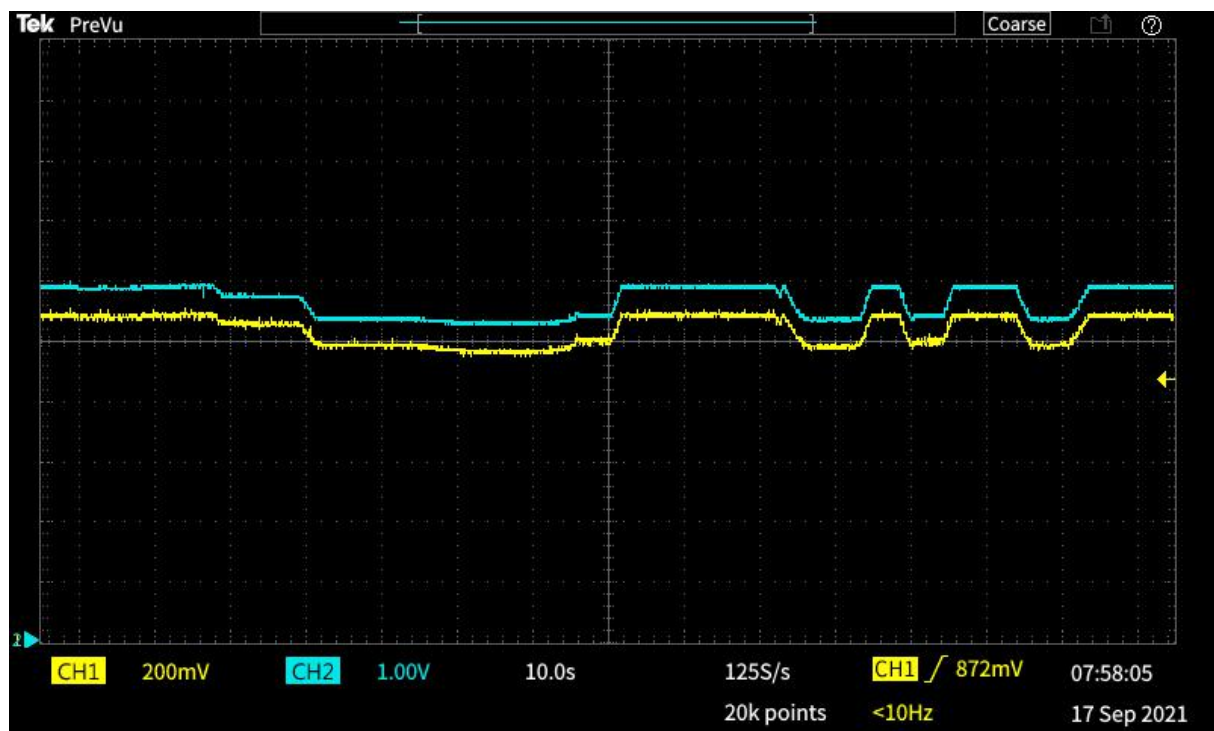


Figura 99: Teste MPPC: Variação de V_{MPPC} e de V_{LTCIn}

Para além das imagens recolhidas também foram recolhidos os valores da corrente de entrada (I_{In}),

da tensão de entrada do LTC3130 ($V_{LTC_{In}}$), da tensão de MPPC (V_{MPPC}) e da tensão de saída do LTC3130 ($V_{LTC_{Out}}$). Através dos valores recolhidos foi possível obter o valor da resistência em série com o LTC3130 (R_p), o valor da potência à saída do LTC3130 (P_{Out}) e a eficiência da conversão. Estes valores encontram-se tabulados na tabela 24.

A resistência aplicada à saída do LTC3130 apresenta um valor de 51,1 Ω , para a tensão definida de 5V, a potência consumida será de 0,489 W. Tendo em consideração os resultados obtidos e as tolerâncias das resistências utilizadas para a definição da tensão de MPPC e da tensão de saída, podemos concluir que a partir da medição 17 o sistema já possui potência necessária para a carga. No entanto nas medições de 1 a 16 o sistema não possuía a potência necessária, sendo necessário adaptar a potência da carga (P_{Out}) de forma a manter $V_{LTC_{In}}$ dentro da tensão de MPPC configurada.

De realçar que a partir do momento em que a tensão de entrada sobe para lá do valor de tensão MPPC definido, a corrente consumida baixa e a potência se mantém.

Tabela 24: Valores do teste de funcionamento do MPPC.

Medição	R_p (Ω)	I_{In} (A)	$V_{LTC_{In}}$ (V)	V_{MPPC} (V)	$V_{LTC_{Out}}$ (V)	P_{Out} (W)	Eficiência (%)
1	32,417	0,0240	5,222	0,966	2,032	0,081	64,473
2	29,769	0,0260	5,226	0,967	2,207	0,095	70,152
3	25,633	0,0300	5,231	0,968	2,403	0,113	72,008
4	22,471	0,0340	5,236	0,969	2,611	0,133	74,940
5	19,947	0,0380	5,242	0,970	2,804	0,154	77,242
6	18,825	0,0400	5,247	0,971	3,001	0,176	83,973
7	16,556	0,0450	5,255	0,974	3,203	0,201	84,900
8	14,720	0,0500	5,264	0,976	3,402	0,226	86,052
9	13,143	0,0560	5,264	0,978	3,601	0,254	86,084
10	11,934	0,0610	5,272	0,981	3,806	0,283	88,148
11	10,449	0,0690	5,279	0,984	4,034	0,318	87,428
12	9,560	0,0750	5,283	0,985	4,202	0,346	87,207
13	8,671	0,0820	5,289	0,987	4,423	0,383	88,273
14	7,944	0,0890	5,293	0,990	4,609	0,416	88,247
15	7,133	0,0980	5,301	0,992	4,825	0,456	87,698
16	6,881	0,1010	5,305	0,993	4,905	0,471	87,872
17	6,680	0,1030	5,312	0,995	4,958	0,481	87,922
18	5,882	0,1020	5,400	1,011	4,984	0,486	88,255
19	4,970	0,1000	5,503	1,029	4,987	0,487	88,442
20	3,990	0,0980	5,609	1,047	4,988	0,487	88,577
21	3,072	0,0970	5,702	1,064	4,988	0,487	88,030
22	2,084	0,0950	5,802	1,081	4,993	0,488	88,512
23	0,968	0,0930	5,910	1,101	4,994	0,488	88,799

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são abordadas as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido, sendo executada uma análise dos objetivos propostos da dissertação em questão, os resultados da mesma sendo o resultado do nó sensor comparado com a interação anterior [3]. No final são ainda abordados que pontos se podem melhorar no nó sensor, no nó coordenador e na camada superior.

6.1 Conclusões

Desta dissertação resulta a conceção, desenvolvimento e produção de um nó sensor e de um nó coordenador, seguindo uma arquitetura modular e escalável.

O nó sensor desenvolvido cumpre com todos os requisitos, restrições e objetivos especificados. Este é alimentado por uma bateria primária, tendo o nó sensor uma autonomia superior a 30 anos, mais de cinco vezes superior ao seu antecessor e o dobro do requisitado. Este dispositivo comunica as leituras periodicamente com o coordenador através do protocolo ERP utilizando a especificação SmartAck da EnOcean. A eletrónica desenvolvida encontra-se devidamente condicionada num invólucro IP67, garantido os níveis de estanquidade requisitados, o invólucro também garante que este possa ser instalado em qualquer tipo de contentor.

O nó coordenador desenvolvido cumpre com todos os requisitos e restrições, cumprindo a maioria dos objetivos à exceção da redundância de comunicação através da utilização de SMS. Este é auto-suficiente, recorrendo a um painel solar e a um circuito integrado que permite extrair a potência máxima disponível, fornecendo energia ao sistema e carregando a bateria. Esta quando está totalmente carregada pode aguentar 6 dias a fornecer energia sem ser recarregada. O nó coordenador é capaz de comunicar com a camada superior através da *internet* e com os nós sensores através do protocolo ERP utilizando a especificação SmartAck da EnOcean. A eletrónica desenvolvida encontra-se devidamente condicionada

num invólucro IP67, garantido os níveis de estanquidade requisitados, o invólucro também garante que este seja de fácil instalação.

6.2 Trabalho Futuro

O nó sensor, aquando a ativação do sonar, apresenta um transiente de corrente elétrica elevado, desta forma, uma melhoria futura passa pela substituição do circuito de ativação por um LDO de 3,3 V com a funcionalidade de *soft-start* e um pino de *enable*, este LDO deverá ainda apresentar um consumo de *low power* quando desativado.

Relativamente ao *software* presente no nó sensor, este cumpre com todos os requisitos propostos, no entanto os telegramas transmitidos por este não são seguros, tornando o nó sensor suscetível a ataques de *eavesdropping* e de repetição. Esta vulnerabilidade é ultrapassada com técnicas de encriptação e de autenticação que podem ser implementadas recorrendo à biblioteca *security* (fornecida na API da EnOcean) que possui as estruturas de dados e os algoritmos necessários para gerir a encriptação/desencriptação, a autenticação de telegramas e a gestão do *rolling code*.

