

David Manuel Cartaxo Lima

Integração Sensorial para o Diagnóstico de Transformadores de Distribuição (MT/BT) de Energia Elétrica

Dissertação de Mestrado em Engenharia Física, na área de especialização em Instrumentação,
orientada pelo Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso,
apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Julho 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Integração Sensorial para o Diagnóstico de Transformadores de Distribuição (MT/BT) de Energia Elétrica

David Manuel Cartaxo Lima

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Física
com Especialização em Instrumentação

Orientador: Prof. Doutor Francisco Cardoso

Ano letivo 2017/18

Resumo

Esta dissertação teve como intuito o desenvolvimento de uma unidade multissensorial para a monitorização remota de transformadores de distribuição em redes elétricas, tendo em vista o suporte à sua manutenção prescritiva. Esta unidade visa promover, simultaneamente, o prolongamento do tempo de vida útil destes equipamentos e a melhoria da qualidade do serviço prestado.

As variáveis relevantes e os eventos de interesse na caracterização do estado de funcionamento dos transformadores são assim apresentados, bem como as metodologias e tecnologias usadas no dispositivo desenvolvido para a sua monitorização.

Os fatores mais importantes e distintos deste dispositivo são o seu carácter não intrusivo e a sua total ausência de cablagem, quer de comunicação, quer de alimentação em potência. Assim, para a alimentação, optou-se por um sistema de captação de energia do diferencial térmico permanente entre o transformador e o ar envolvente. Deste modo, foram realizados testes para a seleção e validação dos módulos termoelétricos mais adequados.

Quanto à comunicação, é devidamente justificada a opção pela tecnologia Bluetooth Low Energy, suportada num módulo integrado de comunicação e processamento.

O sistema encontra-se, neste momento, em fase de prototipagem industrial, assim permitindo a realização de uma bateria de testes finais em condições reais. Estes terão lugar em laboratórios altamente diferenciados, em instituições académicas e industriais.

Palavras-Chave: IIoT, Sensor Inteligente, Captação de Energia, Transformadores de Distribuição, Redes Elétricas Inteligentes, Diagnóstico Automático

Título: Integração Sensorial para o Diagnóstico de Transformadores de Distribuição (MT/BT) de Energia Elétrica

Abstract

The primary objective of the present work consists in the design and development of a smart multi-sensor for the remote monitoring of distribution transformers in power grids, in view of supporting their prescriptive maintenance. This sensor simultaneously promotes the extension of the equipment's life span and the improvement in the respective quality of the service.

The relevant variables and the events of interest to the characterization of the transformers' operating status are presented, as well as the methods and technologies used for the device operation.

This device's most important and distinctive features are their non-intrusive and wireless character, requiring neither communication nor power supply cabling. Thus, in what regards the power unit, the option consists of energy harvesting from the permanent temperature differential between a transformer and the surrounding air. Accordingly, tests were carried out in order to select and validate the most appropriate thermoelectric modules.

Concerning communication, an option for Bluetooth Low Energy is discussed, which is duly supported by an integrated module encompassing both communication and processing capabilities.

The system is, at the present time, in a stage of industrial prototyping, thus allowing a final testbed to be carried out in realistic conditions. This will take place both in industrial and academic institutions.

Keywords: IIoT, Smart Sensors, Energy Harvesting, Distribution Transformers, Smart Grids, Automatic Diagnosis

Title: Sensor Fusion for the Diagnosis of Distribution Transformers

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao Professor Francisco Cardoso e à Engenheira Joana Faria pelo apoio e orientação ao longo deste projeto, mas também pelo enriquecimento cultural que as conversas, tanto no âmbito dos temas abordados neste documento como fora deles, permitiram.

À Eneida devo a possibilidade de participar no desenvolvimento deste produto inovador, cuja finalidade é vir a ser comercializado. Uma menção de gratidão particular aos Engenheiros Luís Oliveira e José Oliveira, com quem tive mais contacto.

Um obrigado especial ainda à família e amigos por todo o apoio e incentivo no desenvolvimento deste projeto em particular e na vida em geral.

*“Science can amuse
and fascinate us all, but
it is engineering that
changes the world.”*
—ISAAC ASIMOV

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	xii
Abreviaturas	xiii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 - Enquadramento: Motivações e Oportunidades.....	1
1.2 - Objetivos	5
1.3 - Estrutura da Tese	6
Capítulo 2: Transformadores MT/BT e o seu Diagnóstico	7
2.1 - Transformadores de Distribuição.....	7
2.2 - Transformadores a Óleo Hermeticamente Fechados	8
2.3 - Fatores Relevantes na Caracterização de Estado	10
2.4 - Estado da Arte de Sistemas de Monitorização	12
2.5 - Enquadramento Específico e Requisitos do Projeto	15
2.6 - Especificação do Projeto	17
Capítulo 3: Arquitetura do Sistema	21
3.1 - Redes de Sensores sem Fios e a IoT	21
3.2 - Blocos Funcionais e Estrutura do Nó de Sensores	23
Capítulo 4: Comunicação	27
4.1 - Rede de Comunicação.....	27
4.2 - Comunicação Interna.....	29
4.2.1 - Protocolos WPAN	29
4.2.1.1 - Bluetooth Low Energy	29
4.2.1.2 - ZigBee.....	30
4.2.1.3 - 6LoWPAN	31
4.2.1.4 - Thread	32
4.2.2 - Módulos de Comunicação no Mercado.....	33
4.2.3 - Kit de Desenvolvimento LAUNCHXL-CC2650.....	35
4.3 - Comunicação Externa	36
4.3.2 - Protocolos LPWAN	36
4.3.2.1 - NB-IoT.....	37
4.3.2.2 - LoRaWAN	37
4.3.2.3 - Sigfox.....	37

Capítulo 5: Alimentação.....	39
5.1 - Modulo de Alimentação	39
5.1.2 - Gestor de Potência	40
5.1.3 - Termopilhas	42
5.1.4 - Supercondensador	44
5.1.5 - Dissipador	45
5.2 - Estimativa do Consumo Energético.....	45
5.2.1 - Pressupostos da Estimativa	46
5.2.1.1 - Comunicação	46
5.2.1.2 - Processamento	47
5.2.1.3 - Sensores	49
5.2.2 - Consumo Total Diário	49
5.3 - Montagem Experimental e Resultados	50
Capítulo 6: Sensorização	55
6.1 - Sensores Digitais	55
6.1.2 - Sensores de Temperatura	56
6.1.3 - Microfone	57
6.2 - Sensores Analógicos	59
6.2.1 - Sensor de Ultrassons	59
6.2.2 - Antena RF	61
Capítulo 7: Conclusão.....	63
Referências.....	64
Anexos	a
Anexo 1: Esquemas Elétricos da Placa de Sensores de Temperatura	b
Anexo 2: Lista de materiais (BOM) da Placa de Sensores de Temperatura	c
Anexo 3: Esquemas Elétricos da Placa Vertical	d
Anexo 4: Lista de materiais (BOM) da Placa Vertical	h
Anexo 5: Esquemas Elétricos da Placa Horizontal Superior	i
Anexo 6: Lista de materiais (BOM) da Placa Horizontal Superior.....	k

Lista de Figuras

- Figura 1.1** - Distribuição de investimentos realizados no âmbito de IOT por área de atuação. Os serviços e a análise de dados assumem uma parte importante do total de gastos previstos para 2020 pela consultora BCG [2]. 2
- Figura 1.2** -Dez principais casos de uso que irão guiar o crescimento da IoT até 2020, baseando-se nas previsões do seu tempo de maturação e gastos envolvidos. A *Predictive Maintenance* surge em destaque, sendo uma das indústrias interessadas a da Energia e Recursos Naturais [3]. 3
- Figura 1.3** - As várias fases envolvidas na distribuição de eletricidade desde a produção ao consumidor final. Imagem adaptada de [7]. 5
- Figura 2.1** - Estrutura de um transformador a óleo hermeticamente fechado [16]. .. 8
- Figura 2.2** - Gráfico da curva *bathtub* (adaptado de Wilkins [21]), que representa a taxa de falhas ao longo do tempo de vida de um transformador de distribuição. Às diferentes fases estão associadas diferentes variações de taxa de falhas e diferentes proveniências..... 10
- Figura 2.3** - Diferentes efeitos físicos ou químicos através dos quais as descargas parciais se manifestam e os respetivos métodos de deteção [24]. 11
- Figura 2.4** - Solução estacionária para a temperatura da camada de óleo (a branco) de 60° e para o ar envolvente à estrutura a 20°, recorrendo ao software COMSOL Multiphysics. A simulação envolveu ainda uma camada de aço correspondente à parede superior do tanque do transformador e a estrutura em alumínio em U que servirá de base ao dispositivo a desenvolver. 18
- Figura 2.5** - Ajuste dos dados obtidos das simulações para diferentes valores de temperatura do óleo e do ar envolvente a um plano, recorrendo à ferramenta “*Curve Fitting Tool*” do Matlab. As temperaturas do óleo (T_{oleo}), do ar envolvente (T_{amb}) e do ponto a vermelho representado na estrutura em U (T_{ponto3}) são dados em graus celsius. É possível verificar que a temperatura do óleo é facilmente obtida pela equação do plano dada por $z = f(x, y)$ com x e y representando, respetivamente, a temperatura do ar envolvente e do ponto considerado na estrutura. É possível confirmar que a temperatura medida na carcaça é praticamente igual à do óleo no topo do TD ($p01 \approx 1$, $p00 \approx p10 \approx 0$). 18
- Figura 3.1** - Arquitetura geral de uma rede de sensores sem fios (WSN) [40]. 21
- Figura 3.2** - Esquematização dos blocos funcionais do sistema, distribuídos em quatro blocos..... 23
- Figura 3.3** - Estrutura interna idealizada para o dispositivo multissensorial. 24
- Figura 3.4** - Estrutura do dispositivo, com as respetivas dimensões. Representação ainda de detalhes das estruturas protetoras externas. 25

Figura 3.5 - Seleção de materiais plásticos tendo em conta apenas a temperatura de utilização típica [41].	26
Figura 4.1 - Classificação dos principais protocolos de comunicação sem fios, consoante o alcance, em redes de área pessoal (WPAN), redes de área local (WLAN) e redes de área ampla (WWAN) [42].	27
Figura 4.2 - Bandas de frequências não licenciadas a nível mundial [43].	28
Figura 4.3 - Considerações a analisar na seleção do protocolo mais adequado a cada aplicação [44].	28
Figura 4.4 - À esquerda encontra-se uma foto do módulo CC2650MODA [53] e à direita o seu diagrama de blocos funcionais [52].	34
Figura 4.5 - No topo é visível uma foto aos componentes referidos nesta subsecção e ao CC2650MODA, dispostos sobre uma régua graduada em centímetros. Na parte inferior, à esquerda, encontra-se uma imagem da aplicação desenvolvida e, à direita, uma foto à montagem da placa de circuito impresso com os sensores ADT7301 ao LAUNCHXL-CC2650.	35
Figura 4.6 - O dispositivo em desenvolvimento estará conectado a uma <i>gateway</i> que poderá vir a ser um EWS-DTVI-g [60] revisto. Este, por sua vez, comunicará a informação recolhida a um servidor de base de dados e alertará direta e imediatamente a base de controlo, em caso de deteção de problema. A base de controlo terá ainda acesso aos dados por intermédio da base de dados.	36
Figura 4.7 - Análise às vantagens competitivas de Sigfox, LoRa e NB-IoT [52].	38
Figura 5.1 - Variação temporal de variáveis relevantes na caracterização do estado de funcionamento de um TD nos EUA, particularmente da temperatura do óleo no topo e nas proximidades dos enrolamentos. De realçar o desfasamento temporal entre as variações destas temperaturas [70].	40
Figura 5.2 - Aplicação típica do LTC3109 [73] para captação de energia por diferencial térmico com recurso a termopilhas (TEG's).	41
Figura 5.3 - Estrutura interna de um módulo termoelétrico [78].	42
Figura 5.4 - Processo de carga e descarga de um supercondensador [86].	44
Figura 5.5 - Consumo de corrente para o evento de anúncio do CC2650EM com uma tensão de alimentação de 3,0 V [91].	46
Figura 5.6 - Consumo de corrente para o evento de anúncio do CC2650EM com uma tensão de alimentação de 3,0 V [91].	47
Figura 5.7 - Variação temporal da temperatura do óleo do topo de um TD (medida com o sensor PT100 de um DGPT2) tendo em conta a variação da carga do mesmo [95]. Escala do tempo em minutos.	51
Figura 5.8 - Variação da carga, da temperatura (no interior e exterior de um PT) e da humidade (no interior e exterior de um PT), no inverno e no verão, respectivamente à esquerda e à direita [96].	51

Figura 5.9 - Detalhes da montagem do interior (à esquerda) e das duas arquiteturas externas de sistema testadas (à direita, no topo com base de cartão e cortiça, e em baixo sem esta base).	52
Figura 5.10 - Resultados obtidos para a termopilha da Laird PT8.12.F2.4040.TA.W6, sem base de proteção da radiação térmica para os dissipadores, para uma temperatura da superfície de aproximadamente 40°C. Com sala à temperatura de 27°C, o diferencial térmico obtido foi de cerca de 0,9°C.	53
Figura 5.11 - Resultados obtidos para a termopilha da Laird PT8.12.F2.4040.TA.W6, com base de proteção da radiação térmica para os dissipadores, para uma temperatura da superfície a aproximadamente 40°C. Com a sala à temperatura de 27°C, o diferencial térmico obtido foi de cerca de 1,3°C.	53
Figura 5.12 - Resultados obtidos para a termopilha da Laird PT8.12.F2.4040.TA.W6, com base de proteção da radiação térmica para os dissipadores, para uma temperatura da superfície a aproximadamente 47°C. Com a sala à temperatura de 27°C, o diferencial térmico obtido foi de cerca de 3°C.....	54
Figura 6.1 - Ligações SPI efetuadas no sistema em desenvolvimento.	56
Figura 6.2 - Diagrama de blocos funcionais do sensor ADT7311 [93].	56
Figura 6.3 - Curva de resposta do SPH0641LU4H-1 no modo standard [94].	58
Figura 6.4 - Curva de resposta do SPH0641LU4H-1 no modo ultrassónico [94].....	58
Figura 6.5 - Resposta em frequência e resposta direcional do 400PT160 [107].....	60
Figura 6.6 - Resposta em frequência e resposta direcional do 400SR160 [108].....	60
Figura 6.7 - Resposta em frequência e resposta direcional do MA40S4R [109].	61

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Resumo dos sistemas de monitorização aplicados pela Ellevio em Estocolmo em projeto de avaliação [32].	14
Tabela 2.2 - Sensores utilizados na monitorização de postos de transformação em função do seu tipo [34].	15
Tabela 4.1 - Comparação dos principais protocolos de comunicação WPAN de baixo consumo energético [43].	33
Tabela 4.2 - Tabela comparativa Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT [52].	38
Tabela 5.1 - Valores anunciados e resultados experimentais para início de operação de diferentes gestores de potência [75].	41
Tabela 5.2 - Tabela comparativa das opções para termopilhas.	43
Tabela 5.3 - Modos de funcionamento do CC2650MODA [52].	48
Tabela 5.4 - Consumo devido ao uso do BLE [52].	50
Tabela 5.5 - Consumo devido ao processamento [52].	50
Tabela 5.6 - Consumo dos sensores [93, 94].	50
Tabela 6.1 - Dados relativos aos três modos de funcionamento do SPH0641LU4H-1 [94].	58

Abreviaturas

Lista de abreviaturas:

AT	Alta Tensão
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BT	Baixa Tensão
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
EH	<i>Energy Harvesting</i>
ESR	<i>Equivalent Series Resistor</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GAP	<i>Generic Access Profile</i>
GATT	<i>Generic Attribute Profile</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
MAT	Muito Alta Tensão
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical System</i>
MISO	<i>Master In Slave Out</i>
MOSI	<i>Master Out Slave In</i>
MT	Média Tensão
ONAN	<i>Oil Natural, Air Natural</i>
PT	Posto de Transformação
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SCK	<i>Serial Clock</i>

SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SS	<i>Slave Select</i>
TD	Transformador de Distribuição
TEG	<i>Thermoelectric Generator</i>
UHF	<i>Ultra High Frequencies</i>
VHF	<i>Very High Frequencies</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensors Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento: Motivações e Oportunidades

A indústria, a sociedade e o mundo em geral são o resultado das diferentes tecnologias que permitiram as várias revoluções industriais. No fim do século XVIII, a invenção dos motores a vapor propiciou a primeira revolução industrial, transformando a economia até então agrária e artesanal numa economia dominada por métodos de produção mecânicos. Em finais de século XIX, a segunda revolução industrial, marcada pela eletrificação e pelas linhas de montagem, permitiu a produção em grande escala de bens de consumo, abrindo portas ao mercado de massas. Por volta da década de 60 do século XX, a produção automatizada e otimizada foi possibilitada pelos desenvolvimentos em eletrónica e em tecnologias de informação, que marcam a terceira revolução industrial. Vivemos nos dias de hoje o início da quarta revolução industrial. Esta agrega e potencia inovações tecnológicas como *Internet of Things*, *Big Data*, *Advanced Analytics*, *Machine Learning*, *Computer Integrated Manufacturing* e *Advanced Robotics*. Ao contrário das revoluções anteriores, esta não pressupõe a substituição de equipamentos por outros novos, mas antes a reformulação de equipamentos e serviços já existentes. A indústria 4.0 coloca assim desafios de gestão como: otimização da eficiência operacional, desenvolvimento de novos modelos de negócio e transformação digital das empresas.

A *Internet of Things*, IoT, tem como propósito geral a conexão entre vários dispositivos e a sua cooperação, tendo sido estimado num estudo do grupo Boston Consulting Group (BCG) [1] que esta totalizará investimentos na ordem dos 250b€ em 2020, distribuídos em várias áreas de atuação, como é visível na figura 1.1.

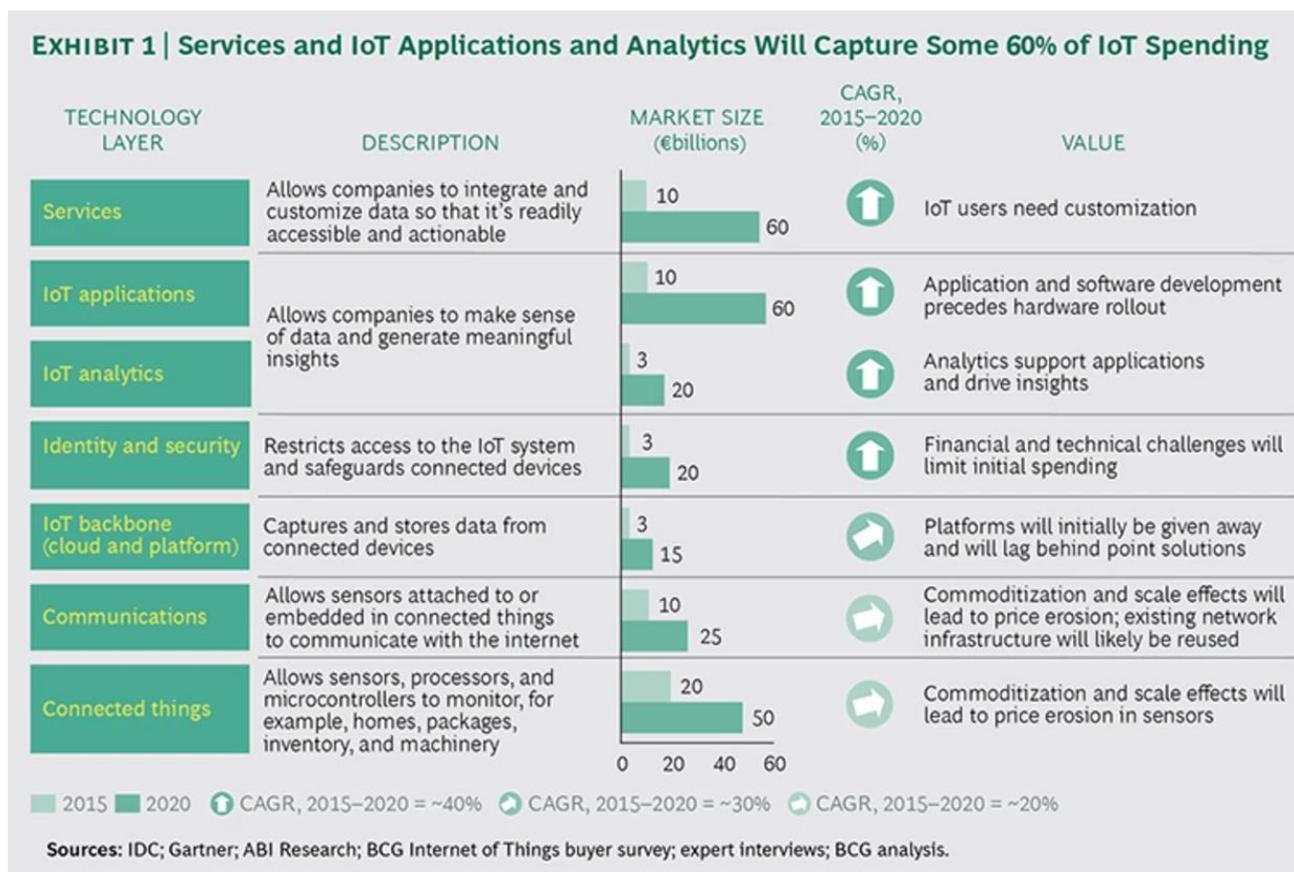


Figura 1.1 - Distribuição de investimentos realizados no âmbito de IOT por área de atuação. Os serviços e a análise de dados assumem uma parte importante do total de gastos previstos para 2020 pela consultora BCG [2].