O nó coordenador desenvolvido possui uma falha no sistema de alimentação, a saída do BQ24073 quando alimentada pela bateria, fornece a tensão da mesma. Esta tensão varia dos 4,2 V aos 2,5 V sendo que o LDO de 3,6 V do EnOcean e do microcontrolador STM necessita de ser trocado por um Buck-Boost devidamente dimensionado. Ainda no sistema de alimentação do nó coordenador, este não sabe a carga presente na bateria e se esta é suficiente para iniciar uma transmissão para a camada superior, desta forma será vantajosa a adição de um *fuel gauge* que permita saber o estado da bateria.

O levantamento do requisito da utilização do SIM800 será uma mais valia visto que existem soluções de comunicação mais atrativas a nível energético, como o NB-IoT e o LoRa. A utilização de diferentes tecnologias de comunicação oferecerá a redundância desejada e flexibilidade tecnológica ao nó coordenador. Estes módulos também podem conter um formato de ligação Mini PCI-E que permite uma maior flexibilidade, não sendo necessário redesenhar o hardware quando se pretender trocar de módulo.

No que diz respeito ao *software* presente no nó coordenador, sugere-se que sejam implementadas as rotinas de *low power* contidas no microcontrolador e no EnOcean, uma vez que, como se pôde verificar no capítulo 5.5.1, a autonomia deste pode aumentar em cerca de sete vezes. No seguimento do *software* do nó coordenador, também se sugere a implementação de um sistema operativo de tempo real (como o ThreadX ou o FreeRTOS) no nó coordenador já que estes oferecem as *stacks* de comunicação necessárias, permitindo assim um rápido desenvolvimento.

Relativamente à camada superior será vantajoso o desenvolvimento de um *broker* MQTT dedicado que possua mecanismos de encriptação e de autenticação, e de uma plataforma que permita visualizar estes os dados provenientes dos nós sensores.

Por último, é relevante avaliar o comportamento da rede e dos seus elementos em cenários reais, através da sua instalação numa ilha ecológica e o nó coordenador numa estrutura com exposição solar. Apesar de até ao momento terem sido efetuados testes com dois nós sensores (sendo um deles uma placa de desenvolvimento), revela-se importante testar o nó coordenador numa rede com mais elementos, validando totalmente o hardware e software dos dois tipos de nós nas diversas condições ambiente a que estes poderão estar sujeitos.

Bibliografia

- [1] S. Das e B. K. Bhattacharyya. “Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes”. Em: *Waste Management* 43 (2015), pp. 9–18. issn: 18792456. doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.033. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X15004432>.
- [2] E. C. Rada, M. Ragazzi e P. Fedrizzi. “Web-GIS oriented systems viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transient economies”. Em: *Waste Management* 33.4 (2013), pp. 785–792. issn: 0956053X. doi: 10.1016/j.wasman.2013.01.002. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X1300007X?via%3Dihub>.
- [3] T. M. R. Gomes. *WECO - wireless ecoponto*. 2011. url: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/20190>.
- [4] N. V. Karadimas, K. Papatzelou e V. G. Loumos. “Optimal solid waste collection routes identified by the ant colony system algorithm”. Em: *Waste Management and Research* 25.2 (2007), pp. 139–147. issn: 0734242X. doi: 10.1177/0734242X07071312. url: <http://wmr.sagepub.com/cgi/content/abstract/25/2/139>.
- [5] –. *Ecopontos existentes em Portugal continental*. url: <http://www.ersar.pt/pt/site-setor/site-factos-e-numeros/Paginas/Facto-12.aspx> (acedido em 24/04/2021).
- [6] –. *SOMA Home*. url: <https://www.soma.pt/#produtos> (acedido em 03/07/2021).
- [7] –. *waste management solution in voluntary contribution collection optimisation*. url: <https://www.bh-technologies.com/environment-solutions-products/?lang=en> (acedido em 03/07/2021).
- [8] –. *LASSO :: Monitorização do nível de enchimento*. url: <http://www.sopsa.pt/pt/node/732> (acedido em 03/07/2021).

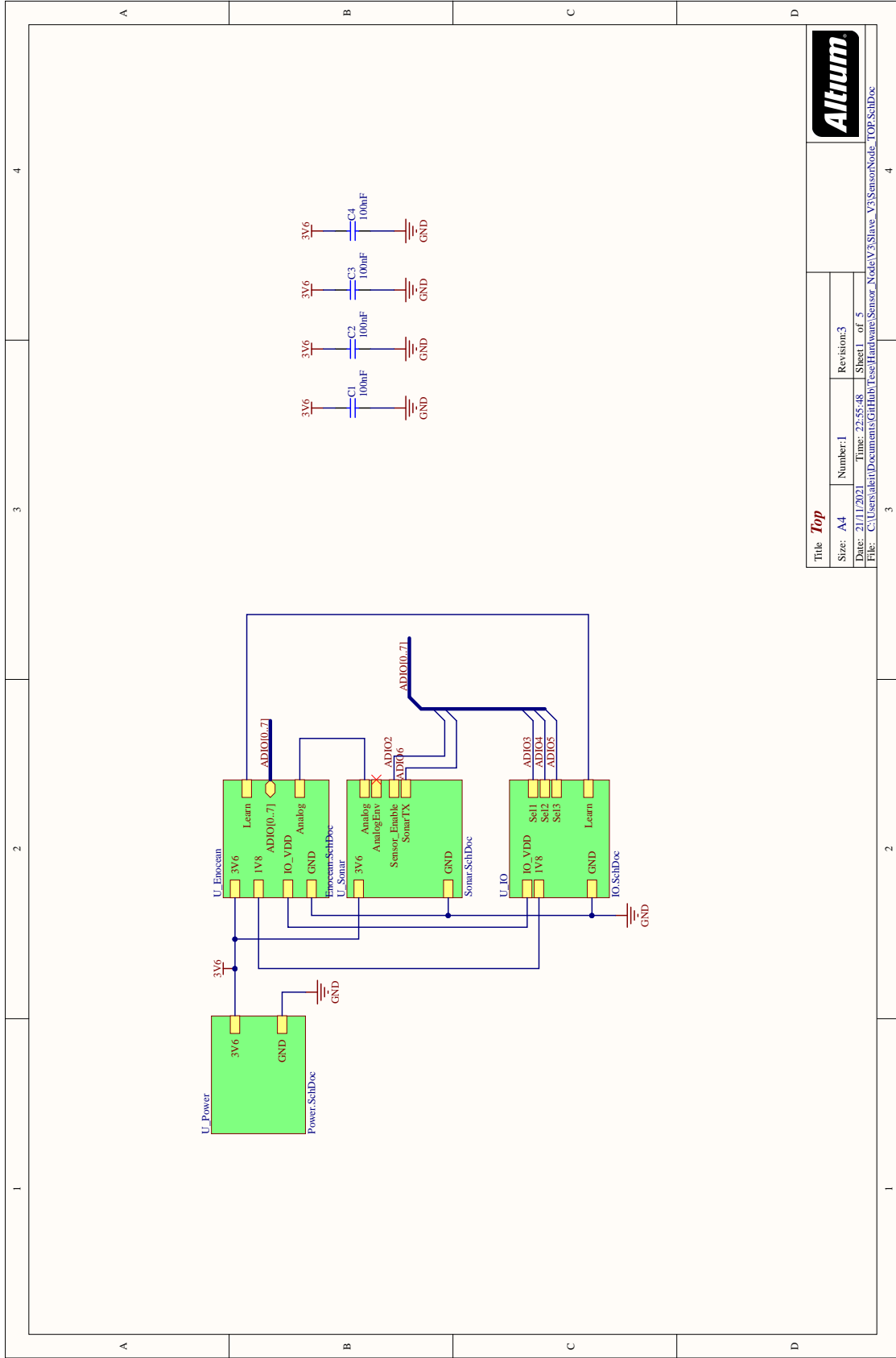
- [9] -. *Bee2Waste - Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos - digital for people*. url: <https://www.future-compta.com/digital-products/bee2waste/> (acedido em 04/07/2021).
- [10] R. Baheti e H. Gill. "Cyber-physical systems". Em: *Impact Control Technol* 12 (2011), pp. 1–6. url: <http://ieeecss.org/sites/ieeecss/files/2019-07/loCT-Part3-02CyberphysicalSystems.pdf>.
- [11] R. Poovendran. "Cyber-physical systems: Close encounters between two parallel worlds". Em: *Proceedings of the IEEE* 98.8 (2010), pp. 1363–1366. issn: 00189219. doi: 10.1109/JPROC.2010.2050377.
- [12] P. Mell e T. Grance. *The NIST definition of cloud computing*. Rel. téc. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards e Technology, 2011, pp. 171–173. doi: 10.1016/b978-0-12-804018-8.15003-x. url: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>.
- [13] D. Namiot e M. Sneps-Snepe. "'On microservices Architecture" International journal of open information technologies." Em: *International Journal of Open Information Technologies* 2.9 (2014), pp. 24–27. issn: 2307-8162. url: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/139>.
- [14] J. Clover. *Microservices are hard — an invaluable guide to microservices*. | *Hacker Noon*. url: <https://hackernoon.com/microservices-are-hard-an-invaluable-guide-to-microservices-2d06bd7bcf5d> (acedido em 24/04/2021).
- [15] -. *EnOcean Radio Protocol 2, Version 1.3*. 2017. url: https://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/pdf/tec_docs/EnOceanRadioProtocol2.pdf.
- [16] -. *EnOcean Radio Protocol 1*. 2013. url: https://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/pdf/tec_docs/EnOceanRadioProtocol1.pdf.
- [17] -. *System Specification Smart Acknowledge Specification v1.7*. url: https://www.enocean-alliance.org/wp-content/uploads/2020/04/SmartAcknowledge_Specification_v1.7.pdf (acedido em 10/11/2021).
- [18] -. *System Specification EnOcean Equipment Profiles EnOcean Equipment Profiles V 3.1*. 2019. (Acedido em 10/06/2021).
- [19] -. *EnOcean Serial Protocol 3 (ESP3)*. url: https://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/pdf/tec_docs/EnOceanSerialProtocol3.pdf.
- [20] -. *Dolphin API Manual*. url: <https://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/support/dolphin-api/index.html> (acedido em 10/06/2021).

- [21] K. Calautit, D. S. Nasir e B. R. Hughes. “Low power energy harvesting systems: State of the art and future challenges”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 147 (2021), p. 111230. issn: 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2021.111230. url: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032121005177>.
- [22] M. Cansiz, D. Altinel e G. K. Kurt. *Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review*. 2019. doi: 10.1016/j.energy.2019.02.100.
- [23] A. Harb. “Energy harvesting: State-of-the-art”. Em: *Renewable Energy* 36.10 (2011), pp. 2641–2654. issn: 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2010.06.014.
- [24] I. Maghami et al. “Exploring the complementary relationship between solar and hydro energy harvesting for self-powered water monitoring in low-light conditions”. Em: *Environmental Modelling and Software* 140 (2021). issn: 13648152. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105032. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481522100075X>.
- [25] P. De Mil et al. “Design and implementation of a generic energy-harvesting framework applied to the evaluation of a large-scale electronic shelf-labeling wireless sensor network”. Em: *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking* 2010 (2010). issn: 16871472. doi: 10.1155/2010/343690.
- [26] G. L. Soloveichik. *Flow Batteries: Current Status and Trends*. 2015. doi: 10.1021/cr500720t.
- [27] P. Simon e Y. Gogotsi. *Materials for electrochemical capacitors*. 2008. doi: 10.1038/nmat2297. url: <https://www.nature.com/articles/nmat2297>.
- [28] K. Z. Panatik et al. “Energy harvesting in wireless sensor networks: A survey”. Em: *2016 IEEE 3rd International Symposium on Telecommunication Technologies, ISTT 2016*. Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 53–58. isbn: 9781509054312. doi: 10.1109/ISTT.2016.7918084.
- [29] R. J. Vullers et al. “Micropower energy harvesting”. Em: *Solid-State Electronics* 53.7 (2009), pp. 684–693. issn: 00381101. doi: 10.1016/j.sse.2008.12.011.
- [30] –. *MQTT: The Standard for IoT Messaging*. 2021. url: <https://mqtt.org/> (acedido em 18/08/2021).
- [31] –. *MQTT Protocol - Messaging and Data Exchange for the IoT*. 2018. url: <https://www.hivemq.com/mqtt-protocol/> (acedido em 18/08/2021).
- [32] –. *Quality of Service 0,1 and 2 - MQTT Essentials: Part 6*. 2015. url: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-6-mqtt-quality-of-service-levels/> (acedido em 18/08/2021).

- [33] -. *The JSON Data Interchange Format*. 2013. url: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf> (acedido em 18/08/2021).
- [34] -. *Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Codes)*. Vol. Ed. 2.1. 2001, pp. 1–3. isbn: 9782832214923. url: <http://www.dsmt.com/pdf/resources/iprating.pdf>.
- [35] -. *Eclipse Mosquito*. 2018. url: <https://mosquito.org/> (acedido em 25/04/2021).
- [36] -. *MaxBotix ® Inc. XL-MaxSonar ®-WR/WRC™ Series XL-MaxSonar ®-WR/WRC™ Series*. 2005. url: https://www.maxbotix.com/documents/XL-MaxSonar-WR_Datasheet.pdf (acedido em 08/05/2021).
- [37] -. *EnOcean TCM 515 User Manual*. url: https://www.enocean.com/en/products/enocean_modules/tcm-515/user-manual-pdf/ (acedido em 10/06/2021).
- [38] -. *Using TCM 310 transceivers in bidirectional low power applications*. url: https://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/pdf/app_notes/AN409_TCM_devices_in_low_power_applications_Jun_15.pdf.
- [39] -. *LS, LSH | Saft Batteries | We energize the world*. url: <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/ls-lsh-lsp> (acedido em 30/05/2021).
- [40] -. *SIM800 Hardware Design V1.08*. 2015. url: https://simcom.ee/documents/SIM800/SIM800_HardwareDesign_V1.08.pdf (acedido em 10/06/2021).
- [41] -. *SIM800 Series AT Command Manual*. 2013. (Acedido em 10/06/2021).
- [42] -. *Cortex-M0+ – Arm Developer*. 2020. url: <https://developer.arm.com/ip-products/processors/cortex-m/cortex-m0-plus> (acedido em 11/06/2021).
- [43] -. *Xinpuguang 6v 4 w impermeável bateria solar trickle carregador 4 watts de vidro painel solar carga solar | Células solares | - AliExpress*. url: https://pt.aliexpress.com/item/1005002100303933.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.4cd765deHICXT6&algo_pvid=4dba4dad-b9a3-4d88-af09-341d6c49ff38&algo_exp_id=4dba4dad-b9a3-4d88-af09-341d6c49ff38-0 (acedido em 12/06/2021).
- [44] -. *What are Standard Test Conditions (STC)*. 2020. url: <https://www.siliconsolar.com/what-are-standard-test-conditions-stc/> (acedido em 12/06/2021).

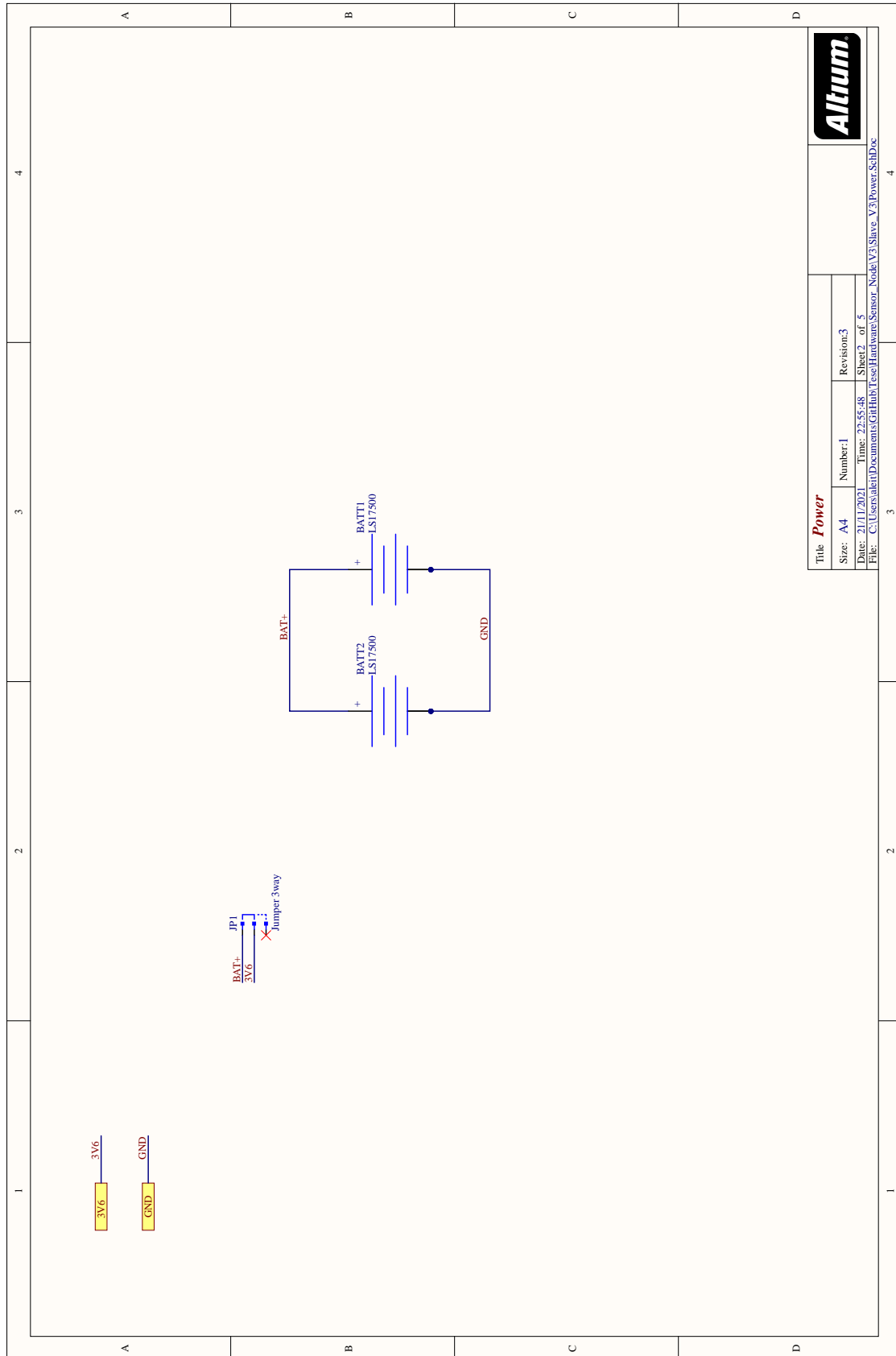
-
- [45] T. Barcelo. *Techniques to Maximize Solar Panel Power Output*. 2019. url: <https://www.analog.com/en/technical-articles/techniques-to-maximize-solar-panel-power-output.html> (acedido em 12/06/2021).
- [46] -. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) | EU Science Hub*. 2021. url: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (acedido em 06/07/2021).
- [47] -. *LTC3130 Datasheet and Product Info | Analog Devices*. url: <https://www.analog.com/en/products/ltc3130.html> (acedido em 12/06/2021).
- [48] P. Keil e A. Jossen. "Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life-An experimental study with different 18650 high-power cells". Em: *Journal of Energy Storage* 6 (2016), pp. 125–141. issn: 2352152X. doi: 10.1016/j.est.2016.02.005.
- [49] -. *BQ24073 data sheet, product information and support | TI.com*. url: <https://www.ti.com/product/BQ24073> (acedido em 21/06/2021).
- [50] -. *TPS61022 data sheet, product information and support | TI.com*. url: <https://www.ti.com/product/TPS61022> (acedido em 25/06/2021).
- [51] -. *TLV700 data sheet, product information and support | TI.com*. url: <https://www.ti.com/product/TLV700?36> (acedido em 25/06/2021).
- [52] -. *1554F2GYCL - Hammond Mfg*. url: <https://www.hammmfg.com/part/1554F2GYCL> (acedido em 24/06/2021).
- [53] -. *DMM7510 | Tektronix*. url: <https://www.tek.com/tektronix-and-keithley-digital-multimeter/dmm7510#> (acedido em 23/10/2021).
- [54] -. *2461 SourceMeter SMU Instrument*. url: <https://www.tek.com/datasheet/2461-graphical-source-measure-unit> (acedido em 23/10/2021).