Nesse estudo, a BCG aponta ainda as 10 principais ramos que irão conduzir ao crescimento da IoT até 2020. Baseia-se para isso nas previsões dos tempos de maturação e dos gastos envolvidos. Na figura 1.2 encontra-se uma esquematização desta análise que aborda também as principais indústrias interessadas em cada caso.

Como se pode constatar, a manutenção preditiva e, mais modernamente, a prescritiva assumem uma particular relevância, pois os ativos industriais representam grandes investimentos e acarretam consideráveis despesas de manutenção.

Esta nova metodologia de manutenção alicerça-se na *Internet of Things* mas também em *Advanced Analytics* e *Machine Learning*, de modo a reduzir os custos de manutenção e estender o tempo de vida útil de equipamentos.

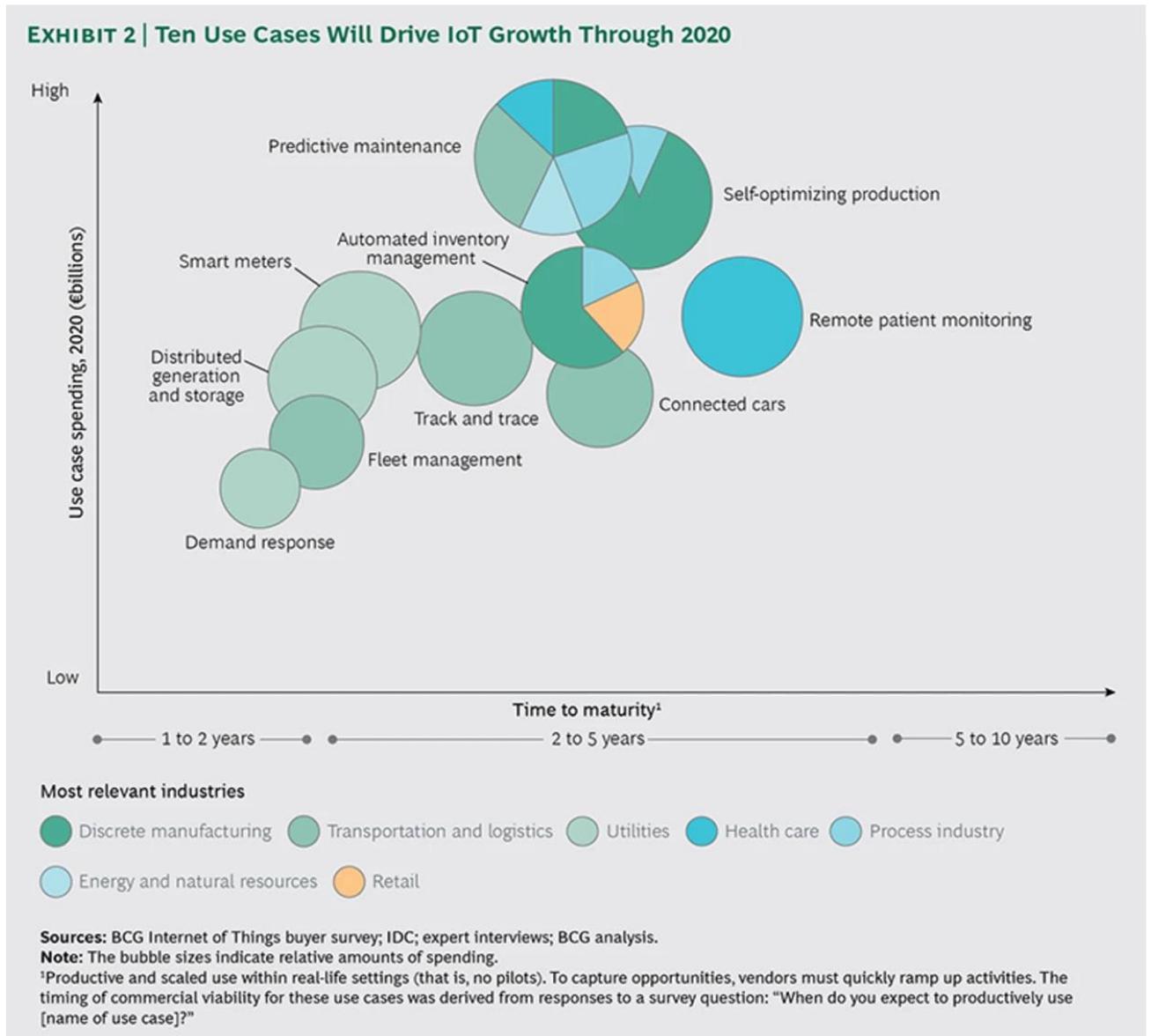


Figura 1.2 - Dez principais casos de uso que irão guiar o crescimento da IoT até 2020, baseando-se nas previsões do seu tempo de maturação e gastos envolvidos. A *Predictive Maintenance* surge em destaque, sendo uma das indústrias interessadas a da Energia e Recursos Naturais [3].

Para melhor perceber a sua importância, analisam-se de seguida os métodos mais recorrentes de manutenção: a corretiva, a planeada e a condicional. A manutenção corretiva caracteriza-se pela atuação apenas após uma falha e pelos consequentes custos elevados em equipamentos e tempos de inatividade. A manutenção planeada é realizada com base em períodos de tempo pré-definidos. A manutenção condicional indica a necessidade de revisão do sistema pelo ultrapassar de determinados patamares.

Em todas as modalidades reparam-se e fazem-se alterações aos equipamentos de modo a estender as suas vidas úteis e reduzir os custos de manutenção e tempos de paragem. A manutenção preditiva, ao prever quando irá ocorrer a próxima avaria e de que tipo esta será, elimina tempos de paragem motivados por revisões desnecessárias e por diagnóstico através de outros meios. Permite ainda o agendamento de revisões para alturas de maior conveniência.

Segundo o relatório “*THE INTERNET OF THINGS: MAPPING THE VALUE BEYOND THE HYPE*” realizado pela McKinsey Global Institute em junho de 2015 [4], a manutenção preditiva poderá reduzir os custos de manutenção de equipamentos fabris até 40% e os tempos de inatividade em 50%. O investimento global em equipamentos será também reduzido entre 3 e 5% devido à extensão da sua vida útil.

Os serviços de interesse geral (*utilities*) constituem exemplos dos principais interessados na IoT, sobretudo no âmbito de contadores inteligentes, dado que englobam as empresas que operam e gerem infraestruturas de distribuição de bens e serviços como eletricidade, gás e água. Estas empresas devem, no entanto, aproveitar também a vertente de manutenção preditiva permitida pela IoT. Pelas suas grandes dimensões, o conhecimento do estado dos equipamentos leva a uma correta alocação de verbas a investimentos e a manutenção nos orçamentos anuais, o que permitirá potenciar ainda mais a poupanças.

De entre os serviços de interesse geral, o transporte e distribuição de eletricidade encontra-se numa fase de impasse na sua evolução. Se por um lado é perspectivado o aumento do consumo, por outro a crescente implementação de sistemas disruptivos como a micro-geração de energia pode vir a reformular o modo como o setor opera [5, 6], estando os investimentos avultados nesta área suspensos. A manutenção preditiva dos ativos, com as já referidas vantagens, assume neste caso uma importância particular, pelo adiar de grandes investimentos até que haja mais certezas quanto ao futuro deste setor.

Dada a dependência da sociedade atual na eletricidade, quer para fins domiciliários, quer para as empresas, foram estabelecidos padrões de qualidade para o transporte e distribuição de energia em vários países. Exemplo disso é o “Regulamento da Qualidade de Serviço” assinado em 2013 pela ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, ERSE) para o setor em Portugal, tendo em vista a continuidade do serviço, a qualidade da Eletricidade distribuída e a qualidade de atendimento comercial. Outras regulamentações impõem ainda limites mínimos de eficiência para os equipamentos do setor, como a diretiva 2009/125/EC relativa à implementação do *Ecodesign* em transformadores de potência e de distribuição.

Um sistema de monitorização contínuo do estado de saúde dos equipamentos do sistema de distribuição é aconselhável, de modo a garantir que se cumpram os padrões de qualidade exigidos. Na figura 1.3, encontram-se representadas as infraestruturas existentes nas várias fases, desde a produção até ao consumidor final. Os postos de transformação (PT) encontram-se geralmente em segmentos da rede que não apresentam redundância, sendo assim elementos críticos para a continuidade do serviço. Seria então expectável que estivessem amplamente desenvolvidos sistemas para a monitorização contínua de PT em geral e de transformadores de distribuição (TD) em particular. No entanto, tal não se verificou até agora devido à sua vulgaridade e baixo preço (TD custam cerca de 10 mil euros) quando comparado com outros ativos (transformadores de potência com custos na ordem de 1 milhão de euros). A redução de

custos que se tem assistido nos componentes eletrónicos em geral, a par das necessidades já identificadas tornam neste momento o desenvolvimento de um sensor inteligente para a monitorização remota de TD um projeto aliciante em termos técnicos e económicos.

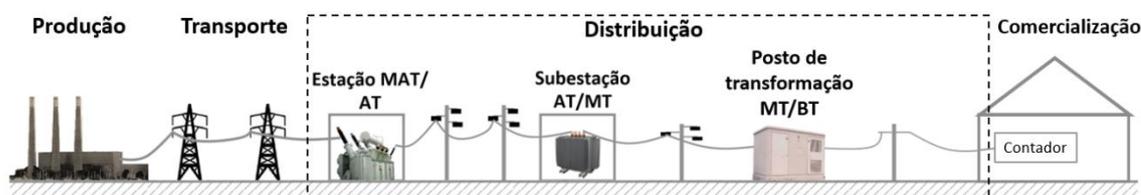


Figura 1.3 - As várias fases envolvidas na distribuição de eletricidade desde a produção ao consumidor final. Imagem adaptada de [7].

Este sistema permitirá também reduzir falhas humanas. Por exemplo, em alguns países, perspetivando-se aumentos de consumo de eletricidade erroneamente elevados [8], os PT foram equipados com elementos sobredimensionados. Tal envolveu um investimento superior ao necessário, mas permite que ao longo da sua vida útil funcionem num regime de ‘conforto’. Em alguns destes casos, a manutenção é contratada em concursos públicos e os preços são insustentavelmente baixos para que o serviço seja feito de acordo com o estipulado. Nestas situações, espera-se que a folga que têm lhes permita continuar a operar sem falhas. Com o aproximar do fim de vida útil destes, é de esperar que, quando forem trocados, os novos equipamentos sejam devidamente redimensionados às necessidades expectáveis.

Segundo dados da ERSE, existiam a 31/12/2015 em Portugal 67 063 PT [9], cada um podendo ter um ou mais transformadores de distribuição.

1.2 - Objetivos

Neste quadro, o presente plano de trabalhos visa desenvolver uma unidade multissensorial a aplicar aos transformadores de distribuição, que permita analisar o estado de saúde de transformadores de distribuição MT/BT. A utilização desta unidade permitirá reduzir custos de manutenção e aumentar a qualidade do serviço de distribuição de eletricidade. Este projeto compreende assim os seguintes objetivos específicos:

- Consolidação dos requisitos para a supervisão e o diagnóstico automático de transformadores em PT de redes de distribuição de eletricidade;
- Estudo, especificação e avaliação de sensores ‘inteligentes’ (*smart sensors*) e de critérios de “fusão” de informação, visando o diagnóstico do estado técnico de funcionamento dos transformadores;
- Integração da unidade numa rede local, com base num protocolo de comunicação adequado às exigências da aplicação;
- Ensaios em bancada de teste e em condições reais de exploração, para avaliação de desempenho.

1.3 - Estrutura da Tese

A tese encontra-se dividida em 7 capítulos:

1. **Introdução:** Aborda as motivações e oportunidades do projeto do ponto de vista tecnológico, os objetivos gerais do projeto e a estrutura da tese.
2. **Diagnóstico em Transformadores de MT/BT:** Após menção dos principais elementos de um transformador a óleo hermeticamente fechado (o mais comum) são estudados os fatores relevantes na caracterização do seu estado de funcionamento. É também neste capítulo que se encontra o estado da arte da monitorização destes equipamentos. Por fim, analisa-se o enquadramento específico e requisitos do projeto, bem como as suas especificações.
3. **Arquitetura do sistema:** Inicia com uma referência à arquitetura geral de uma rede de sensores sem fios, à qual se segue uma análise aos blocos funcionais e à estrutura da unidade multissensorial sobre a qual versa esta dissertação.
4. **Comunicação:** Após uma introdução às tecnologias de comunicação mais adequadas para a comunicação da unidade multissensorial, são apresentados alguns módulos existentes no mercado, sendo justificada a seleção por um destes. Por último, são abordadas as tecnologias disponíveis para a comunicação da *gateway*.
5. **Alimentação em Potência:** São justificadas as escolhas dos componentes para teste a usar com o propósito de alimentar o dispositivo. Por fim, são analisados resultados laboratoriais de diferentes termopilhas e de diferentes estruturas possíveis.
6. **Sensorização:** Análise dos diferentes sensores utilizados.
7. **Conclusão:** Revisão do trabalho realizado e menção do trabalho futuro no âmbito deste projeto.

Capítulo 2

Transformadores MT/BT e o seu Diagnóstico

2.1 - Transformadores de Distribuição

Na Europa, os transformadores utilizados são trifásicos e maioritariamente arrefecidos a óleo. Um estudo feito no âmbito da introdução da diretiva 2009/125/EC relativa à implementação do *Ecodesign* em transformadores de potência e de distribuição [10], apresenta dados relativos à população europeia de transformadores, referindo que 99,99% dos transformadores de distribuição MT/BT são a óleo, sendo os restantes a seco.

Os transformadores a seco [11] são maioritariamente encapsulados em resina, podendo alternativamente ser imersos em vácuo. Apesar das maiores dimensões do que os a óleo, são aconselháveis em locais com elevado risco de incêndio e/ou em condições técnicas específicas, dado serem não inflamáveis e auto extinguíveis. Outro tipo de transformadores que tem vindo a ganhar mais importância, apesar do seu custo mais elevado, são os transformadores isolados a gás SF₆ [12]. Estes permitem aliar às vantagens anteriores a maior compactidade e menores custos de manutenção.

Os transformadores a óleo são geralmente mais eficientes que os a seco, tanto energética [9] como economicamente [13]. Podem ser um de dois tipos [14]: hermeticamente fechados ou equipados com tanque de expansão. O primeiro tem uma quota de mercado substancialmente maior, sendo por isso o foco do projeto. Este tipo de transformadores a óleo, cuja estrutura geral é sucintamente descrita no subcapítulo 2.2, apresenta como principal vantagem o facto de isolar o óleo do contacto com o ambiente exterior. Assim, evita-se a degradação do óleo quer por oxidação quer por entrada de água. O transformador torna-se também mais simples, nomeadamente pela ausência de equipamento de secagem do ar, reduzindo globalmente os custos de manutenção.

O tempo de vida estimado inicialmente para qualquer transformador depende de fatores como o seu sistema de isolamento e refrigeração, os materiais utilizados e o processo de fabrico. Durante a sua operação, o tempo de vida útil real dos transformadores pode ser reduzido por estes estarem constantemente sujeitos a distúrbios elétricos, mecânicos, térmicos

ou ambientais. No entanto, a sua operação muito abaixo da potência para o qual foram criados permite também que o tempo de vida útil supere grandemente aquele para o qual foi desenvolvido. No caso dos transformadores de distribuição a óleo, estes são normalmente concebidos para um tempo de vida útil de 40 anos, sendo vários os casos em que alcançam os 60 [15].

2.2 - Transformadores a Óleo Hermeticamente Fechados

Na estrutura geral de um transformador de distribuição MT/BT a óleo hermeticamente fechado, visível na figura 2.1, podem ser destacados os seguintes elementos: o núcleo, os enrolamentos, as travessias, o tanque, o óleo e os comutadores.



Figura 2.1 - Estrutura de um transformador a óleo hermeticamente fechado [16].

Os materiais [10] utilizados no núcleo e nas espiras contribuem significativamente para o custo total de um transformador. O núcleo é habitualmente feito de aço de grão orientado laminado a frio. As lâminas são finas e isoladas com um verniz, de forma a evitar correntes de Foucault. O núcleo é fixado com uma estrutura intermédia à base do tanque, de modo a que sejam reduzidos a vibração e o ruído, garantindo que o óleo circula em redor de todo o núcleo e espiras.

As espiras [10] são geralmente feitas de cobre (90%) ou alumínio (10%) e são isoladas com celulose para evitar curto circuitos.

2.2 Transformadores a Óleo Hermeticamente Fechados

As travessias, geralmente feitas através de isoladores cerâmicos [11], servem para isolar os cabos da rede de entrada e saída do tanque. Funcionam ainda como terminação dos cabos de entrada e saída e dos cabos provenientes das espiras.

As paredes do tanque [11] são feitas com laminas flexíveis de aço corrugado por forma a que se deformem perante a expansão térmica do óleo ou perante a indesejada existência de gases no interior (decorrente da degradação do equipamento). Nas paredes laterais, são colocados dissipadores que aumentam a superfície em contacto com o ar envolvente, contribuindo para uma maior eficiência do arrefecimento do sistema. O tanque e os acessórios devem ser galvanizados ou revestidos a epóxi e pintados. Na superfície exterior deve ser utilizada uma tinta de tons cinza de modo a potenciar a radiação de calor e, simultaneamente, proteger da corrosão provocada pelo ambiente envolvente. Por sua vez, o interior deve ser pintado com um verniz que impossibilite o contacto direto com o óleo. Neste tipo concreto de TD, o sistema de refrigeração é geralmente a convecção natural no óleo e no ar externo e a irradiação térmica na carcaça do TD (Oil Natural and Air Natural, ONAN).

O óleo utilizado tem assim, para além da função de arrefecimento dos enrolamentos e do núcleo, a de isolamento elétrico e a de preservação do núcleo e dos enrolamentos (impedindo a oxidação do papel de celulose que os envolve na maioria dos transformadores). O óleo utilizado é geralmente óleo mineral, obtido da refinação do petróleo, existindo outras soluções mais ecológicas e com pontos de inflamação e combustão a temperaturas mais elevadas [17]. O silicone líquido, com as vantagens de ser auto-extinguível em caso de incêndio e de ter uma alta estabilidade térmica, apresenta como inconvenientes a viscosidade elevada para altas temperaturas, a baixa capacidade de lubrificação e a biodegradação limitada. Em termos de biodegradabilidade, principalmente o éster natural, proveniente de óleos vegetais, mas também o éster sintético, manipulado quimicamente, são as melhores opções. O éster natural consegue melhores pontos de inflamação e combustão, tendo o sintético as vantagens de ser mais resistente à oxidação e de apresentar melhor performance a baixas temperaturas. O éster sintético tem ainda a particularidade de ser higroscópico, mantendo as suas características com a absorção de humidade.

Os comutadores (ou seletores de tomadas) estão apenas presentes em alguns TD e servem para regular a tensão de saída do PT, garantindo que cumprem os padrões exigidos independentemente da carga à qual estão sujeitos. Os comutadores convencionais, por serem mecânicos, constituem uma das principais fontes de falhas (como mostra o estudo da CIGRÉ “*Transformer Reliability Survey*” para transformadores de subestações [18]). Assim, nos últimos anos, os comutadores eletrónicos [19] têm vindo a ser os escolhidos, o que tem contribuído para a redução dos problemas causados pelos comutadores convencionais.

2.3 - Fatores Relevantes na Caracterização de Estado

O estado de um transformador de distribuição pode ser definido tendo em conta a sua taxa de falhas, sendo que a sua evolução ao longo do tempo varia de acordo com a *bathtub curve* [20], representada na figura 2.2. Segundo este gráfico, o tempo de vida destes equipamentos pode ser dividido em três fases, com base na sua taxa de falhas e na sua origem. Em todas as fases, as falhas refletem-se, por exemplo, na alteração de propriedades físicas e químicas do óleo [15].

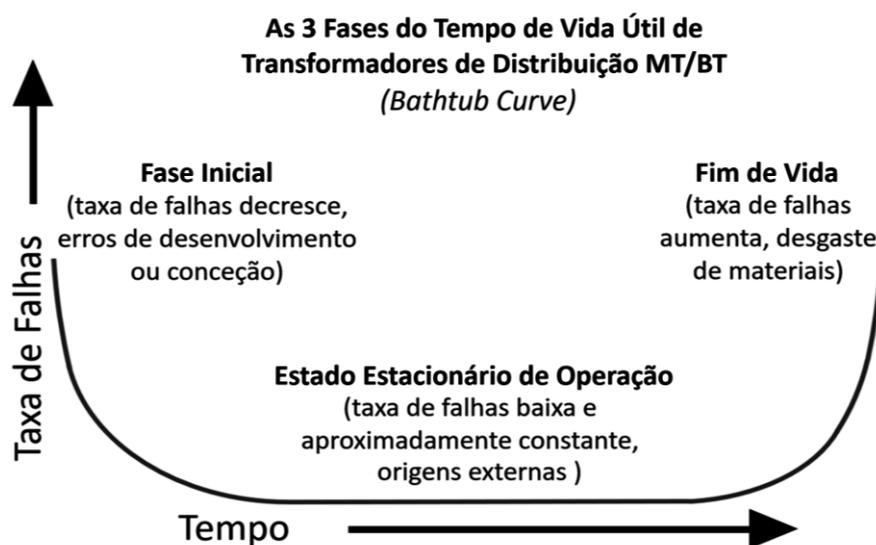


Figura 2.2 - Gráfico da curva *bathtub* (adaptado de Wilkins [21]), que representa a taxa de falhas ao longo do tempo de vida de um transformador de distribuição. As diferentes fases estão associadas diferentes variações de taxa de falhas e diferentes proveniências.