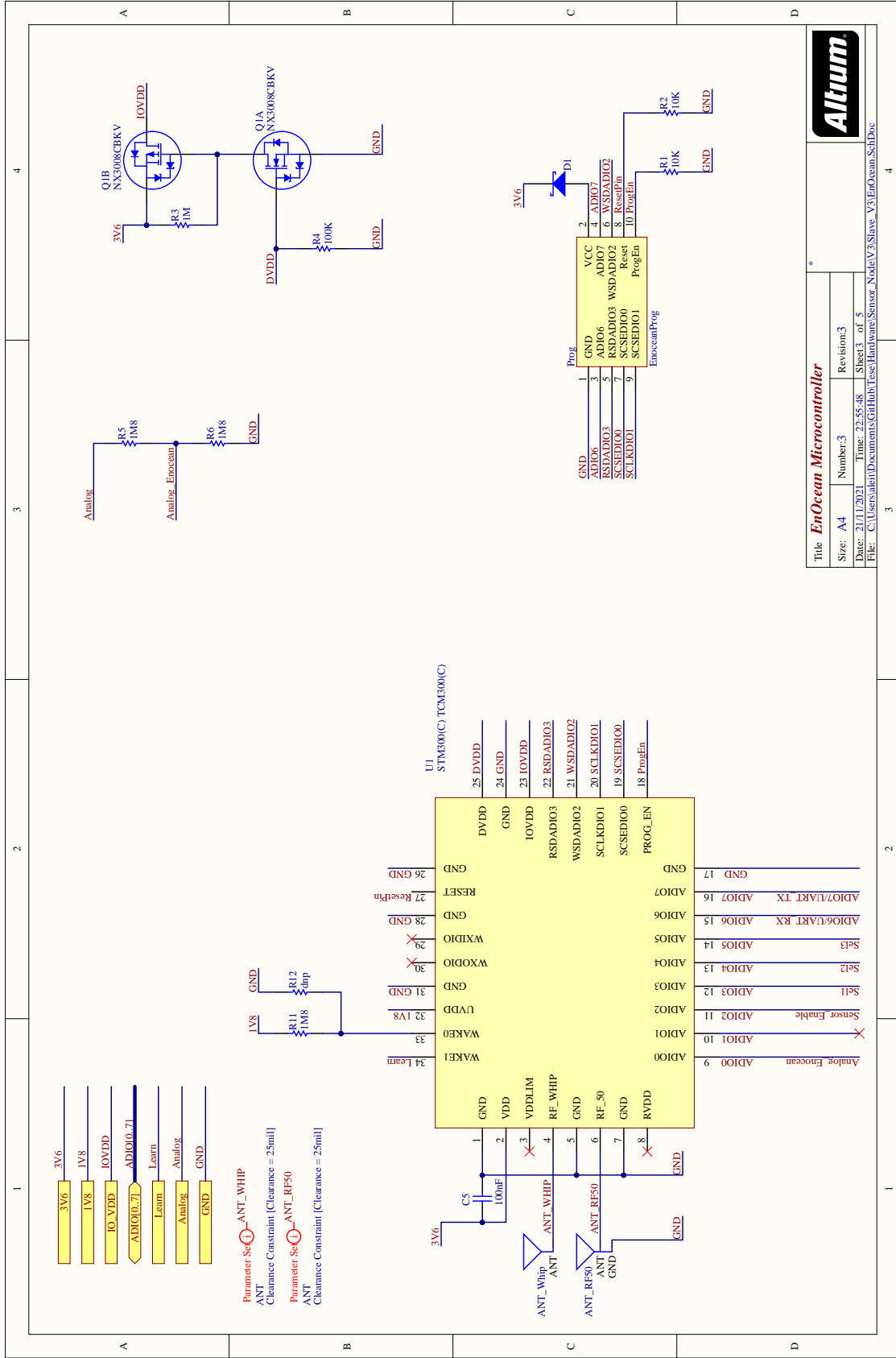
Esquemáticos da PCB do Nó Sensor



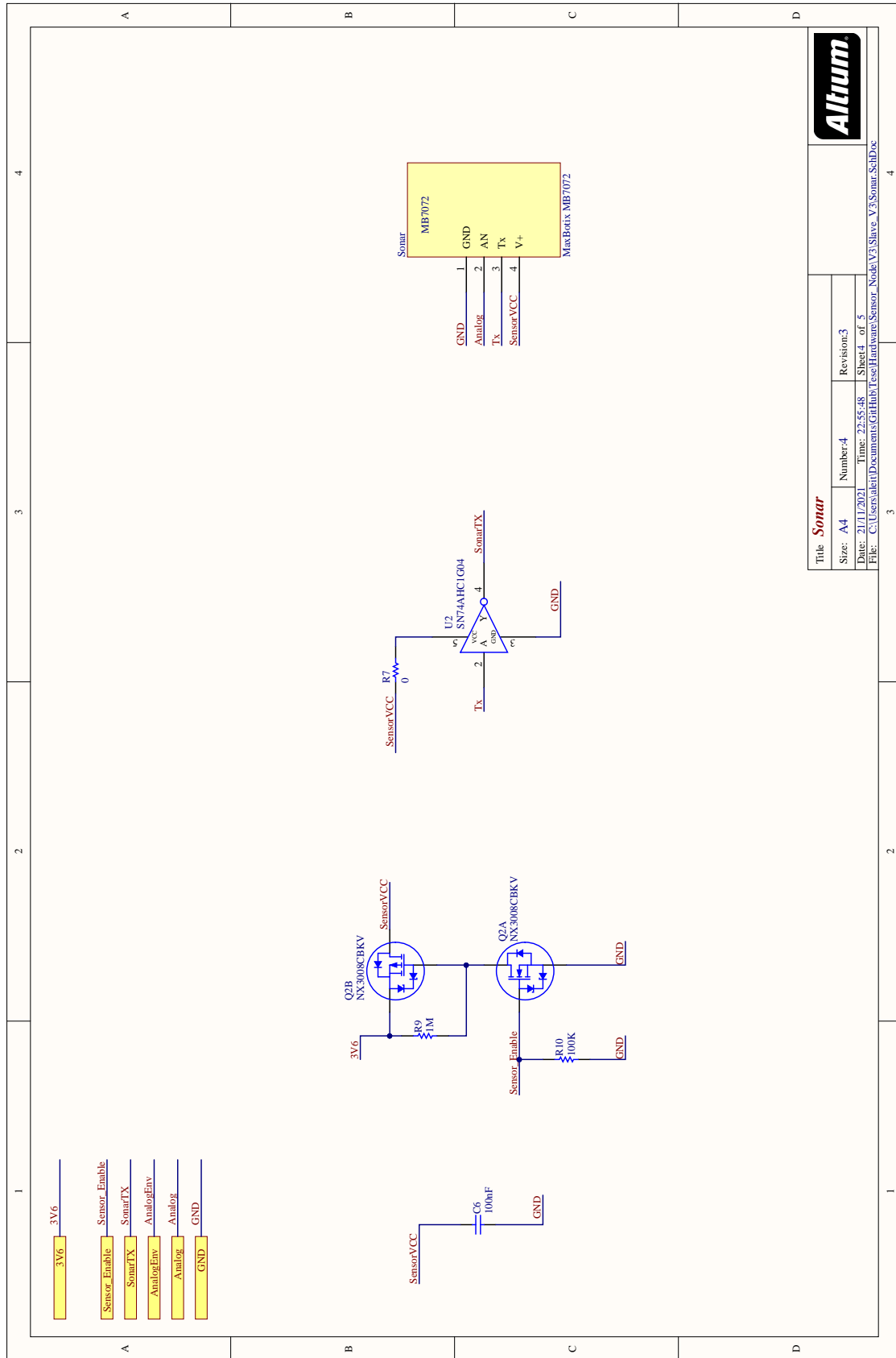
Altium	
Top	
Title	Revision:3
Size: A4	Number:1
Date: 21/11/2021	Time: 22:55:48
Sheet 1 of 5	
File: C:\Users\aleff\Documents\GH\Hub\Tese\Hardware\Sensor_Node\V3\SensorNode_Top.SchDoc	

ANEXO I. ESQUEMÁTICOS DA PCB DO NÓ SENSOR



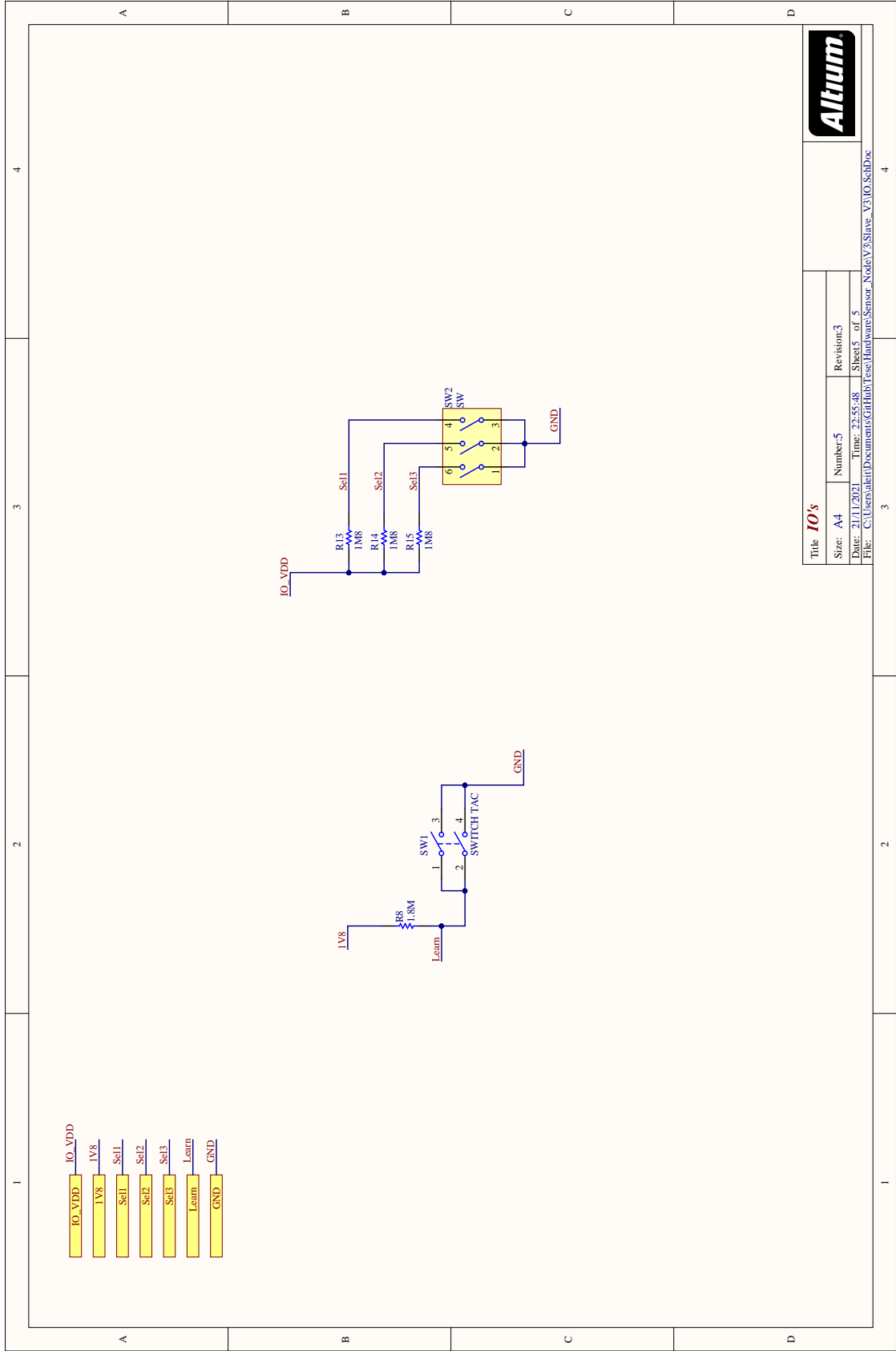


ANEXO I. ESQUEMÁTICOS DA PCB DO NÓ SENSOR



Title Sonar		Revision: 3	
Size: A4	Number: 4	Time: 22:55:48	Sheet 4 of 5
Date: 21/11/2021			
File: C:\Users\aleff\Documents\GitHub\Tese\Hardware\Sensor_Node\V3\Sonar_SchDoc			

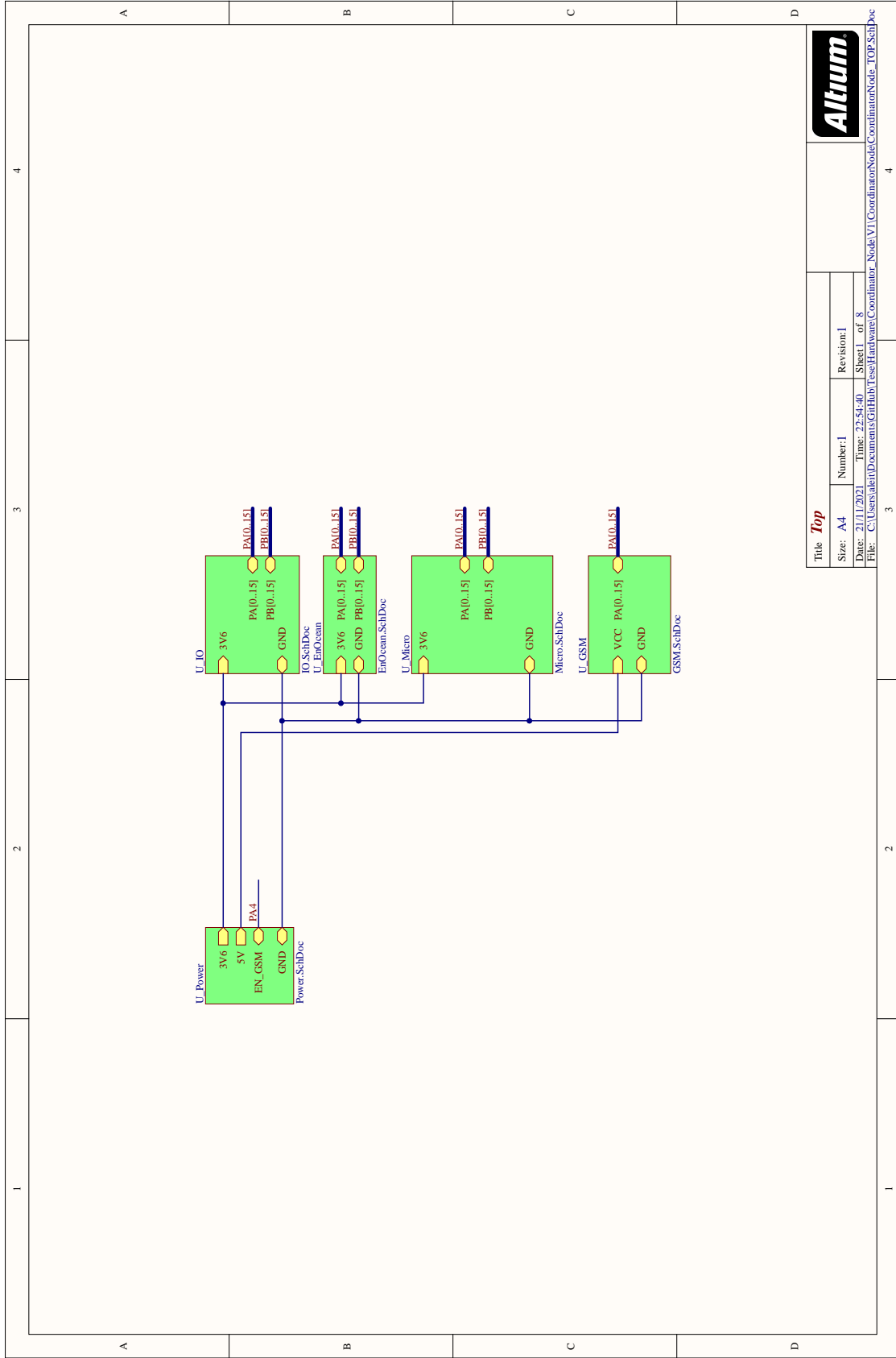




Title: IO's	
Size: A4	Number: 5
Date: 21/11/2021	Revision: 3
Time: 22:55:48	Sheet 5 of 5
File: C:\Users\aleff\Documents\GHI\Hub\Tese\Hardware\Sensor_Node\V3\Slave_V3\IO_SchDoc	