Assim, a fase de falhas iniciais caracteriza-se por uma taxa de falhas decrescente com o tempo, com estas a deverem-se principalmente a erros no desenvolvimento ou conceção do equipamento. A segunda fase, denominada de estado estacionário de operação, apresenta uma baixa taxa de falhas aproximadamente constante, somente de origens externas como distúrbios elétricos, mecânicos, térmicos ou ambientais. Por fim, na fase de desgaste, a taxa de falhas tende a aumentar rapidamente com o tempo, fruto do desgaste de materiais como o papel que reveste as espiras, ou do próprio óleo.

Torna-se assim relevante a monitorização de várias características do óleo, como a temperatura (normalmente no topo e/ou junto às espiras), a pressão e a existência de gases, que justifica o recurso ao equipamento de segurança DGPT2 [22]. O aumento da temperatura é provocado por uma sobrecarga do transformador (i. e., pelo uso intensivo acima das condições para as quais foi concebido, tal como esperado pela lei de Joule) ou como resultado de defeitos elétricos no seu interior. Curto circuitos internos ao óleo originam um aumento de pressão instantâneo pela ionização de gases, num fenómeno denominado arco elétrico. Defeitos nas partes ativas dos transformadores, particularmente no isolamento das espiras, originam

também arcos elétricos, ainda que insuficiente para se traduzirem no aumento instantâneo de pressão. Neste caso, é a concentração de gases gerados na decomposição do meio e posteriormente dispersos no óleo que permite a monitorização do estado.

Os dois tipos de origens de arcos elétricos mencionados são o resultado de descargas parciais. As descargas parciais [23] são descargas localizadas numa porção de um meio dielétrico utilizado como isolador elétrico. Estas ocorrem quando na porção do meio considerada, o gradiente de tensões é superior ao permitido pela sua rigidez dielétrica, sendo manifestadas em diversas formas (figura 2.3). As descargas parciais tendem a ocorrer em cavidades de materiais condutores ou em impurezas dos meios dielétricos, como gases dispersos no óleo dos transformadores.

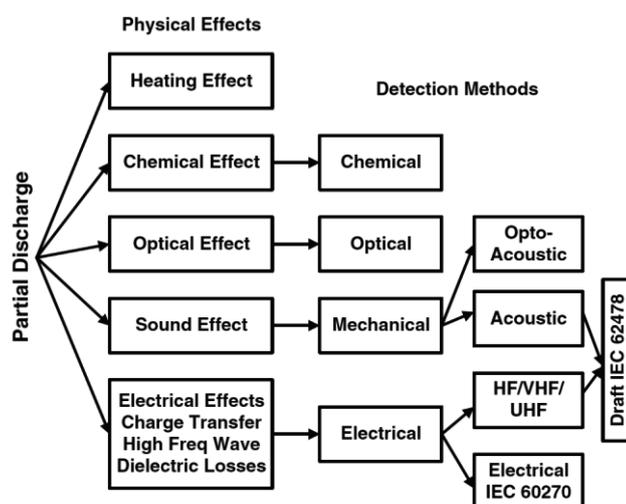


Figura 2.3 - Diferentes efeitos físicos ou químicos através dos quais as descargas parciais se manifestam e os respetivos métodos de deteção [24].

Outro caso de descargas parciais relevantes nos transformadores de distribuição ocorre nas travessias que funcionam como terminações dos cabos de MT. Apesar de menos frequentes, quando ocorrem provocam estragos mais significativos que implicam uma maior urgência na manutenção. Tratam-se de exemplos de descargas de efeito de coroa que ocorrem em meios gasosos na presença de campos elétricos irregulares. As suas consequências [25] incluem a redução de eficiência, a interferência eletromagnética e a degradação dos isoladores devido à radiação ultravioleta originada.

Dados relativos à tensão e potência de entrada e saída do transformador e o seu tempo de utilização podem ajudar a caracterizar o seu estado de funcionamento. Estes poderão ainda indicar a existência de problemas no comutador.

A análise dos gases dispersos no óleo permite identificar a frequência e o tipo de falhas que ocorreram [15].

Também os dados relativos à vibração dos transformadores podem ser úteis para analisar distúrbios mecânicos, ainda que estes possam também ser detetados por meios sonoros.

2.4 - Estado da Arte de Sistemas de Monitorização

No artigo “7 *Predictive Maintenance Technologies That Enhance Power Equipment Reliability*” [26], S. Frank Waterer salienta as seguintes soluções como as atuais possibilitadoras da manutenção preventiva de equipamentos de distribuição de electricidade, tendo em vista a melhoria da sua fiabilidade:

- Inspeções visuais por equipas técnicas especializadas com o intuito de identificar a saúde elétrica e mecânica dos equipamentos;
- Termografia por infravermelhos que, graças à localização dos pontos a elevadas temperaturas, permite detetar defeitos não visíveis ao olho humano;
- Monitorização online da temperatura que permite uma avaliação quase que instantânea do estado do equipamento, detetando anomalias numa fase inicial;
- Análise de fluidos de isolamento, medindo propriedades físicas, como a rigidez dielétrica, ou propriedades químicas, como aos gases dissolvidos;
- Monitorização online de descargas parciais que, à semelhança do caso da temperatura, permite também uma análise quase que instantânea;
- Monitorização online de dados de voltagem, corrente e potência, que permite também analisar quando ocorrem perigos como correntes transitórias;
- Dispositivos inteligentes de proteção que funcionam como disjuntores, desligando o sistema em casos limite.

Relembrando que diferentes equipamentos têm diferentes especificidades e preços, os sistemas desenvolvidos para monitorização têm de ser naturalmente adequados a cada caso. Enquanto que para os transformadores de potência estes dispositivos estão já amplamente estudados e existe uma oferta muito diversa (podendo incluir, por exemplo, a análise de gases dissolvidos online, a monitorização da localização de descargas parciais tridimensionalmente ou a análise ao espectro de frequências da vibração e do ruído produzido [27]), os TD apenas se tornaram alvos de estudo recentemente. Os sistemas a aplicar a TD tem necessariamente de utilizar tecnologias mais simples devido ao menor custo associado a estes equipamentos e à sua menor complexidade construtiva. São, de seguida, mencionados alguns artigos sobre a monitorização de postos de transformação em geral e de transformadores MT/BT em particular.

O DGPT2 [22] é um dispositivo de segurança passivo de monitorização local que se pode encontrar em alguns TD. Este dispõe de sensores mecânicos que permitem a análise de variáveis como temperatura e pressão do óleo, bem como da emissão de gases e da fugas de óleo. A sua principal função é o alerta local de que as variáveis analisadas alcançaram um limite parametrizado (*output* binário), permitindo ainda gerir o funcionamento do próprio

transformador de modo a que o desligue em condições limite. Para esta gestão, faz uso de um conector standard do tipo *Harting*, que funciona pela abertura e fecho de relés (contactos secos) para se conectar a disjuntores.

A ABB [28] comercializa desde março de 2017 aquele que apelida como o primeiro TD digital. Este recolhe variáveis como a temperatura ambiente e a do topo do óleo, a pressão e humidade do óleo, a presença de hidrogénio no óleo e a tensão e a corrente de entrada e saída. Com base nestes dados permite a análise do seu estado de funcionamento, incluindo a taxa de perda do tempo de vida útil. Dispõe ainda de um localizador GPS e permite a comunicação por vários meios, incluindo Wi-Fi, Ethernet e dados móveis.

A ITRON [29] desenvolveu um sistema não intrusivo de monitorização térmica e elétrica de TD, sendo este unicamente constituído por um contador de eletricidade nas travessias de BT. Para determinar valores como a temperatura do óleo no topo do tanque ou na proximidade das espiras, faz uso do modelo térmico constituído por equações diferenciais apresentadas no standard IEC60076-7. Este modelo aceita como input a temperatura ambiente e o fator de carga (determinado por um conjunto de outros parâmetros, por sua vez determinados pelo algoritmo Levenberg-Marquardt). É também calculado o fator k , presente na norma ANSI/IEEE C57.110, que permite fazer uma compensação às perdas que ocorrem nos transformadores e que se manifestam pelo seu aquecimento quando alimentam cargas não lineares. Um fator k de 1 corresponde a uma carga BT linear, sendo que quanto mais alto for k , maior a quantidade de harmónicos presentes e maior o aquecimento do transformador. O modelo elétrico, dado pelo modelo matemático Kapp, permite calcular quantidades relativas à MT como tensão fase a fase, corrente de entrada e perdas internas. Os modelos são cruzados e recalculados de modo a disporem de informação atualizada.

Pawar, et al. [30] desenvolveram um sistema que monitoriza a temperatura dos enrolamentos, o nível de óleo, as correntes de entrada e saída do transformador, a vibração numa das faces externas e a temperatura e humidade do ar envolvente. Com recurso a um módulo GSM/GPRS, envia periodicamente os dados recolhidos para uma base de dados e permite o alerta por SMS em caso de emergência.

Num outro artigo [31], apresenta-se um teste de prova de conceito de tecnologia desenvolvida pela empresa SOCOMEC. Aplicada em PT, esta permite a monitorização de redes de BT e a visualização em tempo real do estado dos equipamentos monitorizados por intermédio de uma aplicação Web. Possui também a funcionalidade de gerar alarmes em condições limite. Este sistema analisa variáveis como tensão, corrente, potência, frequência e correntes de distorção harmónicas, estando a ser perspectivado a adição de outras como a temperatura do transformador e da subestação, variáveis relativas ao estado do funcionamento do sistema de refrigeração da subestação, uma variável binária relativa ao estado da porta (aberto/fechado) e ainda níveis de ruído sonoro.

A Ellevio [32] instalou três sistemas de monitorização de postos de transformação distinguidos em diferentes níveis de atuação (consoante o modo de operação, as variáveis analisadas e os respetivos indicadores de falhas) em 6 subestações em Estocolmo, como resume a tabela 2.1. Nas conclusões deste projeto, sugere-se utilizar sistemas com diferentes níveis de atuação em PT com diferentes perfis de utilização. Em PT novos serão preferidos os sistemas mais avançados, enquanto que em PT já existentes os sistemas a aplicar devem ser simplificados. É ainda referido que deve ser priorizada a informação mais relevante no processo da sua comunicação e que intervalos de 15 minutos garantem um bom equilíbrio entre qualidade e quantidade.

Tabela 2.1 - Resumo dos sistemas de monitorização aplicados pela Ellevio em Estocolmo em projeto de avaliação [32].

Station name	8456	8410 and 8371	8593 and 8594	8343
station type	2 × 800 kVA	2 × 1000 kVA 1 × 1600 kVA	1 × 800 kVA 1 × 800 kVA	4 × 1000 kVA
supplier/system	A	B	C	C
system cost	\$\$\$	\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$\$
installation	new	retrofit	new	retrofit
Year	2014	2015 2016	2015 2016	2016
monitoring level	high	medium	high	high
measurements	LV temperatures MV	LV temperatures	LV temperatures MV LV-feeders	LV temperatures
automatic switchover	MV	none	LV	MV ^a
network operating system	SCADA DMS server	supplier's own system server	SCADA DMS server	SCADA DMS server
communication	3G and 4G (public operator)	3G and 4G (public operator)	4G (isolated APN) Optical fibre	4G (isolated APN)
battery backup	12 h	15 h	2 h	2 h
dimensions	800 × 400 ×	1000 × 560 ×	2000 × 800 ×	2000 × 800 ×
H × W × D, mm	300	580	600	600

O artigo “*Improving asset management with online partial discharge monitoring of ring main units and secondary substations*” [33] propõe um sistema de monitorização de descargas parciais, que pode ser utilizado em postos de transformação, tirando partido da redução de custos de transdutores e de microcontroladores nos últimos anos. Faz uso de sensores ultrassónicos e de sensores de acoplamento capacitivo à terra e permite diversas formas de comunicar alertas incluindo Email, SMS ou ligação a um SCADA.

Um projeto [34] conjunto da ENEIDA, da EDP, da EFACEC e do laboratório LIBPhys-UC originou também um sistema de monitorização adaptado a diferentes tipos de postos de transformação. A tabela 2.2 resume o tipo de sensores usados em cada caso. O sistema permite avisar falhas ocorridas e alertar para avarias prestes a ocorrer com base em análise de tendências. Para tal, faz uso de comunicação SCADA.

2.5 Enquadramento Específico e Requisitos do Projeto

Tabela 2.2 - Sensores utilizados na monitorização de postos de transformação em função do seu tipo [34].

SENSORS			Substation type		
Assessment criteria	Equipment	Monitored parameter	Pole-mounted	Ground level	Underground level
Operating status	Power Transformer	Vibration and external temperature (measured on the equipment wall)	√	√	√
	Fuses	Current level in the downstream circuits	√	√	√
Internal safety conditions	Air conditions	Air temperature and moisture contents		√	√
	Fire	Detection of air temperature gradients		√	√
	Flood	Detection of water at ground level			√
	Water pump automatic testing	Currents on motor start-up and regular working modes			√
External safety conditions	Intrusion detection	Door and vents opening status	√	√	√
	Detection of Power Transformer theft	Power Transformer proximity detection	√		

É ainda importante referir o artigo “Wireless Connection In Distribution Substation” [35] que debate a importância da utilização de comunicação sem fios em sensores a aplicar a PT. Refere como principais vantagens a facilidade de instalação, a manutenção e a atualização das redes não cabladas, que se traduzem numa redução de custos. Apresenta ainda uma solução recorrendo a Zigbee para a monitorização da potência de entrada nos *feeders*.

2.5 - Enquadramento Específico e Requisitos do Projeto

A Eneida Wireless & Sensors, S.A. projeta, desenvolve e comercializa redes de sensores sem fios e sensores inteligentes integrados nas desafiantes estratégias de transformação digital de grandes indústrias transformadoras e de *utilities* de transporte e de distribuição de eletricidade.

No caso concreto destas *utilities*, as soluções disponibilizadas pela empresa permitiram já importantes melhorias em termos de qualidade de serviço, eficiência e eficácia de manutenção, tempo de vida útil dos equipamentos, eficiência energética, segurança e redução de riscos ambientais.

Este projeto de tese enquadra-se nas atividades de Investigação e Desenvolvimento tanto da Eneida como do laboratório LIBPhys-UC, já com várias parcerias. O intuito é a conceção de uma unidade multissensorial que permita avaliar o estado de funcionamento de TD e que possa ser aplicado a equipamentos existentes ou em produção. Este dispositivo permitirá averiguar a sua necessidade de manutenção ou substituição. Pela informação continuamente recolhida e pela constante análise ao estado do equipamento, nomeadamente a frequência de sobrecargas

ou de subcargas, permite ainda fornecer informação para uma possível recolocação de transformadores. Garantir-se-á assim a otimização da sua utilização e a consequente redução do investimento global nestes equipamentos.

Em termos de qualidade de serviço, o dispositivo terá um papel importante não só no sentido de reduzir as interrupções de fornecimento energético, mas também na análise de fatores como o ruído provocado pelos equipamentos, que podem incomodar clientes nas proximidades.

O produto será desenvolvido tendo em conta os critérios do mercado nacional com destaque para a EFACEC, como produtora e fornecedora de serviços de manutenção de transformadores, e para a EDP Distribuição, como a empresa à qual são concessionados os serviços de distribuição de energia elétrica quase na totalidade do território português. Existe mesmo a possibilidade de este dispositivo ser utilizado no âmbito do projeto “NEXTSTEP - NEXT distribution SubStation improvEd Platform” [36]. Tendo como promotor principal a EFACEC, este projeto pretende desenvolver um protótipo de um PT do futuro. No entanto, é importante ter em conta que a procura expectável no mercado nacional será insuficiente para tornar o produto financeiramente viável.

Deve assim ser aproveitada a diferenciação tecnológica por este oferecida e o seu potencial inovador para projetá-lo desde início para o mercado global, tendo em atenção principalmente as exigências do mercado europeu. Fruto do reconhecimento da marca Eneida e da sua internacionalização, contactos com alguns dos principais operadores de distribuição elétrica a nível europeu permitiram uma perceção do que o mercado procura.

Surgiram duas hipóteses iniciais para o desenvolvimento do sistema pretendido: uma mais conservadora, com os sensores a serem colocados no interior dos transformadores, e uma tecnologicamente mais desafiante, não intrusiva.

A primeira solução permitiria a determinação direta de propriedades como a temperatura do óleo, o seu volume e pressão, bem como a deteção de descargas parciais no interior do transformador com recurso a antenas e testes para analisar a composição química do óleo. Como principal desvantagem, a sua aplicação poderia implicar grandes investimentos, maiores que o custo do próprio sistema, já que muitos transformadores não possuem entrada para este tipo de sensores. Assim, o processo de instalação envolveria sempre um tempo de inatividade longo com uma necessária deslocação a uma fábrica de modo a ser adaptado. Também o custo da solução temporária, envolvendo postos de transformação móveis ou geradores a gásóleo enquanto o transformador está inativo, seria elevado.

A segunda opção, não sendo intrusiva, iria tornar a aplicação do sistema muito mais simples. Aliando a este facto soluções como a captação de energia do meio envolvente e a comunicação sem fios, permitiriam reduzir o investimento global em grande escala. Tal deve-se ao facto de

que, ao evitar a colocação de cabos num posto de transformação, pela segurança que seria necessária, permite reduzir o tempo de inatividade. Com a devida notificação aos clientes, para um tempo de inatividade curto, esta opção pode inclusivamente evitar o uso de PT móveis ou geradores a gasóleo. A sua desvantagem é a impossibilidade da determinação do volume e pressão do óleo, bem como a análise da sua composição química. A temperatura do óleo seria obtida com base em sensores acoplados diretamente ao transformador e por alguns nas proximidades que possibilitariam estimar a temperatura pretendida e/ou analisar a refrigeração do PT. As descargas parciais no interior do transformador seriam detetadas por sensores ultrassónicos.

Quando confrontado com ambas as possibilidades, o sensor não intrusivo recolhe as preferências. Tal opção é particularmente observada em mercados como o Reino Unido nos quais as redes são subterrâneas, reduzindo ainda mais o tempo de aplicação, dada a redução de constrangimentos na colocação do dispositivo.

2.6 - Especificação do Projeto

Pretende-se desenvolver o dispositivo de modo a ser não intrusivo e a não dispor de cabos quer para alimentação quer para comunicação. Da discussão anterior, na secção 2.3, acerca dos fatores relevantes na caracterização do estado de funcionamento de um transformador, será impossível a determinação da pressão do óleo, da temperatura no seu interior, do seu nível de altura, bem como da análise dos gases nele dissolvidos. Dados relativos à tensão e potência de entrada e saída do transformador e ao seu tempo de utilização serão recolhidos por sistemas externos ao dispositivo desenvolvido, devendo a informação ser conjugada para ser analisada e inserida numa base de dados.

Quanto à temperatura, a utilização de sensores no topo da carcaça do TD, na sua proximidade e no exterior do PT, permitirá estimar a temperatura do óleo no topo do transformador bem como analisar a existência de problemas na refrigeração do PT. De modo a verificar quais dos dados referidos são necessários para obter a temperatura do topo do óleo, recorreu-se a simulações computacionais no software COMSOL Multiphysics [37], fazendo uso de uma licença de avaliação gratuita. Para tal, foi encontrada a solução estacionária para várias temperaturas de uma camada de óleo e do ar externo ao PT, sendo recolhida a temperatura num ponto de uma estrutura de alumínio idealizada para o sistema, de acordo com a figura 2.4. Os dados recolhidos foram posteriormente analisados recorrendo ao software Matlab [38] (disponibilizado pela Universidade de Coimbra). Como é visível na figura 2.5, os dados alinham-se de acordo com um plano, onde o gradiente se alinha com o eixo da temperatura do ponto da base da estrutura idealizada ($p_{01} \approx 1$, $p_{00} \approx p_{10} \approx 0$), permitindo confirmar que o valor do ponto da base na estrutura TD em U é praticamente igual à do óleo no topo do TD.

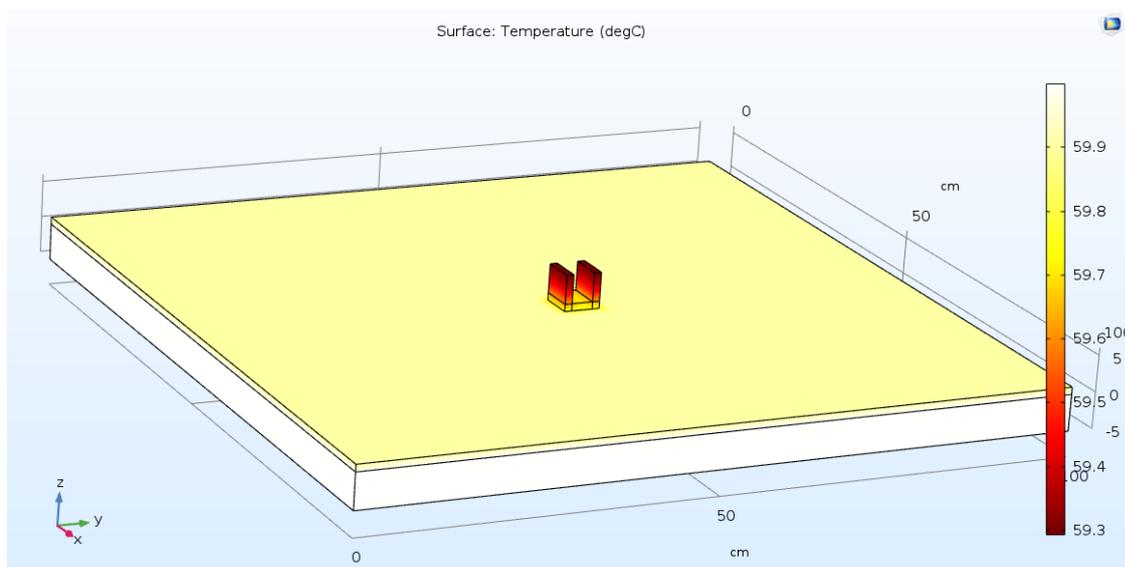


Figura 2.4 - Solução estacionária para a temperatura da camada de óleo (a branco) de 60° e para o ar envolvente à estrutura a 20°, recorrendo ao software COMSOL Multiphysics. A simulação envolveu ainda uma camada de aço correspondente à parede superior do tanque do transformador e a estrutura em alumínio em U que servirá de base ao dispositivo a desenvolver.