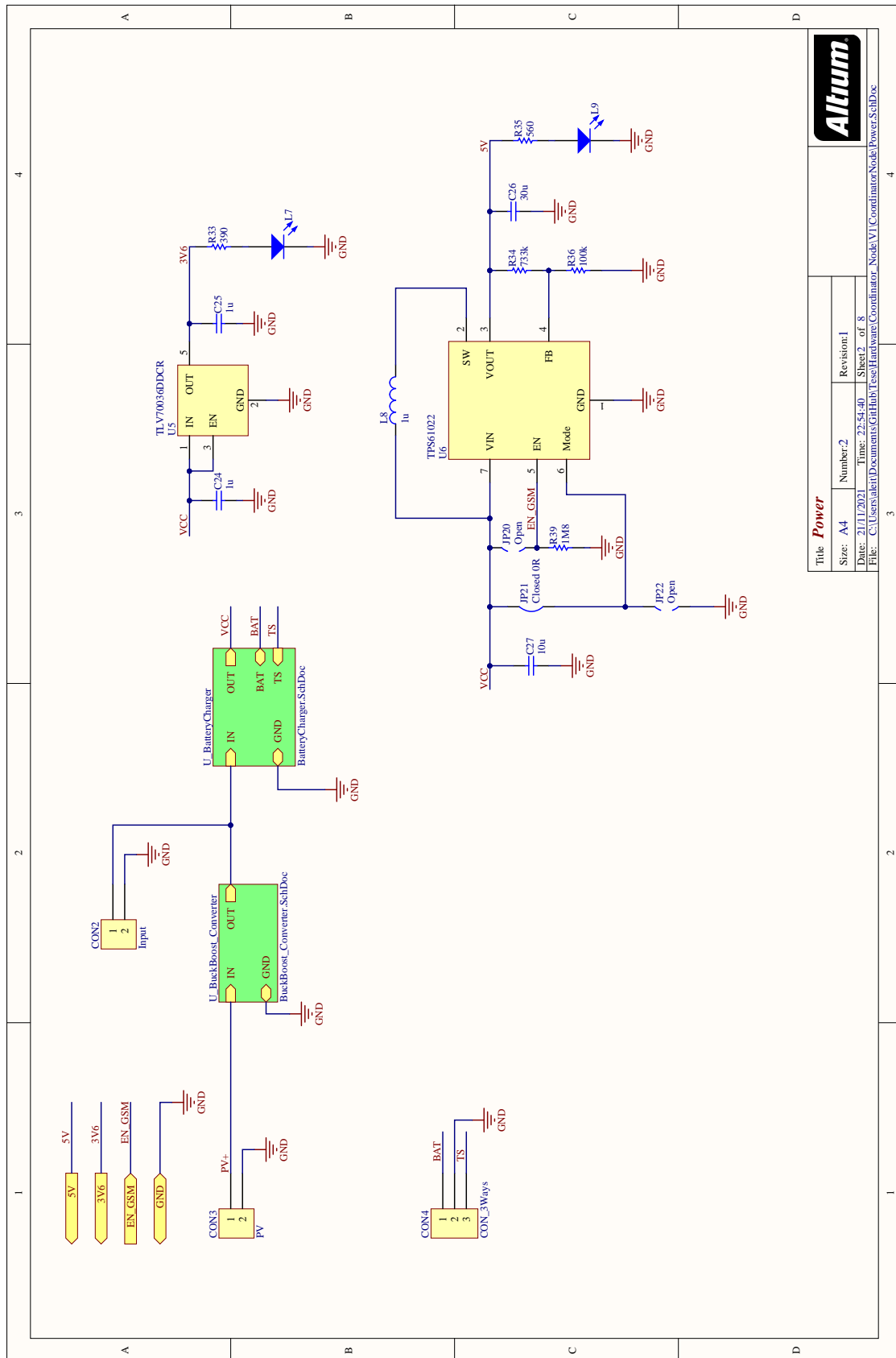
II

Esquemáticos da PCB do Nó Coordenador



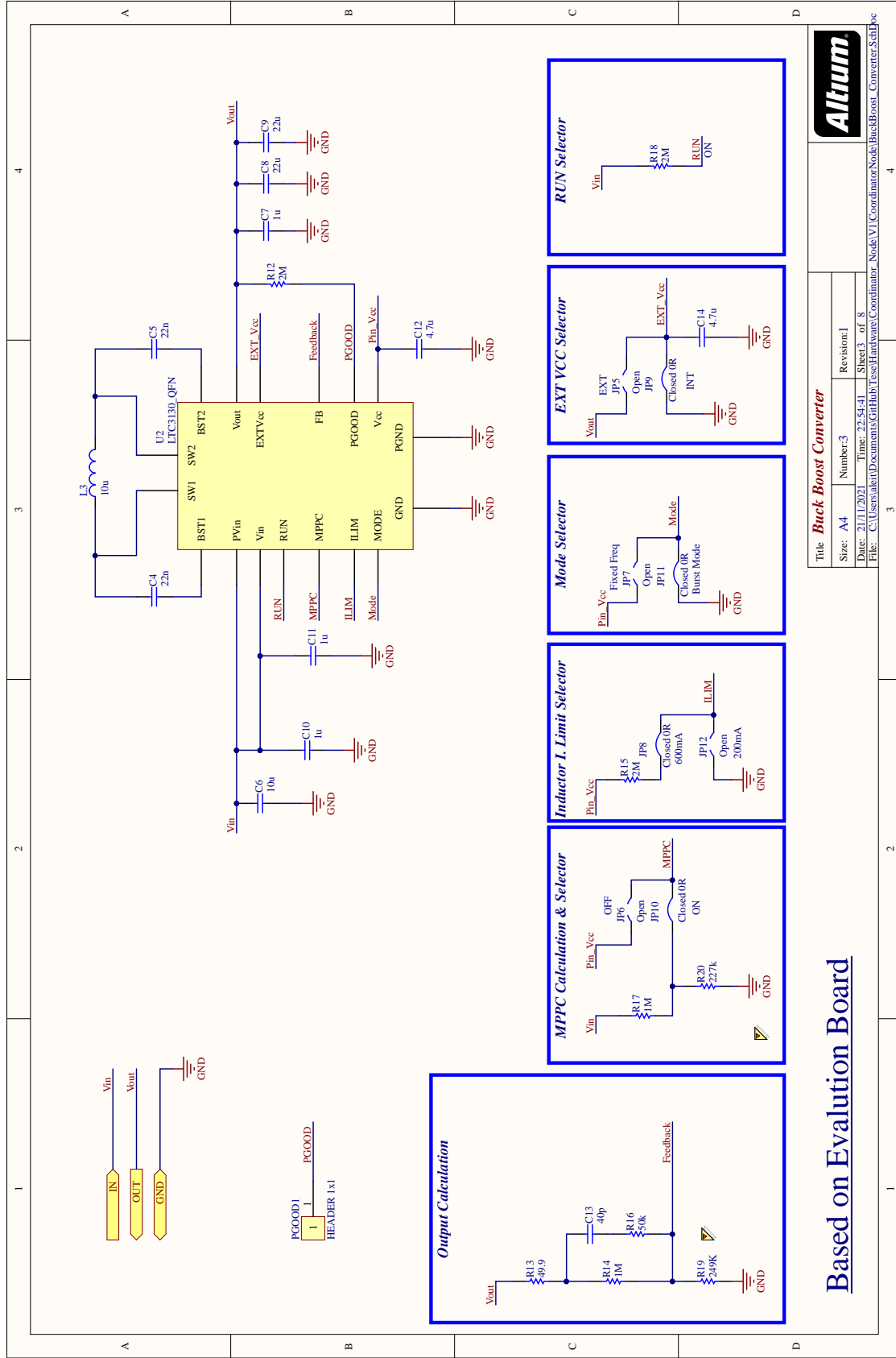
Title		Revision: 1	
Size: A4	Number: 1	Time: 22:54:40	Sheet 1 of 8
Date: 21/11/2021	File: C:\Users\aleff\Documents\GH\Hub\Tese\Hardware\Coordinator_Node[V1]\CoordinatorNode_CoordinatorNode_Top.SchDoc		

ANEXO II. ESQUEMÁTICOS DA PCB DO NÓ COORDENADOR



Title		Revision: 1	
Size: A4	Number: 2	Time: 22:54:40	Sheet: 2 of 8
Date: 21/11/2021			
File: C:\Users\aleff\Documents\GHI\Hub\Tese\Hardware\Coordinator_Node[V1]\CoordinatorNode\PowerSchDoc			

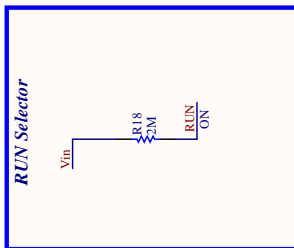
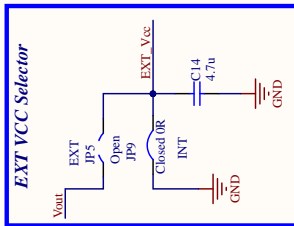
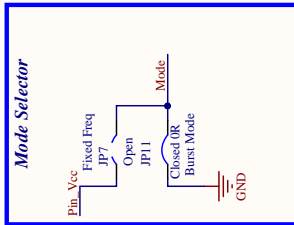
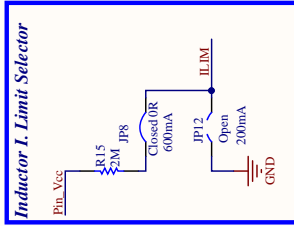
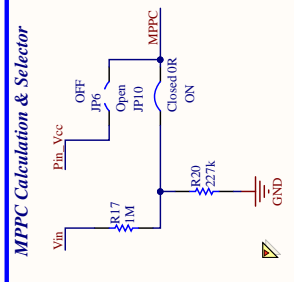
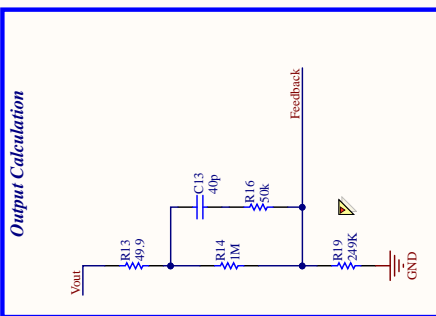




Title: Buck Boost Converter			
Size: A4	Number: 3	Revision: 1	
Date: 21/11/2021	Time: 22:54:41	Sheet 3 of 8	
File: C:\Users\alef\Documents\GHI\Hub\Tese\Hardware\Coordinator_Node[V1]\CoordinatorNode\BuckBoost_Converter.SchDoc			