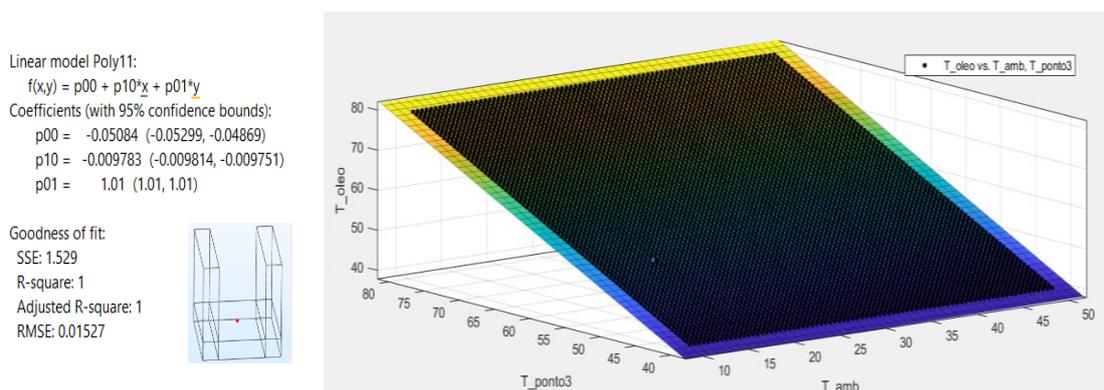


Figura 2.5 - Ajuste dos dados obtidos das simulações para diferentes valores de temperatura do óleo e do ar envolvente a um plano, recorrendo à ferramenta “Curve Fitting Tool” do Matlab. As temperaturas do óleo (T_{oleo}), do ar envolvente (T_{amb}) e do ponto a vermelho representado na estrutura em U (T_{ponto3}) são dados em graus celsius. É possível verificar que a temperatura do óleo é facilmente obtida pela equação do plano dada por $z = f(x,y)$ com x e y representando, respetivamente, a temperatura do ar envolvente e do ponto considerado na estrutura. É possível confirmar que a temperatura medida na carcaça é praticamente igual à do óleo no topo do TD ($p01 \approx 1$, $p00 \approx p10 = 0$).

Quanto às descargas parciais no interior do transformador, excluídos os meios de deteção químicos e óticos, por se pretender que o dispositivo seja não intrusivo, o facto da carcaça funcionar como gaiola de Faraday impossibilita também a sua deteção por meios elétricos. A sua deteção terá assim de ser feita por meios acústicos. Existem então duas opções a considerar: fazer a deteção para efeitos de contagem total ou para contagem parcial após análise espectral sonora. O primeiro caso é o escolhido visto que tem um preço muito mais baixo, por utilizar os vulgares sensores de ultrassons com pico de sensibilidade nos 40 kHz, e tem um fator de qualidade elevado. Devido à complexidade dos cálculos, dado o baixo comprimento de onda, foi impossível obter resultados com simulações em Comsol Multiphysics.

Ainda assim, é uma solução com um grande grau de certeza de operacionalidade visto tratar-se de uma metodologia recorrente [24], particularmente para transformadores de potência.

Seguindo as tendências que se têm verificado de preferência pelo digital ao invés do analógico, e pelo software ao invés do hardware, o mais sensato seria a utilização de um microfone que, por análise espectral, permite a deteção das descargas parciais nas travessias e a análise do zumbido (ruído sonoro) provocado pelo transformador, em inglês *humming noise*. A análise ao ruído tem como principal função o cumprimento dos regulamentos de qualidade em vigor, podendo esta informação ser também útil na caracterização do estado de funcionamento do equipamento.

Ainda assim, de modo a evitar que se recorra tantas vezes ao cálculo de FFT's (com os respetivos custos energéticos), o microfone é complementado por outra opção para a deteção das descargas parciais nas travessias: a deteção do sinal RF produzido nas descargas elétricas [39], que permite uma maior fiabilidade e a eliminação de falsos alarmes, por comparação com a deteção ultrassónica.

De referir ainda que pelo elevado número de TD que não usam comutadores de tomadas e pela crescente utilização de comutadores eletrónicos que reduzem grandemente as falhas que eram causadas pelos convencionais, o desenvolvimento de instrumentação para a sua monitorização não é considerado neste projeto.

Capítulo 3

Arquitetura do Sistema

3.1 - Redes de Sensores sem Fios e a IoT

A *Internet of Things* (IoT) tem como intuito conectar diversos dispositivos entre si e a sua ligação à internet. É possível, por intermédio de uma *gateway*, ligar à internet dispositivos com outros protocolos de comunicação. Deste modo, os pacotes de mensagens trocadas pelos elementos dessa segunda rede são mais curtos (do que o permitido pelo protocolo de internet), o que permite reduzir o consumo energético destes. O facto de a *gateway* reunir a informação desses elementos permite ainda reduzir o processamento de uma unidade da rede de internet que necessite de conhecer o estado de todos eles. A principal vantagem das redes com endereçamento IP obtida pela ligação direta à internet - a flexibilidade na adição ou alteração de funções - não faz necessariamente sentido em algumas aplicações específicas como redes de sensores sem fios (*Wireless Sensor Networks*, WSN). Nestes casos, perspectiva-se que as funções inicialmente definidas serão mantidas em todo o tempo de vida útil do sistema.

Uma WSN é assim constituída por: um ou mais nós, que podem ser sensores ou atuadores (captam dados do mundo físico ou interferem com este), uma *gateway* (agrega os dados e permite a sua conexão à internet) e por um servidor (onde se encontra a base de dados onde a informação é guardada), como mostra a figura 3.1.

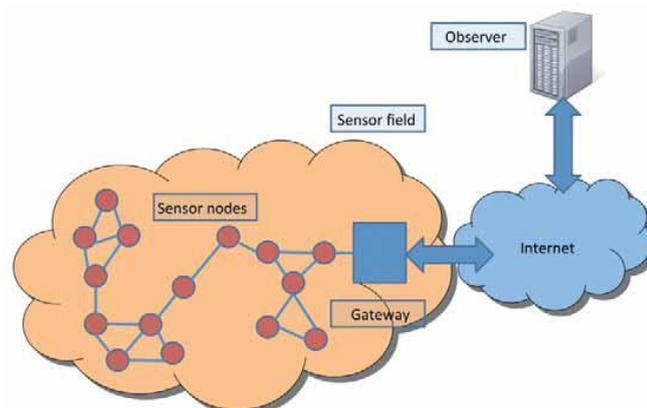


Figura 3.1 - Arquitetura geral de uma rede de sensores sem fios (WSN) [40].

No âmbito deste projeto, o dispositivo em desenvolvimento constitui um nó de sensores que será acoplado ao topo de um TD, com a função de monitorizar (mais detalhadamente descrito no subcapítulo seguinte). A *gateway* terá não só a função de interligação dos diferentes protocolos de comunicação, mas também a de proceder à fusão sensorial com o intuito de obter informação de mais alto nível (como por exemplo em casos de deficiente ventilação do PT ou de reunião de condições para a deflagração de incêndios).

A *gateway* deverá ainda permitir o armazenamento de informação, quer para cálculos, quer para uma eventual falha nas comunicações aos servidores; bem como permitir atualizações do software dos nós de rede *over the air*.

Dado o conhecimento completo de todos os nós da rede por parte da *gateway*, a não necessidade de os nós partilharem informação entre si e a curta distância entre todos os elementos desta rede, não é necessário recorrer à topologia *mesh*. Com efeito, a topologia de rede em estrela revela-se como a mais adequada.

A utilização de protocolos de comunicação reconhecidos permite, simultaneamente, a redução do tempo de desenvolvimento e, principalmente, uma maior facilidade de integração em redes já existentes ou a adição de outros nós no futuro. Assim, este será o tema de um capítulo, onde será referida também a *gateway* a utilizar.

De notar que esta opção por duas redes de comunicação, motivada principalmente pela redução de consumo energético do dispositivo multissensorial, acrescenta uma barreira de segurança a ciberataques. Com esse intuito, cabe também à *gateway* a gestão de encriptações, certificados ou autorizações e autenticações. No caso do nó em desenvolvimento, por ser exclusivamente de sensores e não de atuadores, a cibersegurança [2] poderia, à partida, não ser considerada um fator de risco. De facto, não existe necessariamente problemas quanto à não confidencialidade dos dados por este recolhidos. É, no entanto, de extrema importância principalmente por três motivos: para evitar os chamados “ataques vampiro” à disponibilidade das WSN, caracterizados pelo estimular da comunicação com o intuito de esgotar a energia dos nós; pela falsificação de identidade (autenticidade) de nós externos à rede que se façam passar por nós existentes; e pelo ataque à integridade da informação em trânsito.

3.2 - Blocos Funcionais e Estrutura do Nó de Sensores

Nos blocos funcionais do sistema, visíveis na figura 3.2, podem distinguir-se quatro blocos: o módulo de alimentação, o módulo de comunicação, o microcontrolador e a sensorização.



Figura 3.2 - Esquemática dos blocos funcionais do sistema, distribuídos em quatro blocos.

Como visível na figura 3.3, a estrutura do dispositivo multissensorial foi baseada numa peça de alumínio “em forma de U”, sendo que nas faces laterais externas serão colocadas as termopilhas e os respetivos dissipadores, de modo a aproveitar o diferencial térmico (entre o ar e a peça U acoplada ao transformador) para alimentar o sistema em potência.

Sobre a base do U é feito um orifício para a colocação de um sensor ultrassónico, de modo a que os sinais provenientes do interior do transformador não sofram ainda mais atenuação (quer pela passagem entre meios densos, quer pelas oscilações mecânicas que podem resultar do deficiente acoplamento).

Também sobre a base, são colados com cola térmica três sensores de temperatura. Estes constituem a placa de circuito impresso mais pequena, que será ligada à placa vertical por intermédio de uma ficha de tipo *header*. De notar a importância da disposição triangular destes sensores de modo a garantir o assentamento e o conseqüente contacto térmico dos sensores com a base.

A placa de circuito impresso na vertical permite a colocação de um supercondensador e do circuito integrado de gestão de potência. É ainda responsável pela ligação à placa superior dos sensores de temperatura.

Na placa superior serão dispostos o microcontrolador, o módulo de comunicação, o microfone e a antena RF. Esta será fixada ao U com roscas M3.

Todas as paredes do U de alumínio serão revestidas de um material isolador térmico, como a cortiça, garantindo uma temperatura mais adequada para a eletrônica e a redução das perdas térmicas de modo a maximizar o diferencial térmico em ambas as faces das termopilhas.

Foi numa primeira fase pensada a hipótese de criação de aberturas no U de alumínio que funcionassem como prateleiras. Devido ao custo acrescido desta solução, optou-se pela utilização referida das roscas M3 para a fixação da placa do topo. Como a placa dos sensores de temperatura fica também fixa ao U com cola térmica, os conectores à placa vertical (da placa dos sensores de temperatura e da placa do topo) garantem uma rigidez mecânica suficiente à estrutura interna.

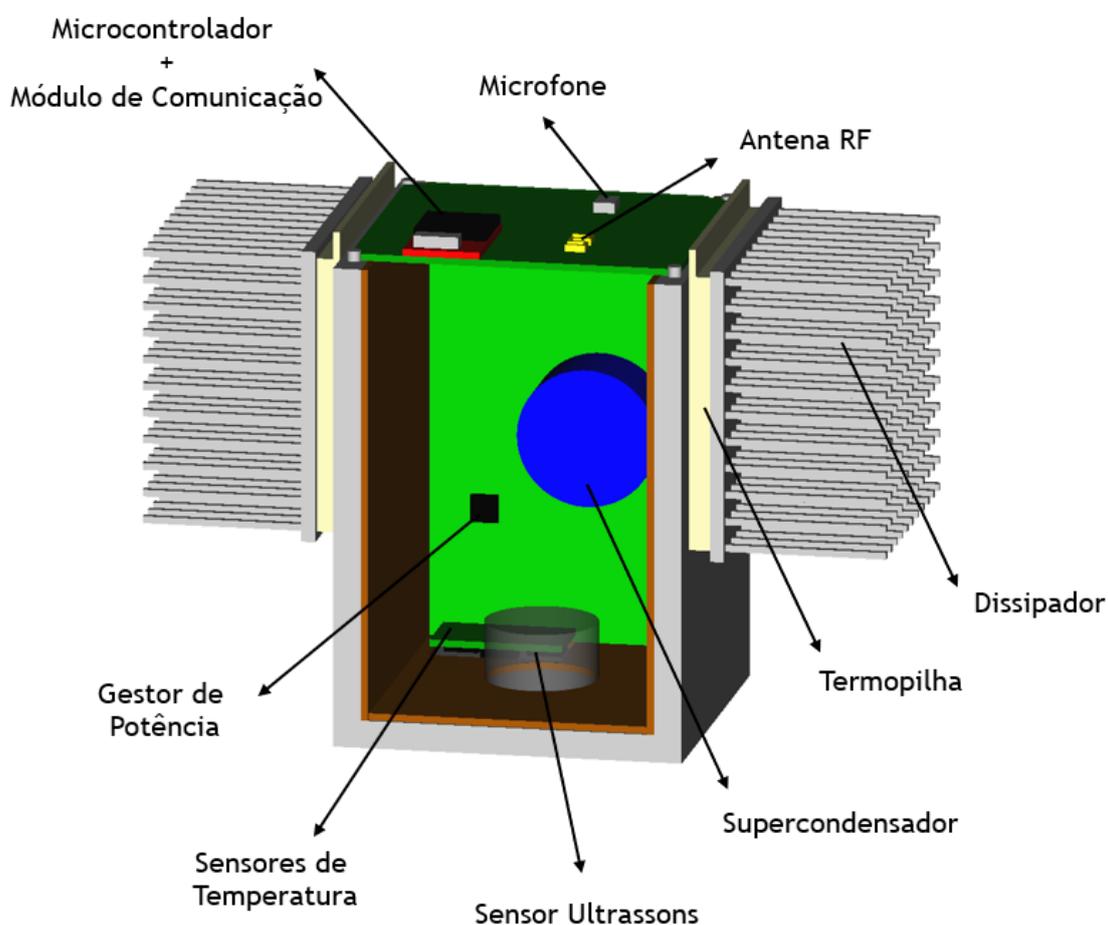


Figura 3.3 - Estrutura interna idealizada para o dispositivo multissensorial.

Importa, ainda, analisar o encapsulamento desta estrutura e o modo de fixação. Como visível na figura 3.4, onde se encontra uma representação do dispositivo final, com as respetivas dimensões, e das duas estruturas de proteção externas. Estas estruturas serão feitas com recurso a um material polimérico, de forma a que não seja criada uma gaiola de Faraday que impeça a deteção das descargas nas travessias. Este material terá de dispor de uma capacidade de resistência a elevadas temperaturas. Na figura 3.5 encontra-se um esquema para ajudar na

seleção dos polímeros com base na temperatura de utilização. O ABS e o policarbonato são possíveis alternativas.

A estrutura a amarelo terá como principal função a proteção dos dissipadores à radiação térmica da superfície do transformador. A existência de pequenos orifícios para a colocação de ímãs de neodímio, cobertos pelas faces verticais do U, adiciona-lhe a função de fixação do dispositivo.

A estrutura a azul serve para proteger a unidade ao mesmo tempo que, com o auxílio de fendas, promove o seu arrefecimento.

As estruturas permitem um encaixe perfeito entre si, entre as termopilhas e entre os dissipadores. Como o U, as termopilhas e os dissipadores se encontram colados entre si com cola térmica, a união das estruturas com dois parafusos é o bastante para garantir a rigidez mecânica do dispositivo.

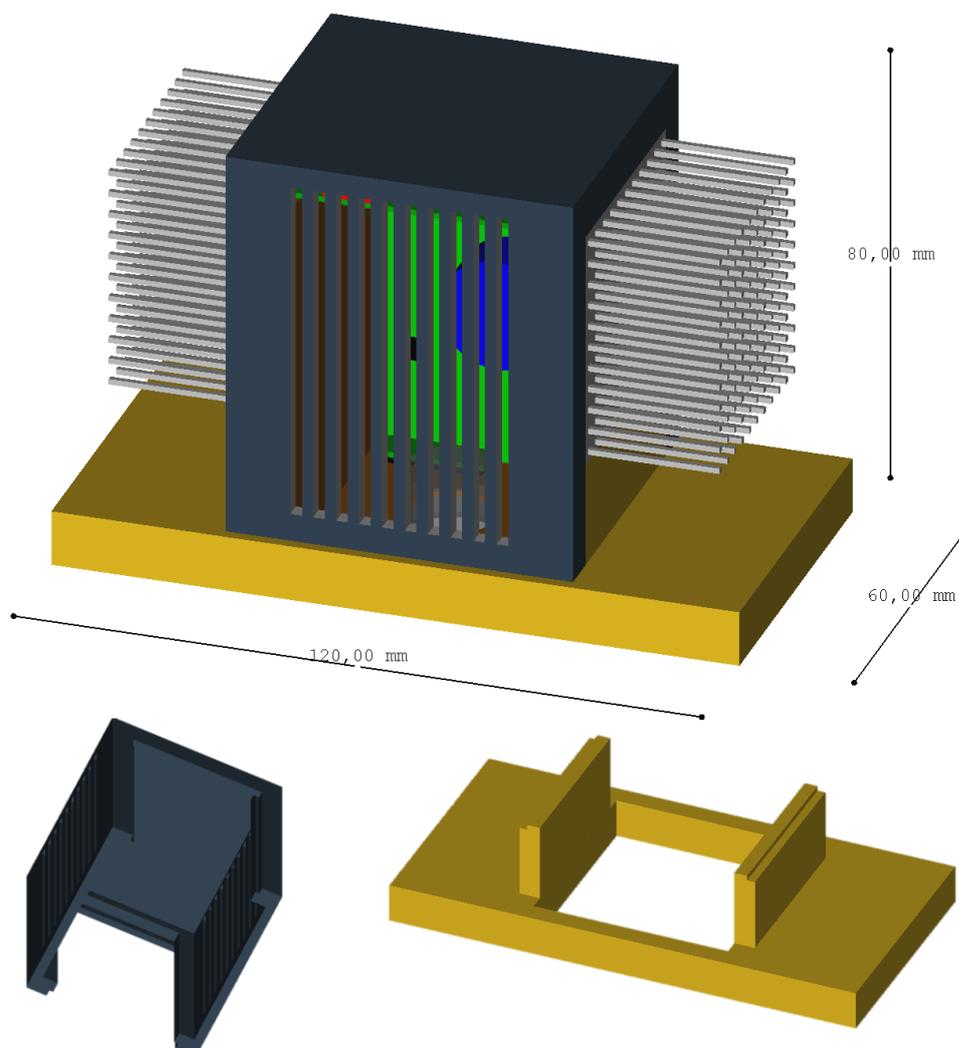
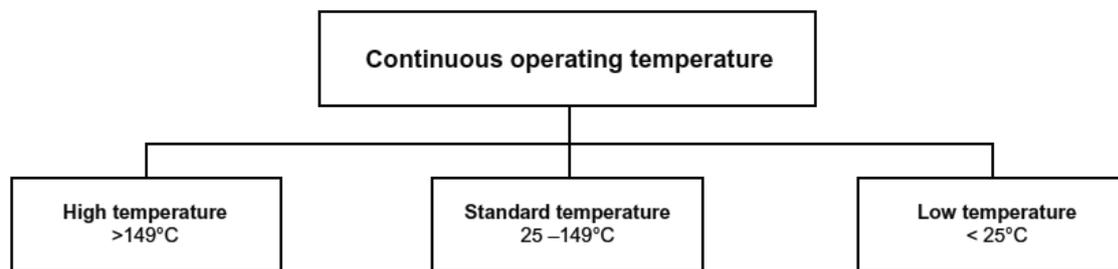


Figura 3.4 - Estrutura do dispositivo, com as respetivas dimensões. Representação ainda de detalhes das estruturas protetoras externas.



Plastic/polymer	°C
Polyimides	260-427
Silicones	204-316
Fluoroplastics	149-288
Polyamide-imide	271-285
Epoxy	79-260
Polyphenylene sulfide	260
Allyls	149-232
Phenolics	100-232
Polyethersulfones	204
Polysulfones	171-204
Melamines	149-204
Thermoset polyester	66-204
Ureas	93-177
Acrylate rubber	204
Fluorosilicones	204
Nylons	107-177
Thermoplastic polyester	154-160
Polyarylether	121-160
Polymethylpentene	121-160
Polycarbonate	82-154
Alkyds	121-149
Chlorinated polyethylene	149

Plastic/polymer	°C
PPO/PPE based	77-127
Polypropylene	96-121
Polyurethane	88-121
Vinyls	66-110
Polybutylene	107
Acetals	91-104
ABS and SAN	71-104
Polystyrene	52-96
ABS/Polycarbonate alloy	88-93
Acrylics	60-93
Cellulosics	49-93
Polyethylene and copolymers	49-82

Plastic/polymer	°C
Chlorinated polyethylene	-51
Polyurethane	-65
Fluorosilicone	-68
Silicone	-118
Fluoroplastics	-184

Figura 3.5 - Seleção de materiais plásticos tendo em conta apenas a temperatura de utilização típica [41].

De mencionar ainda que, em anexo, figuram os esquemas elétricos das três placas apresentadas, realizadas na ENEIDA, com recurso a ferramentas (Altium Designer) e assistência técnica da empresa. Também a listagem de materiais se encontra em anexo.

Capítulo 4

Comunicação

4.1 - Rede de Comunicação

A escolha dos protocolos de comunicação sem fios é uma decisão crítica, visto que representa um dos elementos que se esperava inicialmente mais contribuir para o consumo global do dispositivo, podendo também limitar a integração em redes de sensores já existentes ou a futura integração de outros. Os diversos protocolos de comunicação sem fios podem ser agrupados consoante o seu alcance, como mostra a figura 4.1.

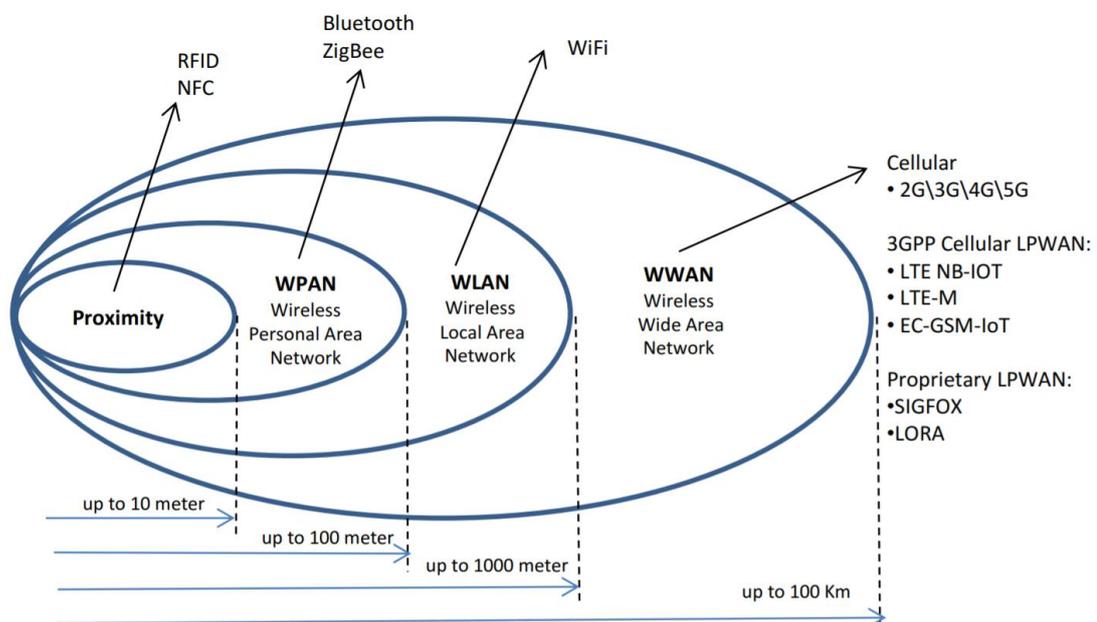


Figura 4.1 - Classificação dos principais protocolos de comunicação sem fios, consoante o alcance, em redes de área pessoal (WPAN), redes de área local (WLAN) e redes de área ampla (WWAN) [42].

O setor das Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (UIT-R) tem como função assegurar uma utilização racional, igualitária, eficiente e económica do espectro de radiofrequências por todos os serviços de radiocomunicações. Com este intuito, reservou várias gamas de frequências para usos não carecendo de licenciamento em aplicações

industriais, científicas e médicas (*Industrial, Scientific and Medical, ISM*). Existem apenas duas gamas de frequências disponíveis em todo o planeta, a dos 2,4 e a dos 5 GHz. Conforme mostra a figura 4.2, as frequências sub-GHz permitidas variam consoante as regiões.

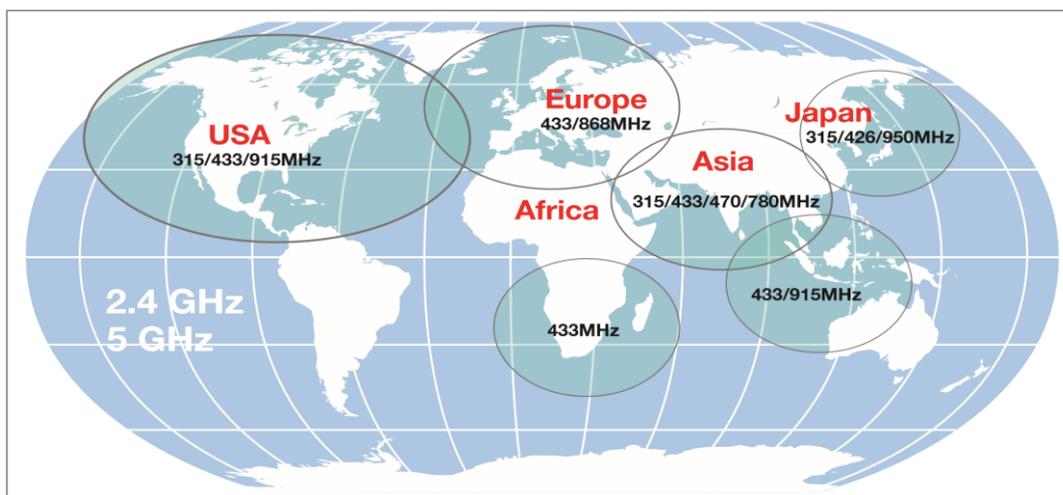


Figura 4.2 - Bandas de frequências não licenciadas a nível mundial [43].

Para além destas, estão disponíveis outras bandas de frequência mediante a aquisição de licença ou pela utilização de redes de operadoras de comunicações. Ambas estas opções têm custos operacionais associados.

A escolha de protocolos de comunicação está sujeita a diversos fatores sintetizados na figura 4.3, que devem ser considerados e balanceados de modo a fazer cumprir da melhor forma os requisitos de cada projeto.

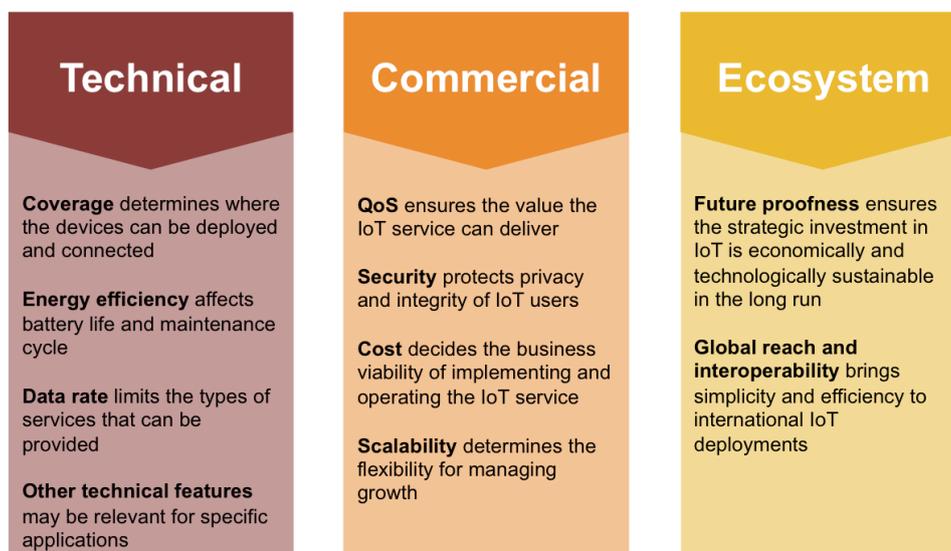


Figura 4.3 - Considerações a analisar na seleção do protocolo mais adequado a cada aplicação [44].

4.2 - Comunicação Interna

A escolha do protocolo de comunicação para este projeto deve recair numa das redes não licenciadas disponibilizadas mundialmente, de forma a que o sistema desenvolvido se adapte ao mercado global, de acordo com os requisitos. Dado que a tecnologia está mais desenvolvida para os 2,4GHz e que a taxa de transmissão de informação necessária é baixa, a escolha recaiu sobre esta gama.

As principais alternativas nesta banda de frequências que permitem consumos energéticos reduzidos encontram-se assim no grupo das redes de área pessoal sem fios (*Wireless Personal Area Networks*, WPAN), sendo descritas no subcapítulo 4.2.1 (e apresentada na tabela 4.1 a comparação de algumas destas). No subcapítulo 4.2.2, é ainda apresentada uma comparação entre alguns módulos de comunicação no mercado que recorrem a estas tecnologias, sendo apresentado o teste de uso do selecionado no subcapítulo seguinte. Importa salientar que, à exceção do Bluetooth *low energy*, todas as restantes opções partilham o *standard* de camada física IEEE 802.15.4.

4.2.1 - Protocolos WPAN

4.2.1.1 - Bluetooth Low Energy

O Bluetooth [45], originado em 1998, ganhou inicialmente notoriedade no domínio dos telemóveis. Teve já um standard IEEE que regulava a sua camada de ligação, o IEEE 802.15.1, que foi descontinuado, sendo atualmente controlado pelo Bluetooth SIG. Em 2010, na versão do Bluetooth 4.0, foi introduzido o Bluetooth *Smart*, com o intuito de se intrometer no mercado da IoT. Para tal, conseguiu uma redução de consumo energético pela utilização de uma menor taxa de transferência de dados.

O protocolo de Bluetooth Smart define os seus perfis de utilização com base em duas camadas: o perfil de acesso genérico (*Generic Access Profile*, GAP) e o perfil genérico de atributo (*Generic Attribute Profile*, GATT). O GAP define as topologias de ligação e os papéis dos dispositivos em cada rede. Assim, na topologia *broadcasting*, não existe uma conexão entre dispositivos, sendo que os *broadcasters* divulgam publicamente os dados e os observadores captam essa informação. Na topologia de conexão é necessário o emparelhamento dos dispositivos envolvidos, centrais e periféricos. Os periféricos iniciam com uma divulgação da sua disponibilidade, o que permite ao central iniciar a conexão. Posteriormente, o periférico apenas troca informação com o central ao qual está conectado, podendo este último estar ligado a vários periféricos. O GATT define os papéis de servidor e cliente, sendo que o servidor responde a pedidos de leitura ou de alteração de informação feitos pelo cliente. No caso de conexão, tanto periféricos como centrais podem assumir qualquer um dos papéis.

Em 2013 foi lançado o Bluetooth 4.1, no qual o Bluetooth Smart foi renomeado de Bluetooth *low energy*, BLE. O BLE conseguiu melhorar ainda mais os consumos energéticos pela

flexibilização dos intervalos de tempo entre reconexões, o que permitiu o aumento do tempo em modo de poupança de energia. Os dispositivos passaram a poder comunicar simultaneamente como concentrador e nó, possibilitando a comunicação independente entre elementos. Esta versão trouxe ainda melhorias pela eliminação da interferência com o protocolo 4G (LTE), que era responsável pela redução da performance de ambas estas tecnologias e pelo correspondente aumento do consumo de energia.

Em 2014, o Bluetooth 4.2 alcançou melhorias nos domínios da performance, do alcance, da segurança e de portabilidade para a internet. O aumento da taxa da transmissão para 800Kbps teve como principal impulsionador o aumento do tamanho dos pacotes trocados de 27 para 251 bytes. Em termos de segurança, a par da encriptação AES-CCM (que impede que intrusos escutem as chaves de desencriptação trocadas no processo de emparelhamento), foi adicionado um sistema de encriptação EEC para gestão de chaves públicas e privadas dos dispositivos envolvidos (de modo a que não existam acessos indevidos à informação em trânsito). Foram ainda criados perfis que permitem implementar IPv6 em nós e *gateways* BLE, de modo a facilitar a integração na internet.

Em finais de 2016, o Bluetooth 5 foi introduzido, conseguindo octuplicar a largura de banda, quadruplicar o alcance e duplicar a taxa de transmissão (2 Mbps). Importa salientar que o Bluetooth 5 é compatível com as versões anteriores. Já em 2017, o Bluetooth SIG lançou perfis para implementar a topologia *mesh* para as versões Bluetooth 5 e Bluetooth 4.x.

Pela introdução desta tecnologia em computadores e telemóveis, esta proliferou-se desde cedo em dispositivos médicos e de desporto, constituindo este os seus mercados mais tradicionais. No entanto, as evoluções que sofreu catapultaram-na para uma das tecnologias mais representativa na IoT, em domínios como o industrial ou o da domótica.

4.2.1.2 - ZigBee

Com o intuito de desenvolver uma solução de comunicação sem fios, de baixo consumo energético e que garantisse interoperabilidade entre diferentes fabricantes, em 2002, um grupo de 25 empresas denominado ZigBee Alliance juntou-se para criar o ZigBee [46] (o *standard* foi desde então sempre mantido pela ZigBee Alliance).

Desde o início houve o intuito de promover a topologia *mesh*, de forma a potenciar a dispersão geográfica das redes e a acrescentar fiabilidade, pela redefinição do caminho de transmissão em caso de falhas. Esta topologia *mesh* foi, no entanto, subdividida em duas: a topologia de *mesh* completa e a topologia de *mesh* parcial. Enquanto que na completa todos os elementos de rede comunicam entre si, na parcial existem elementos conectados apenas a alguns outros.

O protocolo ZigBee define três tipos de nós: os coordenadores, os routers e os dispositivos finais. Existe apenas um coordenador por rede, sendo as suas funções a de ligação a uma outra rede (*gateway*) e a de armazenamento de informação sobre a rede, como por exemplo das chaves de segurança. Os routers são os nós intermediários que transmitem dados de outros nós. Por fim, os dispositivos finais são geralmente de baixo consumo energético, tendo como função transmitir dados quer para o coordenador, quer para os routers (não podendo fazer a transmissão de dados de outros nós).

No contexto do projeto em desenvolvimento, importa ainda referir três camadas de rede disponibilizadas pelo protocolo ZigBee: ZigBee PRO, ZigBee RF4CE and ZigBee IP.

O ZigBee PRO é a solução mais adequada ao contexto da IoT, visto que garante um baixo custo, fiabilidade de rede para comunicações entre dispositivos e baixo consumo energético (potenciado pelo modo *Green Power*). Na camada de aplicação, o ZigBee Pro encontra-se ainda dividido em sete grupos: automação de edifícios, saúde, iluminação, comércio, domótica, contadores inteligentes e serviços de telecomunicações.

O ZigBee RF4CE foi desenvolvido para a comunicação ponto a ponto bidirecional, sendo adequado a aplicações que não necessitem das funcionalidades da topologia de rede *mesh*. É particularmente útil em certos casos, como sejam a comunicação entre comandos e televisores ou *set-top boxes*.

O ZigBee IP introduz o *standard IPv6* de modo a facilitar a ligação à internet de dispositivos ZigBee, garantindo o baixo custo e o baixo consumo energético. Acrescenta assim as facilidades dos protocolos IP, que podem ser de extrema importância em redes de sensores/atuadores.

Com uma vasta área de abrangência, o ZigBee foi particularmente importante no âmbito de aplicações industriais. No entanto, após uma procura de módulos mais recentes, verifica-se um desinvestimento nesta tecnologia. De facto, parece que o BLE ganhou a corrida, fruto das suas evoluções recentes, do seu consumo energético (consegue ser já mais comedido que o ZigBee [47]) e da vantagem de facilidade de conexão aos telemóveis e computadores. Esta ideia é corroborada pelas últimas novidades apresentadas pela ZigBee Alliance: a rede WNAN JupiterMesh e o dotdot, que constitui uma camada de aplicação que assenta no topo de Thread.

4.2.1.3 - 6LoWPAN

O 6LoWPAN [48], cujo nome é um acrónimo de '*IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks*', é um *standard* criado em 2011 com o intuito de facilitar a ligação de pequenos dispositivos de baixo consumo à internet.

O 6LoWPAN é definido no *standard RFC* como “uma camada eficiente entre a camada de ligação IEEE 802.15.4 e a *stack TCP/IP*”. Como a camada de ligação dispõe de muitos graus de liberdade, diferentes fabricantes implementaram as suas próprias versões, reduzindo a

interoperabilidade entre diferentes dispositivos. Por consequência, a utilização desta tecnologia abrandou.

As redes 6LoWPAN necessitam também de uma *gateway* para permitir a ligação à internet, cabendo a esta também a conversão de IPv6 para IPv4. Esta conversão é necessária visto que o IPv4 é ainda o protocolo de IP que rege a internet atual.

O 6LoWPAN oferece assim uma combinação dos benefícios dos protocolos IP com os benefícios das redes WPAN. Implementações de 6LoWPAN de relevo são: o sistema operativo Contiki, o *standard* ISA100.11a e o *standard* Thread.

4.2.1.4 - Thread

Em 2014, a Google Inc's Nest Labs anunciou o "Thread Group", constituído por empresas como a Samsung, a ARM Holdings, a Freescale e a Silicon Labs. O seu intuito era tornar mais eficiente e segura a comunicação entre dispositivos de baixo consumo, bem como facilitar a sua conexão à internet. Assim, foi criado o *standard* Thread [49]. Inicialmente o *standard* cobriu dispositivos no domínio das casas inteligentes, tendo já sido anunciada uma extensão para edifícios comerciais e perspetivando-se uma outra para aplicações industriais.

O *standard* define quatro tipos de dispositivos: as *gateways* (*edge routers*), os routers, os dispositivos finais elegíveis a routers e os dispositivos finais de baixo consumo. É permitida a existência de várias *gateways*, cabendo a uma delas o papel de líder da rede. Em caso de indisponibilidade da *gateway* líder, esse papel será passado preferencialmente a outra *gateway* ou, em caso de não existir outra, a um router.

Para estabelecer a ligação, o Thread dispõe de um processo simples e seguro de comissionamento que se pode processar por três modos: o modo de pré configuração, o modo de descoberta e o modo de requerimento. O primeiro envolve a configuração do novo dispositivo com os parâmetros da rede. O segundo baseia-se na procura de uma rede, cujas credenciais correspondam a parâmetros inicialmente definidos. O terceiro recorre a uma aplicação de telemóvel que permite a comunicação com uma *gateway* no sentido de autorizar a entrada do dispositivo.

O OpenThread é uma implementação open-source do protocolo de comunicação Thread, desenvolvido e disponibilizado pela Nest.

Esta tecnologia tem vindo a ganhar uma importante quota de mercado, fruto da segurança que permite, da fiabilidade e do facto de estar alicerçada em empresas como a Google ou a Samsung. Contudo, o Thread ainda não constitui uma alternativa para as aplicações industriais, sendo aguardada uma extensão para este domínio. Assim, é expectável que se venha a intrometer e a disputar com o BLE o papel de dominante em aplicações industriais, que já coube ao Zigbee.

Tabela 4.1 - Comparação dos principais protocolos de comunicação WPAN de baixo consumo energético [43].

	Data throughput	Range	Power consumption	Topology	IP at the device node	PC, mobile OS support
BLE/ Bluetooth 5	Up to 2Mbps	Up to 750m	Up to years on a coin-cell battery	Point-to-point/Mesh	No	Yes
Thread	Up to 250kbps	100m via mesh	Up to years on a coin-cell battery	Mesh & Star	Yes	No
Zigbee	Up to 250kbps	130m LOS	Years on a coin-cell battery	Mesh & Star	No	No

4.2.2 - Módulos de Comunicação no Mercado

Tendo em conta a contextualização feita sobre os protocolos de comunicação sem fios, na gama de 2,4GHz da banda de frequências ISM, o BLE é a tecnologia escolhida. Apesar de a versão de BLE mais recente ser a 5, existe ainda uma predominância no mercado de dispositivos BLE 4.2. Como a nova versão é compatível com as anteriores, o BLE 4.2 continua a ser uma opção válida.

Para a procura de módulos, privilegiaram-se módulos com antena incluída. Estes módulos foram já submetidos a testes e usam um *layout* de antena otimizado, eliminando assim a necessidade de desenhos de placas dispendiosos e de testes de RF morosos na linha de produção, recorrendo a equipamentos caros. Têm geralmente também já as certificações necessárias para poderem ser comercializados em diferentes países, tais como a da FCC (EUA), a da IC (Canadá), a da ETSI (UE) e a da ARIB (Japão). Esta opção permite assim a redução de custos, quer de desenvolvimento, quer de produção do produto final.

O módulo energeticamente mais eficiente encontrado é da Panasonic, o PAN1760A [50], com picos de corrente de apenas 3,3 mA para receber e emitir a 0dBm. Este utiliza um chip da Toshiba TC35678 que implementa o protocolo BLE 4.2.