Based on Evaluation Board

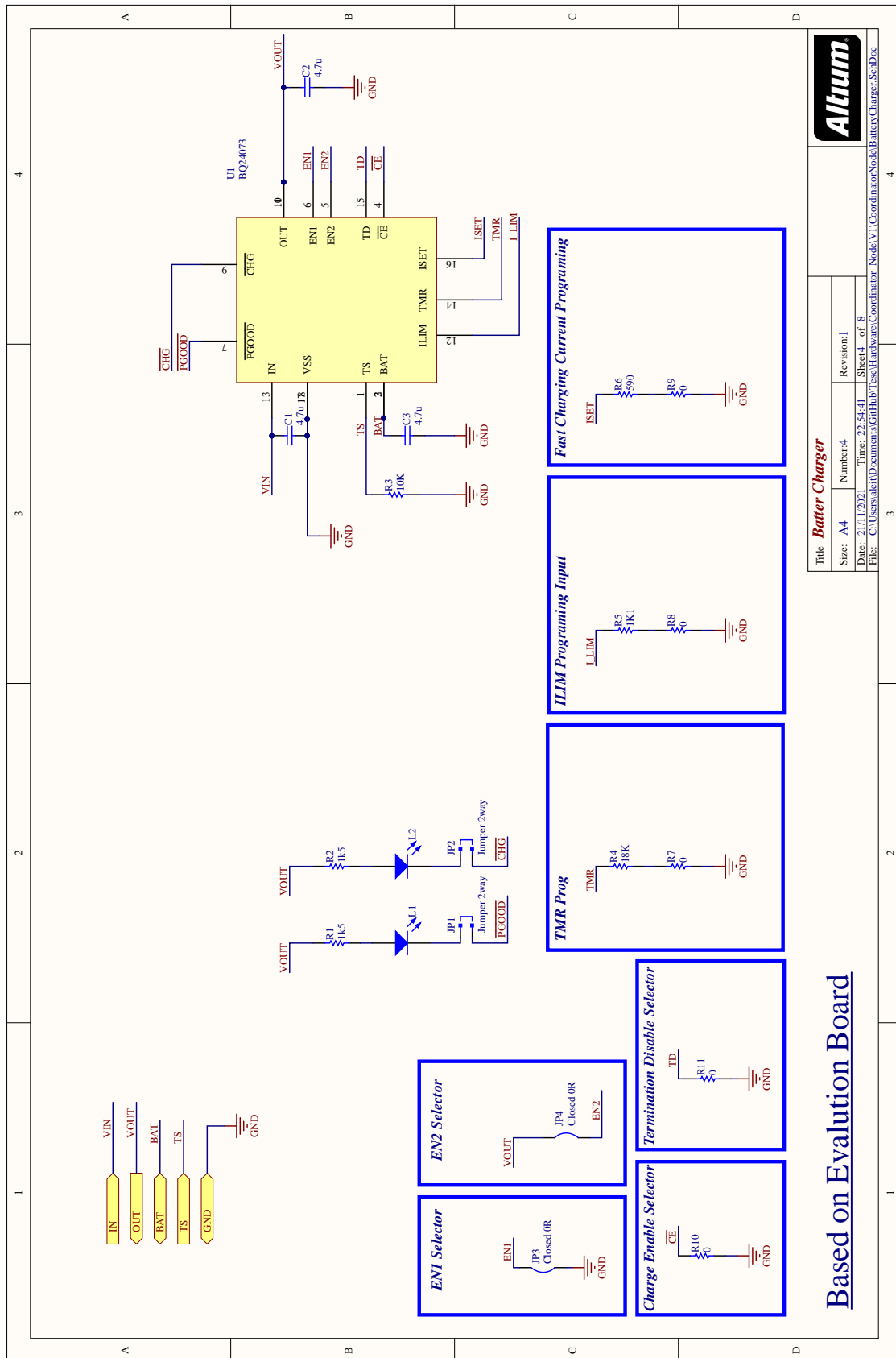
Output Calculation

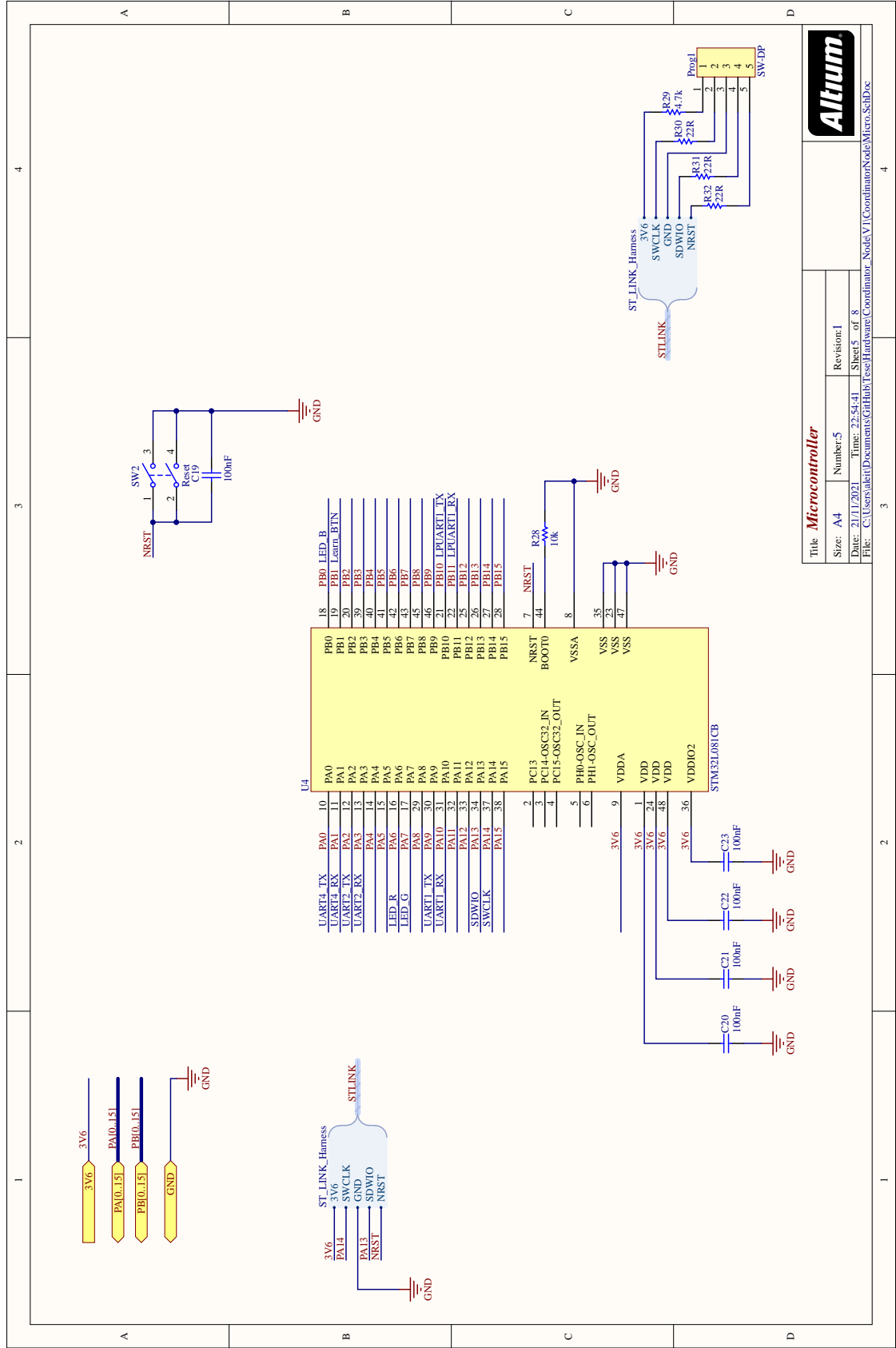


1 2 3 4

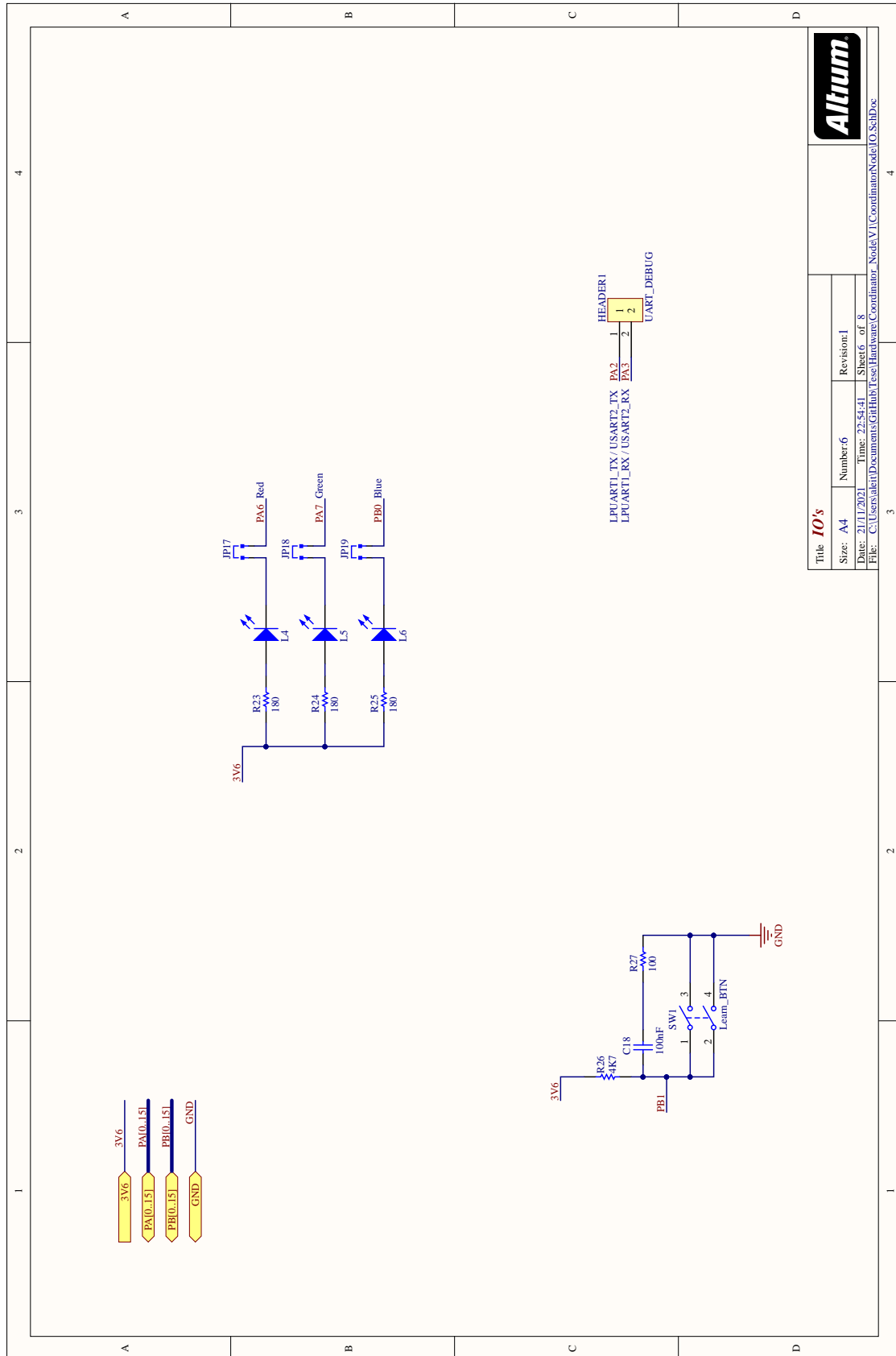
A B C D

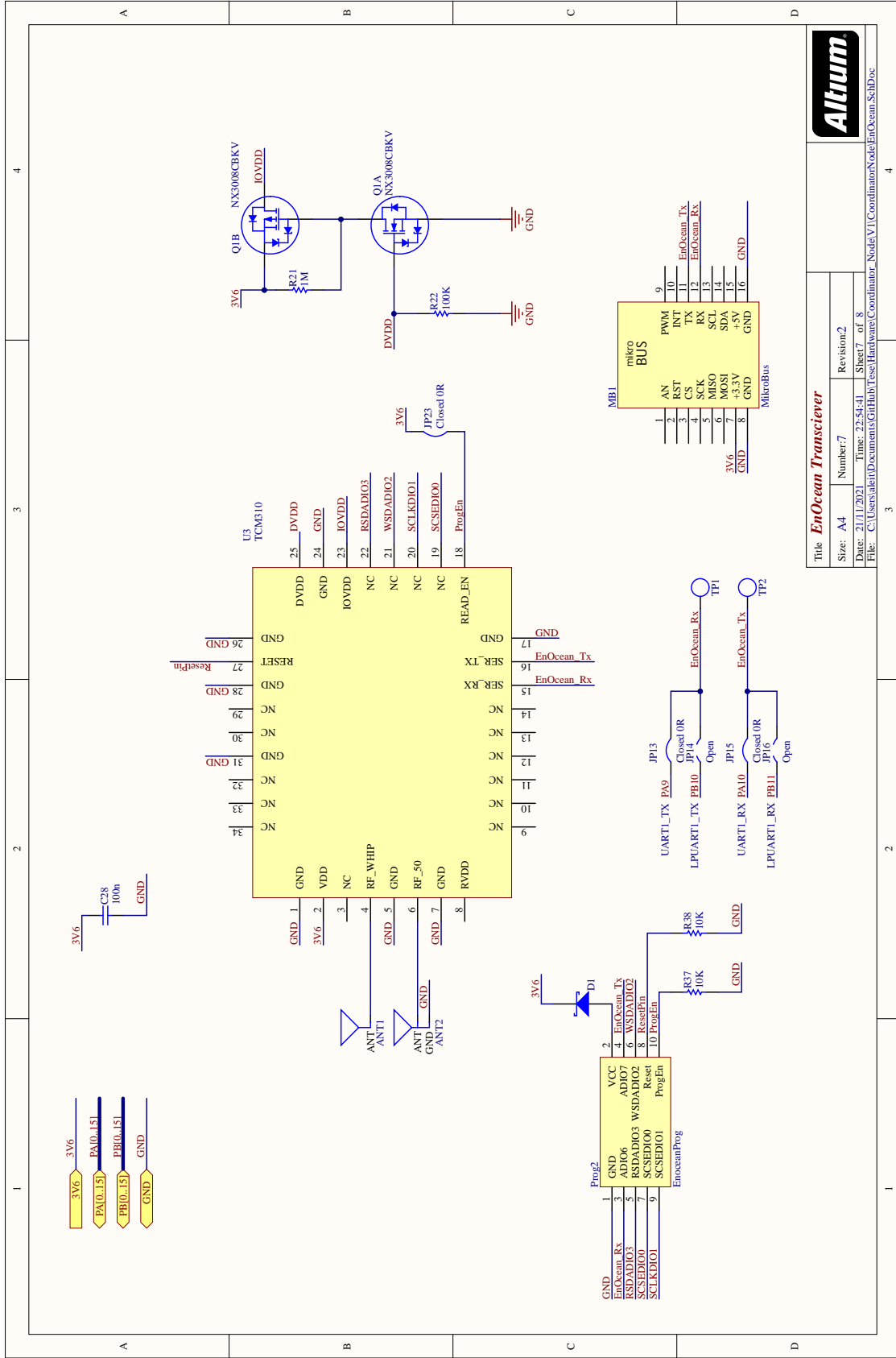
ANEXO II. ESQUEMÁTICOS DA PCB DO NÓ COORDENADOR





ANEXO II. ESQUEMÁTICOS DA PCB DO NÓ COORDENADOR





Title: **EnOcean Transceiver**

Size: A4	Number: 7	Revision: 2
Date: 21/11/2021	Time: 22:54:41	Sheet 7 of 8
File: C:\Users\aleff\Documents\GH\Hub\Tese\Hardware\Coordinator_NodeV1\CoordinatorNode\EnOcean_SchDoc		

ANEXO II. ESQUEMÁTICOS DA PCB DO NÓ COORDENADOR