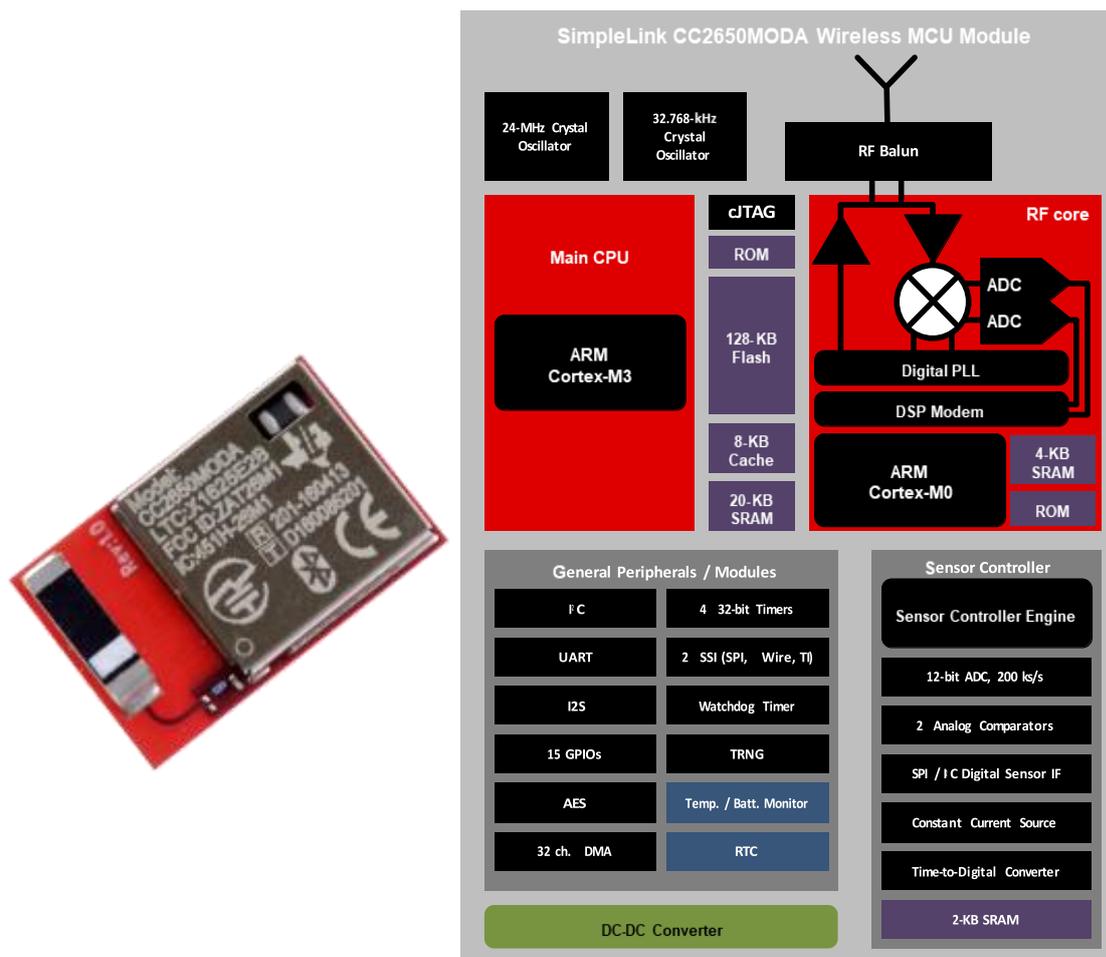
O módulo multiprotocolo BMD-340 [51] da Rigado usa um chip nRF52840 da Nordic, suportando BLE 5 e Thread. Apresenta picos de corrente de 5,4 mA para receber e 5,3 mA para emitir a 0dBm (1Mbps).

O módulo CC2650MODA [52] da Texas Instruments (TI) é também multiprotocolo, permitindo conexões por BLE 4.2, ZigBee e 6LoWPAN. Os picos de corrente são de 6,2 mA para receber e 6,8 mA para emitir a 0dBm. Utiliza um chip CC2650 também da TI.

A escolha recaiu no CC2650MODA por cinco motivos:

- dispõe de vários protocolos recorrentes em aplicações industriais;
- a utilização de um CPU dedicado à comunicação e de um MCU para o controlo de sensores, para além do CPU principal, permite alcançar um baixo consumo;
- o MCU, provido de um ADC, permite o uso simplificado de sensores analógicos;
- após cálculos, o consumo relativo à comunicação acabou por não ser significativo (contrariamente ao inicialmente pensado);
- razões comerciais, dada a maior facilidade em adquiri-lo.

A figura 4.4 mostra o módulo CC2650MODA e o seu diagrama de blocos funcionais. O CPU principal é um ARM Cortex-M3 de 32 bits e o CPU dedicado à comunicação é um ARM Cortex-M0. O controlador de sensores é um MCU de 16 bits, que permite adquirir dados de sensores digitais ou analógicos enquanto o resto do sistema está em modo adormecido.



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

Figura 4.4 - À esquerda encontra-se uma foto do módulo CC2650MODA [53] e à direita o seu diagrama de blocos funcionais [52].

4.2.3 - Kit de Desenvolvimento LAUNCHXL-CC2650

Para o desenvolvimento inicial do sistema, foi utilizado o kit de desenvolvimento LAUNCHXL-CC2650 [54] e uma placa de circuito impresso com três sensores de temperatura ADT7301 [55].

Foram utilizados os ambientes de desenvolvimento disponibilizados gratuitamente pela Texas Instruments, o Code Composer Studio [56] e o Sensor Controller Studio [57], respetivamente para a programação do processador principal e do microcontrolador presentes no LAUNCHXL-CC2650. Com recurso à aplicação para iOS SimpleLink Starter [58], verificou-se que o valor de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI) a 6 metros (dentro de uma sala) era de -70 dBm (para uma potência de emissão de 0 dBm) e que a ligação é quebrada próximo dos -100 dBm. Fotos da montagem de teste encontram-se na figura 4.5.

Para receber os dados foi criada uma aplicação em C#, sob a UWP [59] (*Universal Windows Platform*, UWP), que pretende uniformizar o desenvolvimento de software para os vários dispositivos com sistema operativo Windows 10.

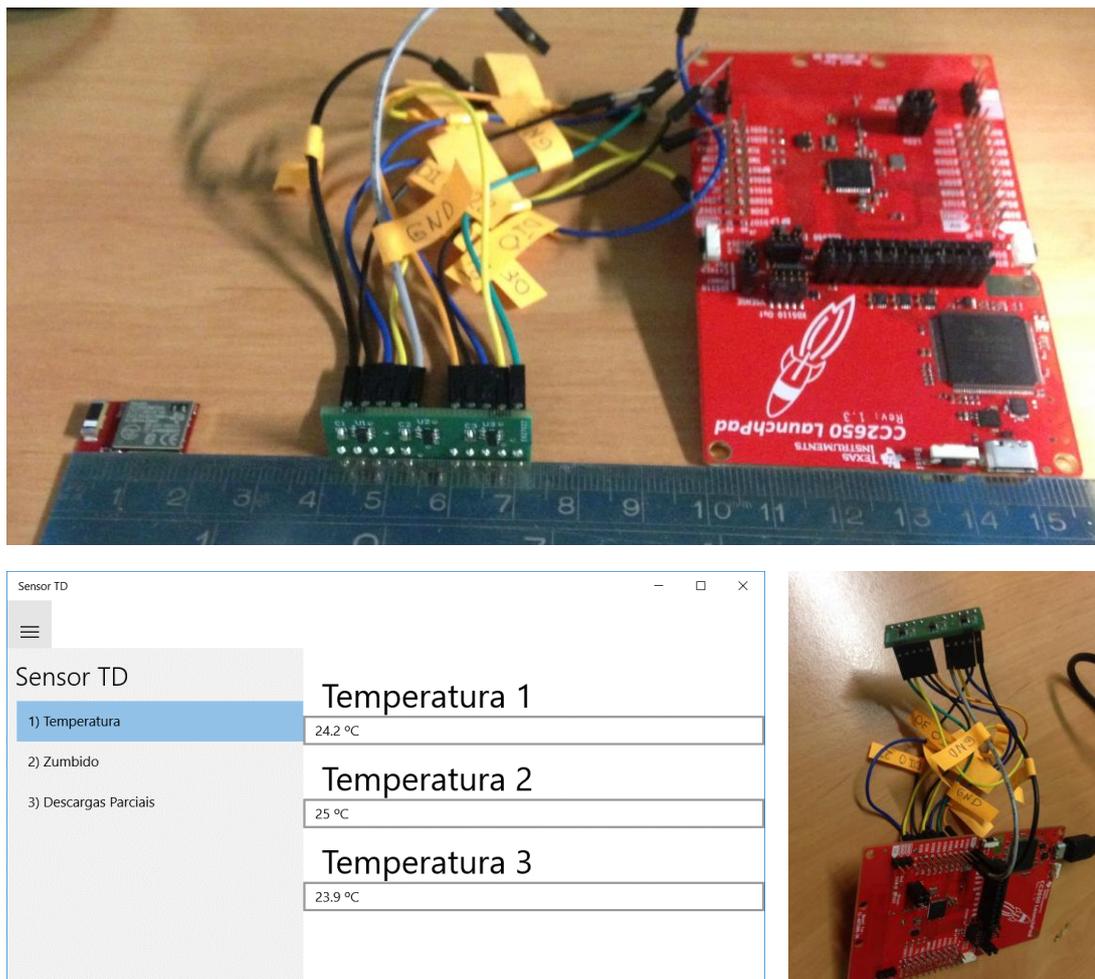


Figura 4.5 - No topo é visível uma foto aos componentes referidos nesta subsecção e ao CC2650MODA, dispostos sobre uma régua graduada em centímetros. Na parte inferior, à esquerda, encontra-se uma imagem da aplicação desenvolvida e, à direita, uma foto à montagem da placa de circuito impresso com os sensores ADT7301 ao LAUNCHXL-CC2650.

4.3 - Comunicação Externa

Não faz parte do presente trabalho o desenvolvimento de uma *gateway*. Para efeitos de primeiros testes com vista à recolha de dados, será utilizado um computador. Para a recolha de dados de tensão e corrente de entrada/saída do PT será utilizado o dispositivo EWS-DTVI-g [60] desenvolvido pela Eneida. De notar que a primeira versão comunicou por intermédio dos protocolos de comunicação Bluetooth 3.0 e GSM/GPRS, tendo as versões mais recentes já o BLE 4.2 e perspetivando-se a introdução de uma tecnologia mais recente de comunicação para o exterior. São assim referidas, no subcapítulo 4.3.1, as principais tecnologias de comunicação sem fios a considerar para a atualização desse elemento.

Neste contexto, a rede de longo alcance terá como funções o envio da informação recolhida para o servidor de base de dados e o alerta imediato da base de controlo em caso de deteção de problema. O desenvolvimento de uma nova versão do EWS-DTVI-g permitirá unir a função de *gateway* à de sensorização, que já possui. Esta nova versão do EWS-DTVI-g deve ainda possuir uma ligação Ethernet, para permitir a ligação em PT para os quais esta possa constituir um requisito (inclusive para a conexão a sistemas SCADA já existentes).



Figura 4.6 - O dispositivo em desenvolvimento estará conectado a uma *gateway* que poderá vir a ser um EWS-DTVI-g [60] revisto. Este, por sua vez, comunicará a informação recolhida a um servidor de base de dados e alertará direta e imediatamente a base de controlo, em caso de deteção de problema. A base de controlo terá ainda acesso aos dados por intermédio da base de dados.

4.3.2 - Protocolos LPWAN

Tendo em consideração o elevado número de *gateways* que se perspetiva para cada operador de distribuição que adquira o produto, bem como a sua distribuição geográfica, importa analisar as redes sem fios de área ampla de baixo consumo energético (*Low Power Wide Area Network*, LPWAN). Estas constituem a melhor solução para garantir um longo alcance aliado a uma elevada eficiência energética.

É relevante fazer neste momento uma referência à possibilidade de uma rede proprietária em alternativa a uma rede de operador. Apesar da aparente ilusão de maior segurança da solução proprietária, os custos necessários para implementar e manter uma rede deste tipo

(tanto a nível operacional como em termos de segurança) serão sempre superiores a uma rede de operador, podendo tornar-se mesmo incontroláveis.

De acordo com Mekki, et al. [61], as três LPWAN atualmente mais desenvolvidas são o LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT, que são descritas nos seguintes subcapítulos, sendo apresentada uma comparação das mesmas na tabela 4.2 e na figura 4.7. Este é um mercado recente e ainda muito volátil, sendo difícil prever qual terá mais sucesso no futuro. No entanto, por assentar em infraestruturas já existentes e reconhecidas, bem como a melhor qualidade de serviço, a alternativa atualmente mais promissora é a NB-IoT.

4.3.2.1 - NB-IoT

Já inserido no contexto do 5G, a NB-IoT [62] pretende alargar o leque de possíveis utilizações de redes licenciadas no âmbito da IoT. A redução da complexidade dos *standards* LTE usados permitiu a utilização de uma banda estreita de frequências por parte da NB-IoT e, consequentemente, a diminuição dos consumos energéticos e dos custos. Desenvolvida para funcionar através de infraestruturas LTE amplamente difundidas (com uma atualização de software), é já utilizada no contexto das *utilities*, quer por redes próprias [63], quer por redes de operadoras [64]. A utilização de uma banda de frequências licenciada garante uma maior qualidade de serviço, visto que reduz a possibilidade de interferências e permite uma taxa de transferências mais elevada (sem as restrições de tempo de comunicação consecutivo que se verificam nas bandas não licenciadas). A NB-IoT destaca-se também em termos de segurança, pois, para além da encriptação das mensagens trocadas, é a única que dispõe de uma proteção contra ataques *jamming*, que se traduzem na impossibilidade de acesso à camada física da rede. O consumo energético é, no entanto, menos contido e os preços dos módulos são mais elevados do que nas restantes alternativas.

4.3.2.2 - LoRaWAN

A LoRaWAN [65] é um protocolo de comunicação construído com base na camada física LoRa e gerido pela LoRa-Alliance. O modelo de negócio assenta na disponibilização de módulos e estações concentradoras por parte da Semtech, empresa que criou a LoRa. Com base nestes produtos, podem ser desenvolvidas redes privadas ou partilhadas (de que é exemplo a rede da *The Things Networks*). Em termos de segurança, promove a encriptação das mensagens trocadas. A taxa de transmissão de informação é a mais baixa das três.

4.3.2.3 - Sigfox

O Sigfox [66] é uma fusão de um protocolo com um serviço, funcionando à semelhança de um tradicional operador de rede móvel. A sua principal diferença é a utilização de uma rede assente na gama de frequências ISM sub-GHz. A comunicação bidirecional é limitada, sendo o tamanho e o número de comunicações permitidas diariamente para os nós de rede reduzidos. Apesar do alcance mais elevado, em termos de segurança revela-se inferior às outras opções,

não dispendo sequer de encriptação das mensagens trocadas. O preço dos módulos e o custo operacional é o mais baixo das três opções.

Tabela 4.2 - Tabela comparativa Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT [52].

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Licensed LTE frequency bands
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Maximum data rate	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidirectional	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Range	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high	Low
Authentication & encryption	Not supported	Yes (AES 128b)	Yes (LTE encryption)
Adaptive data rate	No	Yes	No
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices do not join a single base station	End-devices join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)	No (under specification)
Allow private network	No	Yes	No
Standardization	Sigfox company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox-based network	LoRa-Alliance	3GPP

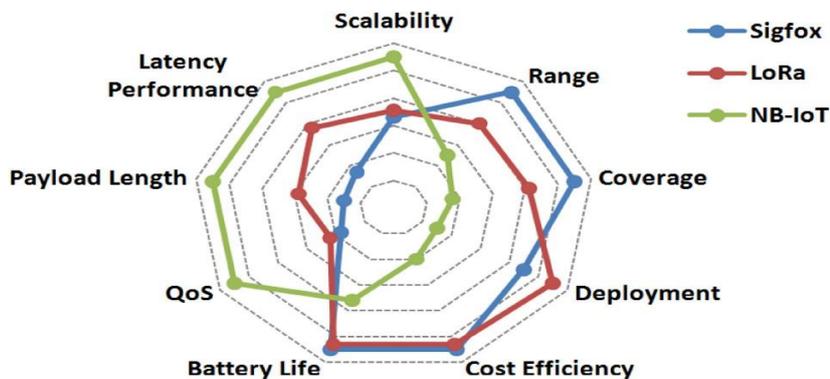


Figura 4.7 - Análise às vantagens competitivas de Sigfox, LoRa e NB-IoT [52].

Capítulo 5

Alimentação

5.1 - Modulo de Alimentação

Em termos de alimentação do dispositivo em desenvolvimento, sendo um requisito que não recorra a quaisquer cabos externos, a solução mais convencional seria a utilização de uma pilha química. Esta apresenta como grande desvantagem a necessidade de manutenção recorrente para a sua substituição, que se torna impraticável pelos custos envolvidos devido, principalmente, à dispersão geográfica e ao elevado número de dispositivos.

Assim, a captação de energia do meio envolvente (*Energy Harvesting*, EH) [67] surge como solução para evitar esses custos, em situações para as quais se prevê a existência de uma fonte fiável. Na aplicação concreta em questão, o diferencial térmico será a fonte energética mais prática, visto que os TD se encontram geralmente sem acesso a luz (no interior de PT) e que, à partida, as suas perdas mecânicas não são significativas. Outra solução poderia ser a captação de energia de ondas eletromagnéticas [68]. Para ter uma noção da dimensão do mercado dos transdutores utilizados em EH, é apontado pela IDTechEx [69] que este atingirá o valor de 7 mil milhões de dólares em 2027.

A temperatura da superfície do TD, diretamente influenciada pela temperatura do óleo no topo do TD, varia ao longo do tempo, de acordo com a carga a que está sujeito, como mostra o gráfico da figura 5.1. Assim, também o diferencial térmico vai variar ao longo do tempo, fazendo variar o débito de potência. A utilização de uma forma de armazenamento de energia permite solucionar não só este problema, mas também o da reduzida potência disponível no transdutor.

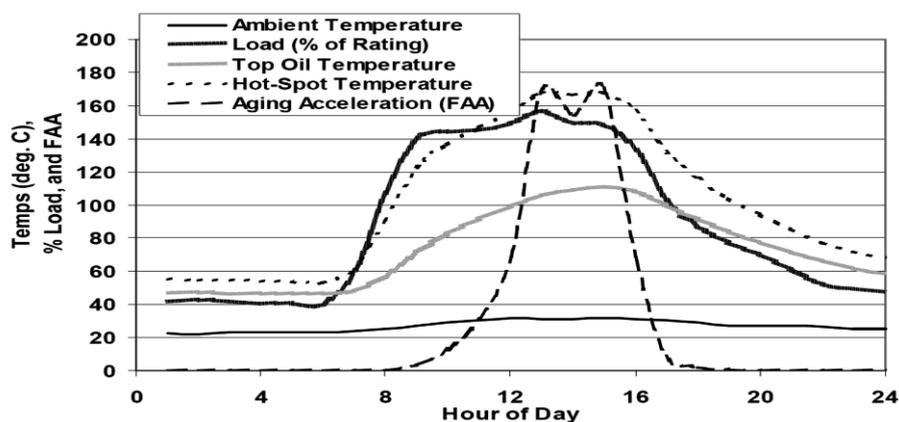


Figura 5.1 - Variação temporal de variáveis relevantes na caracterização do estado de funcionamento de um TD nos EUA, particularmente da temperatura do óleo no topo e nas proximidades dos enrolamentos. De realçar o desfasamento temporal entre as variações destas temperaturas [70].

De notar ainda que, para tempos prolongados de não funcionamento dos TD, um dispositivo que recorra à captação de energia por diferencial térmico deixará de funcionar. Este não se revela um problema, visto que, se os TD não estão a operar, a informação que seria obtida pelo dispositivo deixa de ter interesse.

Quanto ao armazenamento energético, a opção mais tradicional seria a utilização de uma bateria recarregável. No entanto, tendo em conta principalmente o elevado tempo de vida útil (proporcionado por um elevado número de ciclos carga/descarga), a rapidez dos processos de carga e a potência que disponibilizam, os supercondensadores [71] assumem-se como a melhor alternativa em sistemas de EH. Os supercondensadores permitem também maiores gamas de temperaturas de funcionamento.

Outro componente com uma função crítica para a alimentação do sistema é o circuito integrado de gestão de potência. Este é responsável por adequar a tensão da potência gerada para que esteja de acordo com o sistema a alimentar. Tem ainda de garantir que a tensão de saída é independente da carga ou da fonte. Por fim, tem de guardar eficientemente a energia captada no supercondensador (ou bateria) e que a gerir.

Nas seguintes secções, serão apresentados em mais detalhe os elementos do módulo de alimentação já mencionados: o gestor de potência, as termopilhas, o supercondensador e os dissipadores. Na secção 5.2, são expostos os cálculos para o consumo total do sistema, estando os resultados experimentais obtidos para o módulo de alimentação relatados na secção 5.3.

5.1.2 - Gestor de Potência

Uma pesquisa em sites de distribuidores de componentes eletrónicos permitiu verificar que a Linear Technology é a fabricante das principais alternativas para um gestor de potência para aplicações de EH cuja potência captada apresente uma baixa tensão: o LTC3108 [72] e o LTC3109 [73].

Nas folhas de especificações, é indicado que o LTC3108 permite o aproveitamento da energia a partir de uma tensão mais baixa (20 mV enquanto que para o LTC3109 é indicado 30 mV), sendo a principal vantagem do LTC3109 o facto de ser independente da polaridade.

No entanto, testes anteriores no LIBPhys-UC [74] permitiram verificar que o LTC3109 apresenta uma melhor performance. Assim, foi este o escolhido.

Thangaraj [75], na sua tese de doutoramento, apresenta resultados experimentais que levam também à mesma conclusão. Nesta, o autor apresenta uma tabela com os resultados obtidos de tensões de início de operação para diferentes gestores de potência, reproduzida na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores anunciados e resultados experimentais para início de operação de diferentes gestores de potência [75].

	Expected Start-Up Voltage (V)	Measured Start-Up Voltage (V)
LTC3109	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$
LTC3108	0,02	0,05
TIBQ25504	0,25	0,38
LTC3558	3,1	4,28
LTC3459	1,5	0,9
LTC3105	0,225	0,425

O LTC3109 foi desenvolvido para gerir a energia proveniente de uma fonte de baixa tensão e regular múltiplas saídas de alimentação de um sistema com baixo consumo e com picos momentâneos com necessidade de uma maior corrente. Uma aplicação típica indicada na folha de especificações [73] envolve a utilização de termopilhas, como visível na figura 5.2.

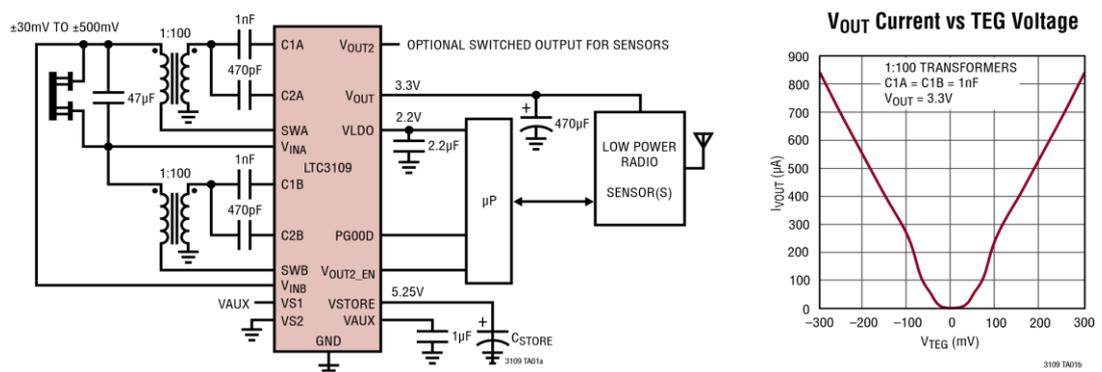


Figura 5.2 - Aplicação típica do LTC3109 [73] para captação de energia por diferencial térmico com recurso a termopilhas (TEG's).

Quanto ao transformador, optámos pelo modelo LPR6235-752SML da Coilcraft, com uma relação de transformação de 1:100 (de acordo com o aconselhado [73]).

A tensão no pino Vout e no pino Vout2 é seleccionada pela configuração das ligações de VS1 e VS2, podendo assumir os valores 2,35 V, 3,3 V, 4,1 V e 5 V.

5.1.3 - Termopilhas

No início do século XIX, os efeitos na base dos módulos termoelétricos atuais foram descobertos por Seebeck e por Peltier. Seebeck verificou que uma junção de dois materiais condutores diferentes, quando sujeita a um diferencial térmico, vai gerar potência elétrica. Posteriormente, Peltier concluiu que ao aplicar potência elétrica a uma junção de dois materiais condutores diferentes leva a que seja emitido ou absorvido calor. Apesar disso, apenas na segunda metade do século passado, com o desenvolvimento das tecnologias de semicondutores, se tornaram viáveis aplicações práticas destes efeitos.

A eficiência termoelétrica é relacionada com o coeficiente de mérito [76], Z , dado pela expressão seguinte, onde S é o coeficiente de Seebeck, σ é a condutividade elétrica e κ é a condutividade térmica.

$$Z = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} \quad (5.1)$$

Nesta expressão, o numerador da fração, $S^2 \sigma$, é intitulado fator de potência termoelétrico, P_F , geralmente usado na seleção de materiais termoelétricos. Apesar da elevada condutividade elétrica dos metais, estes apresentam um coeficiente de Seebeck duas ordens de grandeza inferior aos semicondutores [77].

Os módulos termoelétricos podem ser usados no sentido de explorar qualquer um destes efeitos, sendo mais geralmente utilizado o efeito de Peltier para o arrefecimento de componentes eletrônicos. Estes módulos têm uma importante vantagem de ausência de partes mecânicas, o que lhe confere uma robustez e uma fiabilidade apreciadas. A sua estrutura baseia-se numa “matriz” de pequenos semicondutores organizados em pares, um de dopagem positiva e outro de dopagem negativa. Tais pares encontram-se numa configuração que permite a sua conexão elétrica em série e a sua conexão térmica em paralelo, como mostra a figura 5.3. Os substratos de cerâmica são usados devido à rigidez, à resistência química, à condução térmica e ao isolamento elétrico permitidos.

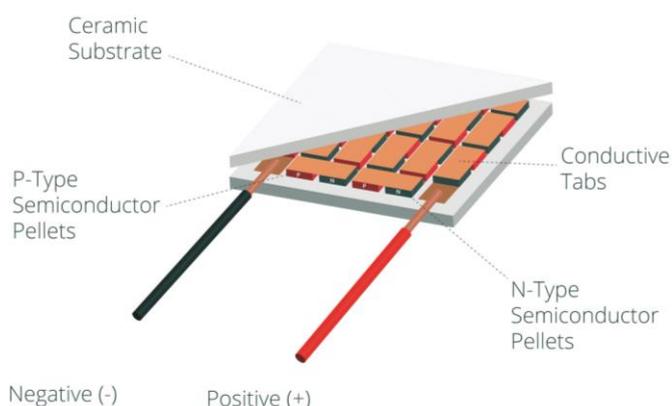


Figura 5.3 - Estrutura interna de um módulo termoelétrico [78].

Os módulos termoelétricos selecionados numa primeira fase para funcionarem como termopilhas foram o PT8.12.F2.4040.TA.W6, o UT15.200.F2.4040.TA.W6 e o CP85435. Os dois primeiras são ambos da Laird, sendo que o primeiro foi usado em projetos anteriores [74] e que o segundo é um modelo mais recente. O terceiro indicado é da CUI, tendo sido considerado por ser de uma marca também aconselhada na folha de especificações do LTC3109 e por ser um modelo recente. Mais tarde, tendo sido verificado que o modelo mais barato era o que apresentava melhores resultados, decidiu-se ainda testar os modelos de mais baixo custo da CUI, o CP60440 e o CP85438. A tabela 5.2 resume a informação obtida do fornecedor Mouser relativamente aos modelos referidos, de onde é possível obter as respetivas folhas de especificações. De notar que a informação fornecida para estes módulos por fabricantes e fornecedores é geralmente para a exploração do efeito de Peltier, visto que é este o efeito para o qual são mais utilizados.

Importa ainda salientar que, uma vez que se perspetivam baixos diferenciais térmicos, serão usadas duas termopilhas em série [79] de modo a garantir uma diferença de potencial gerada próxima dos 30mV .

Tabela 5.2 - Tabela comparativa das opções para termopilhas.

Modelo	PT8.12.F2.4 040.TA.W6 [80]	UT15.200.F2. 4040.TA.W6 [81]	CP60440 [82]	CP85438 [83]	CP85435 [84]	
Marca	Laird		CUI			
Altura	3,3 mm	3,3 mm	4,0 mm	3,8 mm	3,6 mm	
Comprimento	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	
Largura	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	
Corrente máxima	8.5 A	15.4 A	6.0 A	8.5 A	8.5 A	
Voltagem máxima	14.4 V	25 V	15.4 V	15.4 V	24.1 V	
Delta Tmax	+ 64 C	+ 68 C	+ 75 C	+ 75 C	+ 75 C	
Qmax	72 W	236.6 W	53 W	75 W	118 W	
Preço Unitário / Quantidade	1	24,78 €	68,04 €	18,70 €	18,70 €	33,44 €
	2	-	66,20 €	-	-	-
	5	23,51 €	64,41 €	17,56 €	17,56 €	31,32 €
	10	22,87 €	63,44 €	17,15 €	17,15 €	30,56 €
	25	21,92 €	60,68 €	16,51 €	16,51 €	29,59 €
	50	20,97 €	58,84 €	16,10 €	16,10 €	28,82 €
	100	19,38 €	55,17 €	15,68 €	15,68 €	28,06 €
	250	18,43 €	-	15,26 €	15,26 €	27,36 €
500	17,15 €	-	14,95 €	14,95 €	-	

5.1.4 - Supercondensador

Contrariamente a um condensador comum, um supercondensador não utiliza um meio dielétrico entre os elétrodos. Na sua vez, são usados um eletrólito e um separador isolador elétrico, para garantir que os elétrodos não entrem em contacto em nenhuma circunstância.

Uma dupla camada elétrica é formada em cada eléctrodo no processo de carga pela movimentação de iões, como exemplifica a figura 5.4. O facto de o armazenamento energético não envolver reações químicas, como acontece nas baterias [85], garante um elevado número de ciclos carga-descarga.

Os elétrodos são também revestidos com uma camada de carvão ativado que, pela sua porosidade, aumenta a área de superfície e, conseqüentemente, a energia que é possível armazenar.

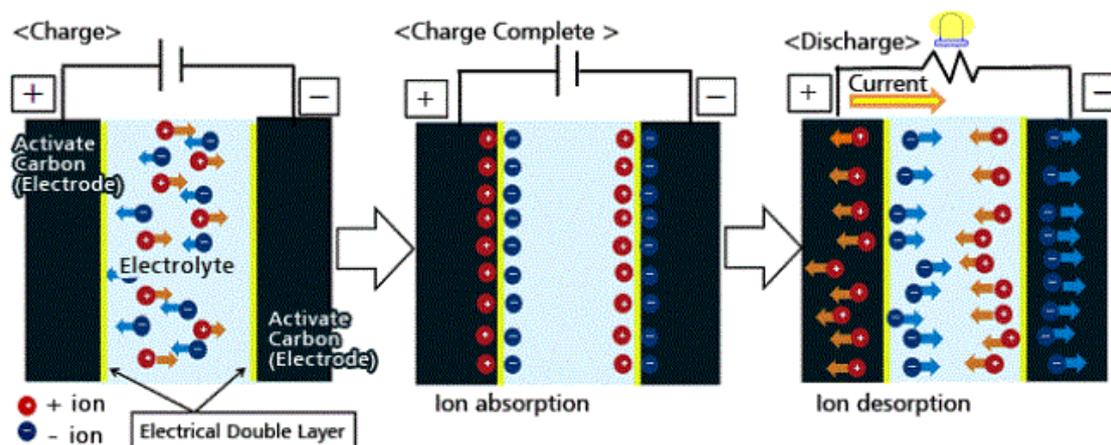


Figura 5.4 - Processo de carga e descarga de um supercondensador [86].

O uso de um supercondensador apresenta várias vantagens comparativamente a uma bateria, sendo de salientar a sua fiabilidade. Estes disponibilizam uma potência e uma corrente de descarga elevadas. O seu carregamento é rápido e simples, não estando sujeito a sobrecargas. Também a gama de temperaturas de funcionamento é em geral superior.

A seleção de um supercondensador tem de ter em atenção fatores como a sua capacidade e tempo de carga, a resistência equivalente em série (ESR), a tensão, a corrente máxima recomendada, a gama de temperaturas de funcionamento aconselhável, o custo e as dimensões.

Neste caso concreto, para a tensão, foram procuradas opções para 5,5 V, dado que o LTC3109 recomenda este valor para otimizar o armazenamento de energia. Apesar do maior custo associado, poderiam também ser usados dois supercondensadores em série de tensões de 2,7 V ou superiores.

Quanto às temperaturas, optou-se por uma temperatura máxima de funcionamento de 85°C (o mais elevado no mercado), de forma a zelar pelo longo tempo de vida deste componente.

Selecionando valores de ESR inferiores a 100 Ω , de modo a maximizar a energia armazenada útil, os supercondensadores da série FT da Kemet são os que melhor conjugam o preço e a corrente de descarga. As dimensões não são, neste caso, um fator crítico. A corrente máxima permitida, 50mA, é bastante superior ao necessário. No entanto, este valor não é descabido, servindo para garantir transitórios de corrente curtos.

Em ponderação encontram-se os modelos FT0H104ZF [87], de 0,1 F, e FT0H224ZF [88], de 0,22 F. Outras marcas e valores de capacidade mais baixos poderiam ter sido considerados. No entanto, não foram encontrados outros modelos que garantissem o cumprimento de todos os requisitos.

5.1.5 - Dissipador

No que diz respeito ao dissipador, o fornecedor com mais variedade e opções mais adequadas foi a Farnell. A escolha recaiu no modelo da Malico MBH42.5002-25P/2.6 [89] de alumínio anodizado preto, que possui uma resistência térmica de 1.9 °C/W e tem dimensões de 42,5x42,5x25 mm. Este foi o modelo de dissipador por convecção natural com menor resistência térmica encontrado para dimensões próximas das da termopilha. Alternativas mais em conta encontradas têm resistências térmicas superiores a 8 °C/W, tornando-se ineficientes no sentido em que não garantem uma redução de temperatura na face fria das termopilhas suficiente para gerar produção energética.

Outra opção seria a utilização de dissipadores arrefecidos com recurso a ventoinhas. Sendo as ventoinhas peças mecânicas, aumentariam sempre a necessidade de manutenção. Também apresentariam o inconveniente do consumo constante que iriam impor. Uma procura por este tipo de dissipadores, também para dimensões em torno dos 40x40mm, levou à conclusão de que não existem grandes alternativas. De facto, em geral a resistência térmica apresentada é inferior, à exceção do modelo CEBF0145451601-00 [90], também da Malico, com 1,3 °C/W. Este apresenta, contudo, as desvantagens do consumo desmedido devido à ventoinha (de 90 mA a 5 V) e das dimensões de 45x45x16 mm.

5.2 - Estimativa do Consumo Energético

No final deste subcapítulo são apresentados os cálculos do consumo do sistema, adotando uma perspetiva conservadora. Importa distinguir o consumo para as três funções básicas do dispositivo: a comunicação, o processamento e a sensorização. Com base nesta divisão, serão apresentados, de seguida, os pressupostos para esta estimativa.

5.2.1 - Pressupostos da Estimativa

5.2.1.1 - Comunicação

Para os dados de consumo relativos à comunicação por BLE, foi analisado o documento “*Measuring Bluetooth Low Energy Power Consumption*” [91]. Neste, é utilizado o CC2650EM-4XS, um SmartRF06 da Texas Instruments e um analisador de potência DC N6705B da Agilent. Apesar do módulo selecionado para o presente projeto diferir do referido, ambos usam chips CC2650 (o CC2650MODA usa o CC2650F128RHB e o CC2650EM-4XS usa o CC2650F128RSM).

Neste trabalho, será utilizada a topologia central/periférico, visto pretender-se a possibilidade de comunicação bidirecional com o intuito de permitir atualizações remotas do dispositivo.

Para esta topologia, a comunicação é iniciada por um evento de anúncio, seguida de eventos periódicos de conexão que permitem a troca de informação entre os dispositivos e a manutenção da conexão.

Foram consideradas conexões estabelecidas horariamente, com um evento de anúncio e oito de conexão.

Os dados da corrente consumida para a tensão de 3,0 V, apresentados no referido documento, encontram-se sintetizados nos gráficos das figuras 5.5 e 5.6, retiradas do mesmo. Com base nas tabelas referentes a estes valores, foram obtidos os consumos por evento de anúncio e por evento de conexão, respetivamente $5,20 \cdot 10^{-5}$ J e $2,59 \cdot 10^{-5}$ J. Assim, é obtido o total por hora de $2,59 \cdot 10^{-4}$ J e por dia de 6.22mJ.

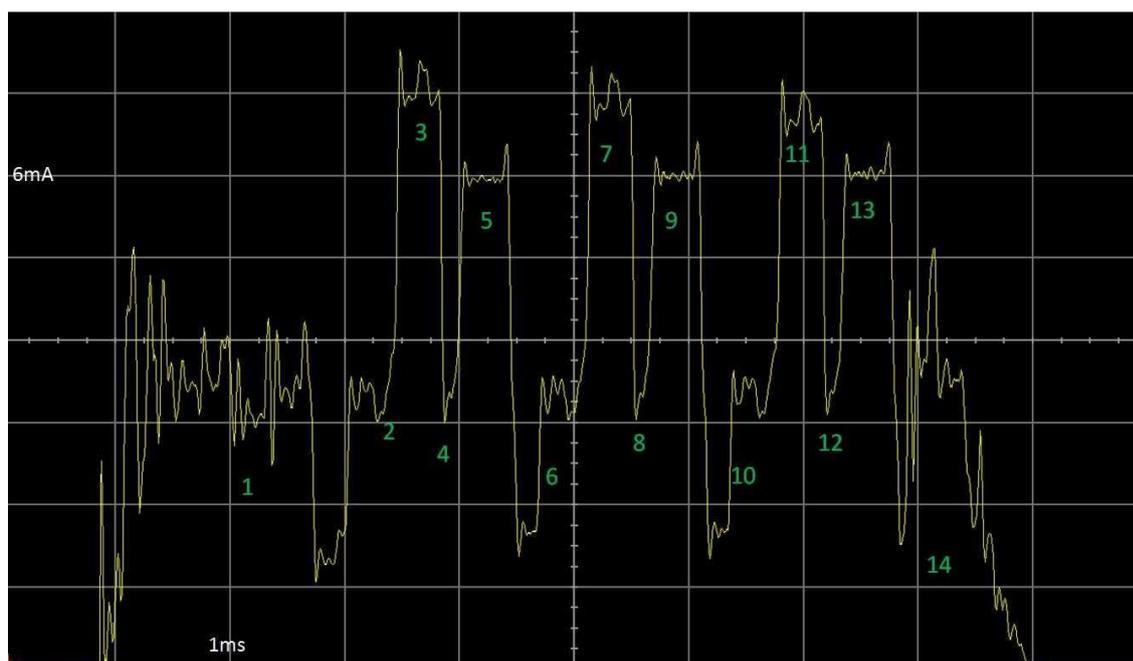


Figura 5.5 - Consumo de corrente para o evento de anúncio do CC2650EM com uma tensão de alimentação de 3,0 V [91].

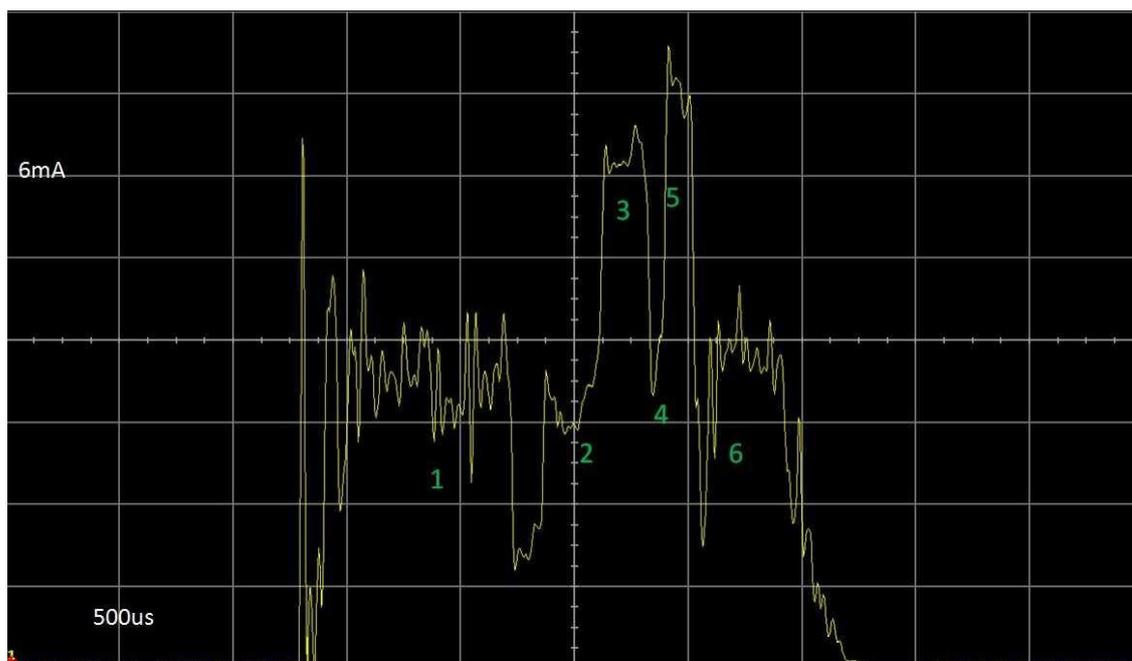


Figura 5.6 - Consumo de corrente para o evento de anúncio do CC2650EM com uma tensão de alimentação de 3,0 V [91].

5.2.1.2 - Processamento

Para os dados de consumo relativos ao processamento, foi tida em conta a informação obtida da folha de especificações do CC2650MODA [52]. Nesta consta uma tabela que compara os vários modos de funcionamento permitidos, reproduzida na tabela 5.3.

Os modos de interesse são: *active*, *IDLE* e *standby*. O modo *active* permite a utilização do processador principal para cálculos mais complexos, como a FFT ou o valor eficaz do sinal obtido do microfone na placa do topo, ou mesmo uma análise de tendências. O modo *IDLE* deve ser usado aquando da comunicação. O modo *standby* permite acordar o sistema com base nos sinais analógicos recolhidos do sensor ultrassónico ou da antena RF. De notar ainda que o modo *shutdown* não pode ser utilizado porque se pretende usar o RTC para acordar periodicamente o sistema.

O controlador de sensores é um MCU otimizado para baixo consumo e para a operação eficiente de periféricos. Assim, este pode ser responsável por tarefas simples em *background* autónoma e independentemente do CPU principal, acrescentando ao consumo 0,4 mA+8,2 μ A/MHz [52] para o processamento e 1.4 μ A para a leitura de sensores digitais por SPI a 20 leituras/segundo.

Tendo em conta que todos os consumos de corrente apresentados são também para 3,0 V, faz-se de seguida uma estimativa do tempo de utilização de cada modo de funcionamento, para permitir o cálculo do respetivo consumo.

Tabela 5.3 - Modos de funcionamento do CC2650MODA [52].

MODE	SOFTWARE-CONFIGURABLE POWER MODES				RESET PIN
	ACTIVE	IDLE	STANDBY	SHUTDOWN	HELD
CPU	Active	Off	Off	Off	Off
Flash	On	Available	Off	Off	Off
SRAM	On	On	On	Off	Off
Radio	Available	Available	Off	Off	Off
Supply System	On	On	Duty Cycled	Off	Off
Current	1,45 mA + 31 µA/MHz	550 µA	1 µA	0,15 µA	0,1 µA
Wake-up time to CPU active ⁽¹⁾	–	14 µs	151 µs	1015 µs	1015 µs
Register retention	Full	Full	Partial	No	No
SRAM retention	Full	Full	Full	No	No
High-speed clock	XOSC_HF or RCOSC_HF	XOSC_HF or RCOSC_HF	Off	Off	Off
Low-speed clock	XOSC_LF or RCOSC_LF	XOSC_LF or RCOSC_LF	XOSC_LF or RCOSC_LF	Off	Off
Peripherals	Available	Available	Off	Off	Off
Sensor Controller	Available	Available	Available	Off	Off
Wake up on RTC	Available	Available	Available	Off	Off
Wake up on pin edge	Available	Available	Available	Available	Off
Wake up on reset pin	Available	Available	Available	Available	Available
Brown Out Detector (BOD)	Active	Active	Duty Cycled ⁽²⁾	Off	N/A
Power On Reset (POR)	Active	Active	Active	Active	N/A

Quanto ao modo ativo, tendo em perspectiva a utilização para cálculos como FFT ou verdadeiros valores eficazes, foi contabilizado 0,5 segundos por dia. Dados encontrados para os processadores Cortex-M3 LPC1769 e LPC1759ARM da NXP a 120 MHz indicam que estes permitem cálculos de FFT de 256 pontos em menos de 190 µs [92]. Consta também nesta referência que este processador é 54% mais rápido do que outros Cortex-M3 de fabricantes

concorrentes. Considerando que seriam necessários cinco cálculos de FFT, ou de complexidade semelhante, por hora, e que o ARM Cortex-M3 leva o dobro do tempo necessário comparativamente aos da NXP, o tempo total obtido por dia seria de 0,05 segundos, uma ordem de grandeza abaixo do considerado (de lembrar que se está a realizar uma estimativa pessimista).

A comunicação será realizada no modo *IDLE*. Considerou-se que este modo estaria ativo 1 segundo diariamente, tendo por base o tempo diário total de utilização do BLE de 0,57 segundos, de acordo com o indicado na subsecção 5.2.1.2.

O modo *standby* estará ativo sempre que não estejam ativos os modos *active* ou *IDLE*. Ao modo *standby* irá ainda ser adicionado o consumo referente ao controlador de sensores (a 2MHz), sendo estabelecido 2,5 segundos horários. Quanto às leituras dos sensores por SPI, foram consideradas 4 leituras, a uma taxa de 20 leituras/segundo (3 sensores de temperatura e microfone), com 0,05 segundos cada, totalizando diariamente cerca de 5 segundos, tendo sido introduzidos para cálculos de consumo 10 segundos.

É ainda necessário contabilizar a utilização do ADC de 12 bits interno para a aquisição dos valores dos sensores analógicos, com um consumo associado de 0,75 mA. Apesar de a ocorrência de descargas parciais ser imprevisível e dependente de TD para TD, foi considerada a sua utilização por 2 segundos diariamente, sendo provável, no entanto, que na maioria dos casos este tempo seja consideravelmente superior ao real.

5.2.1.3 - Sensores

Quanto aos sensores de temperatura, ADT7311 [93], cada um consome 0,21 mA a 3,3 V, sendo previsto que esteja ativo 0,05 segundos por hora (tempo da leitura SPI). O microfone SPH0641LU4H-1 [94] usado no modo standard a 2,4MHz é contabilizado também a 0,05 segundos por hora com um consumo de 0,7mA a 1,8V. Os restantes sensores (antena de captação RF e sensor ultrassons), sendo analógicos, não terão consumo associado.

5.2.2 - Consumo Total Diário

O consumo total diário por função encontra-se, assim, calculado nas seguintes tabelas (5.4, 5.5 e 5.6). De notar que o consumo total tem o valor de cerca de 0.36J e que este se encontra repartido da seguinte forma: 97,0 % para processamento, 1,7% para comunicação e 1,3% para sensores. Além disso, o modo de funcionamento de *standby* do CC2650MODA é responsável por 72% do consumo total diário do dispositivo.

Relativamente às opções para o supercondensador, tendo sido verificado experimentalmente que estes são carregados até 5,2 V, o consumo diário corresponde a 12% da energia armazenada no de 0,22 F (2,97 J) e a 26% da energia armazenada no de 0,1 F (1,35 J). Esta folga energética permite, por exemplo, variar o intervalo de tempo entre as funções

delineadas ou aproveitar os recursos de cálculo para auxílio da *gateway* (ainda que conceptualmente seja algo contraditório).

Tabela 5.4 - Consumo devido ao uso do BLE [52].

Bluetooth		
	Tempo [μs]	Energia [J]
Evento de anúncio	4078	0,000052
Evento de conexão	2440	0,000026
Total/Hour = (1*E. Anúncio+8*E. Conexão)	23598	0,000259
TOTAL/DIA = 24* (1*E. Anúncio+8*E. Conexão)	566352	0,006218

Tabela 5.5 - Consumo devido ao processamento [52].

Processadores				
	Voltagem [V]	Corrente [mA]	Tempo [s]/Dia	Energia [J]
<i>standby</i>	3,0	0,001	86398,5	0,259196
<i>idle</i>	3,0	0,55	1	0,001650
<i>active</i> (48MHz) = 1,45mA+31uA/MHz	3,0	2,938	0,5	0,004407
<i>sensor controller</i> (2MHz) = 0,4mA+8,2uA/MHz	3,0	0,4164	60	0,074952
SPI (20 leituras/segundo)	3,0	0,0014	10	0,000042
ADC 12 bits	3,0	0,75	3	0,006750
TOTAL/DIA				0,346997

Tabela 5.6 - Consumo dos sensores [93, 94].

Sensores				
	Voltagem [V]	Corrente [mA]	Tempo [s]/Dia	Energia [J]
ADT7311	3,3	0,21	1,2	0,000832
SPH0641LU4H-1 (<i>standard mode</i> , 2,4MHz)	1,8	0,7	1	0,002100
TOTAL/DIA = SPH0641LU4H-1 + 3*ADT7311				0,004595

5.3 - Montagem Experimental e Resultados

Para os testes foram usados o sistema de aquisição de dados NI USB-6210 e a placa de testes anteriormente desenvolvida, cujo circuito impresso é semelhante ao apresentado na figura 5.2.

É ainda usado um aquecedor a óleo da marca UFESA, para simular termicamente o TD. A sala usada, com dimensões próximas das de um PT típico e com uma ventilação reduzida, constituiu também uma maior aproximação às condições reais. Os sensores de temperatura usados nos testes são dois EK-H5 da Sensirion.

A temperatura da superfície superior do transformador está diretamente relacionada com a temperatura do óleo no topo do TD. Num estudo francês [95], cálculos da temperatura do óleo no topo do TD recorrendo ao standard IEC 60076-7 e ao algoritmo Levenberg Marquardt resultaram, respetivamente, nos valores de 55 °C e 56,82 °C. Um teste real permitiu concluir que o segundo método apresenta os resultados mais próximos da realidade. Na figura 5.7 é, assim, apresentada a variação temporal da temperatura em análise, bem como do fator de carga a que o TD estava sujeito.

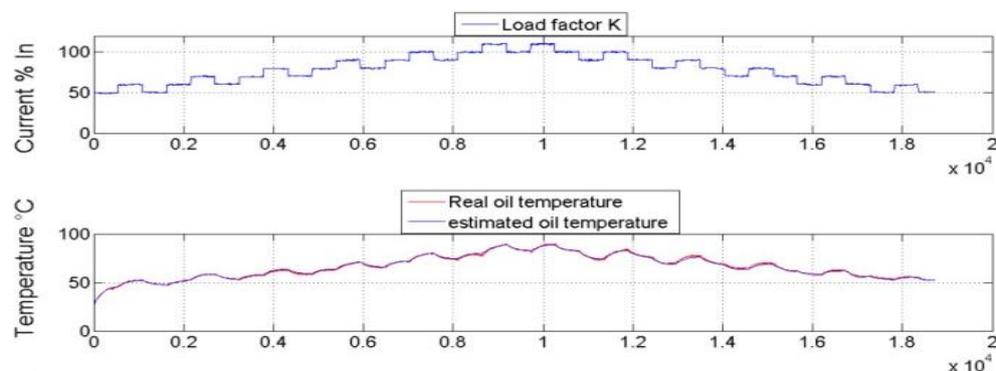


Figura 5.7 - Variação temporal da temperatura do óleo do topo de um TD (medida com o sensor PT100 de um DGPT2) tendo em conta a variação da carga do mesmo [95]. Escala do tempo em minutos.

Importa ainda analisar a temperatura média no interior de um PT, sendo certo que a temperatura real num ponto no seu interior vai ser influenciada pela proximidade das fontes de calor e dos canais de ventilação. Dados obtidos em PT da EDP são apresentados na figura 5.8 [96].

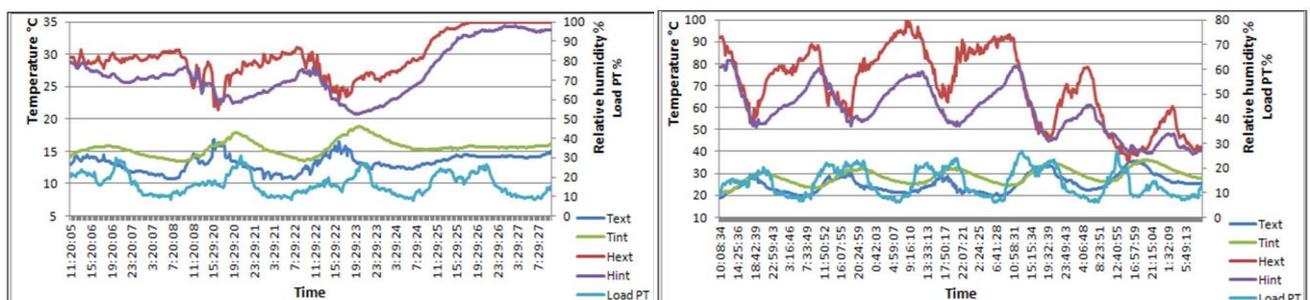


Figura 5.8 - Variação da carga, da temperatura (no interior e exterior de um PT) e da humidade (no interior e exterior de um PT), no inverno e no verão, respectivamente à esquerda e à direita [96].

Nos primeiros testes foi usado um supercondensador da gama FT da KEMET, já referida, com 1F@5,5V. As termopilhas foram acopladas ao U de alumínio com crocodilos. Por sua vez, o U (5x5x5cm) encontrava-se assente num dissipador de maiores dimensões invertido para

permitir uma superfície plana. Para os dissipadores, foram usados dois modelos de baixo custo e com resistências térmicas na ordem dos 10 °C/W: o MPC404025T [97] e o CCI11 [98]. Os resultados foram decepcionantes, ao ponto de num teste de 100 horas, com a temperatura da base de aproximadamente 50 °C, a tensão do supercondensador alcançar apenas os 1,2 V.

Ficou claro que se tinha de garantir um melhor diferencial térmico nas faces das termopilhas, tendo sido a primeira medida a seleção de um dissipador de menor resistência térmica, o referido MBH42.5002-25P/2.6 (1.9 °C/W). Nesta altura, introduziu-se ainda uma película de cortiça nas faces interiores do U, também com o intuito de vir a ser usada para proteção dos componentes eletrónicos. Nos testes seguintes, foi já usada uma proteção externa impressa em 3D. As faces das termopilhas passaram a usar a massa térmica DTA 025 da PHASAK [99], para permitir um contacto térmico mais eficiente com o U de alumínio e os dissipadores. Também a capacidade do supercondensador foi reduzida para 220 mF, tendo sido usado nos testes um da gama mais antiga da KEMET, o FS0H224ZF [100], com uma temperatura máxima de funcionamento recomendada de 70 °C e com uma ESR de 25 Ω (enquanto que, para a gama FT, estes valores são de 85 °C e de 10 Ω).

Os testes realizados tiveram como intuito a seleção das termopilhas referidas e da arquitetura do sistema. A montagem e as duas arquiteturas testadas podem ser vistas na figura 5.9. Optou-se por realizar os testes com a superfície quente a temperaturas inferiores ao esperado, reduzindo assim o diferencial térmico disponibilizado para assumir um pior cenário.

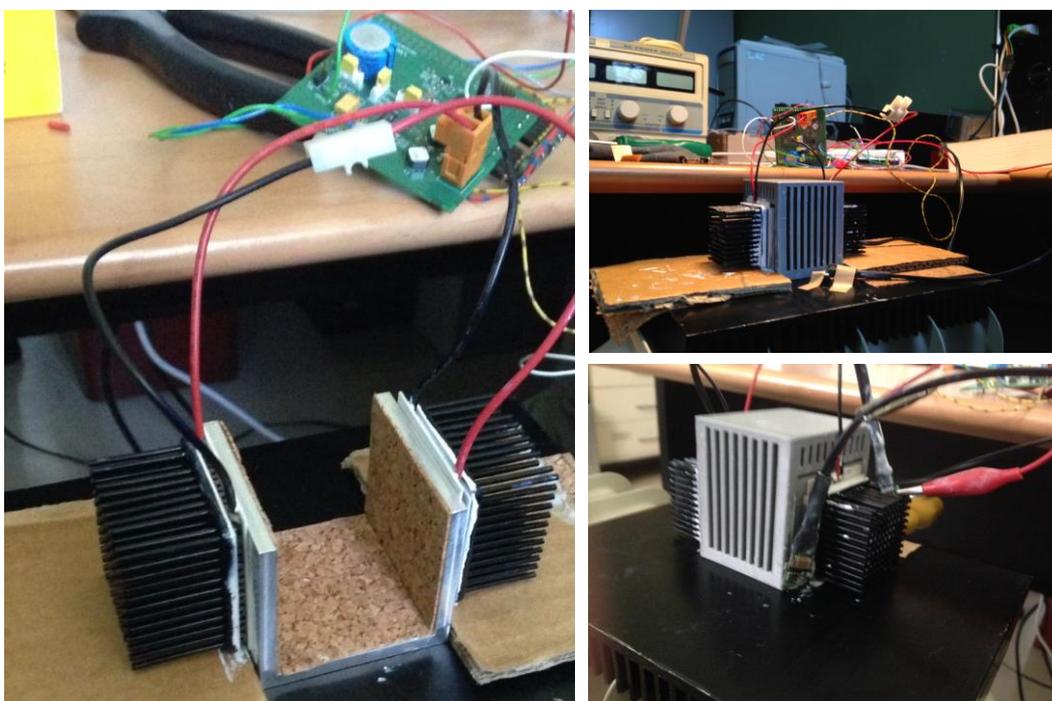


Figura 5.9 - Detalhes da montagem do interior (à esquerda) e das duas arquiteturas externas de sistema testadas (à direita, no topo com base de cartão e cortiça, e em baixo sem esta base).

O modelo mais barato da Laird, o PT8.12.F2.4040.TA.W6, foi o que obteve os melhores resultados, encontrando-se estes nas seguintes figuras (5.10, 5.11 e 5.12). Contrariamente, os piores resultados ficaram a cargo dos modelos da CUI CP85435 e CP85438, os quais não conseguiram carregar totalmente o supercondensador em nenhum dos testes com as diferentes configurações.

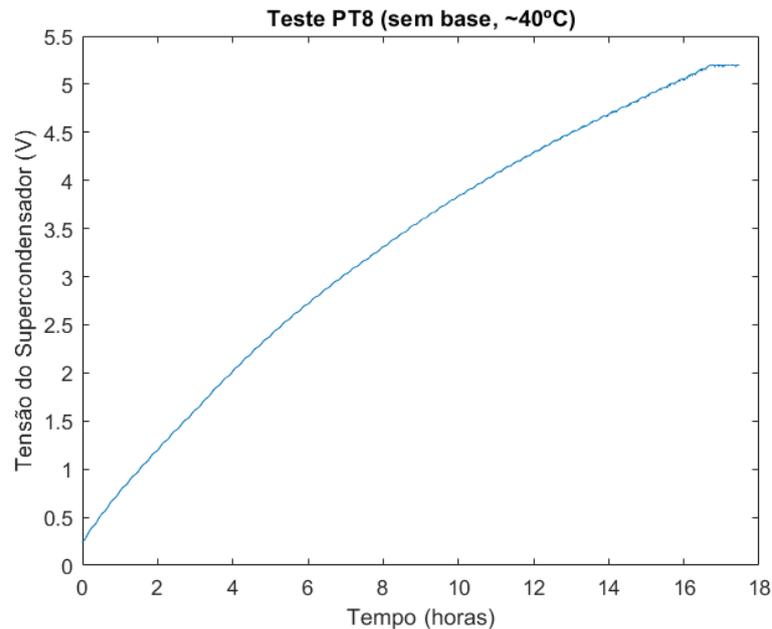


Figura 5.10 - Resultados obtidos para a termopilha da Laird PT8.12.F2.4040.TA.W6, sem base de proteção da radiação térmica para os dissipadores, para uma temperatura da superfície de aproximadamente 40°C. Com sala à temperatura de 27°C, o diferencial térmico obtido foi de cerca de 0,9°C.

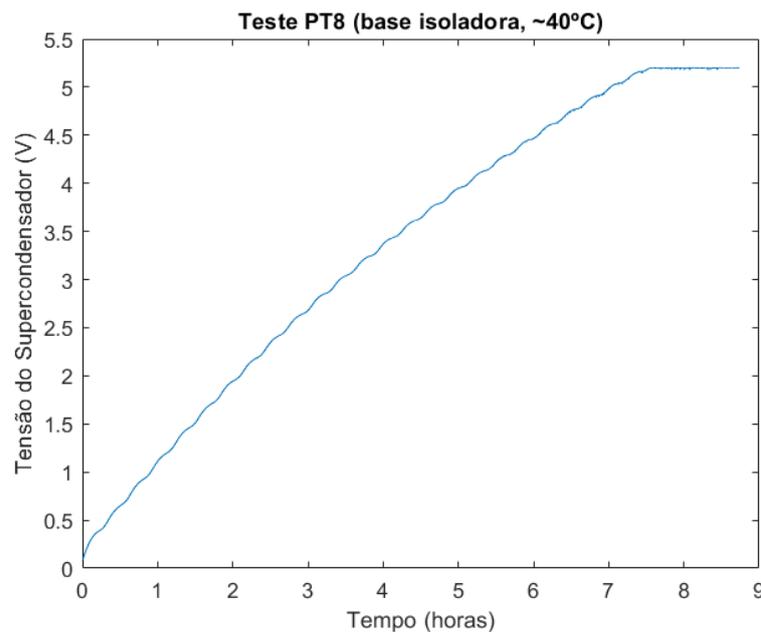


Figura 5.11 - Resultados obtidos para a termopilha da Laird PT8.12.F2.4040.TA.W6, com base de proteção da radiação térmica para os dissipadores, para uma temperatura da superfície a aproximadamente 40°C. Com a sala à temperatura de 27°C, o diferencial térmico obtido foi de cerca de 1,3°C.

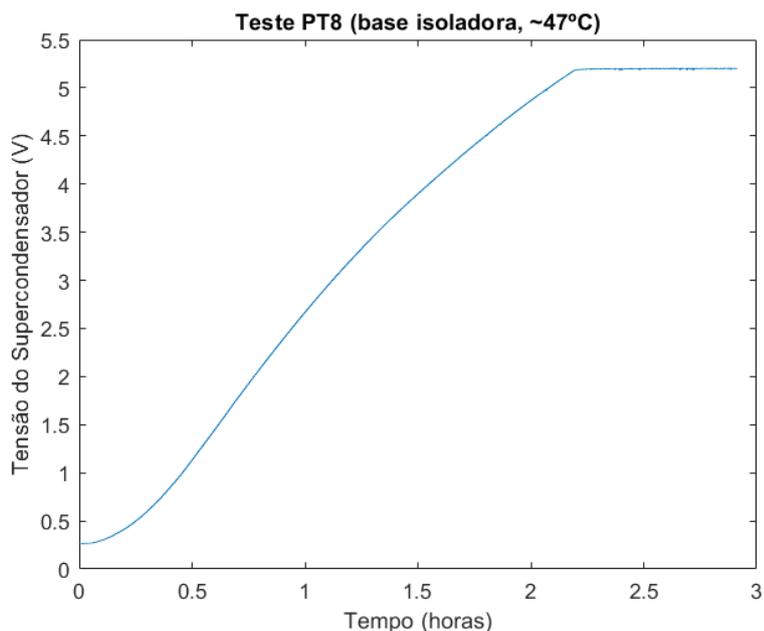


Figura 5.12 - Resultados obtidos para a termopilha da Laird PT8.12.F2.4040.TA.W6, com base de proteção da radiação térmica para os dissipadores, para uma temperatura da superfície a aproximadamente 47°C. Com a sala à temperatura de 27°C, o diferencial térmico obtido foi de cerca de 3°C.

Importa salientar que os resultados mostraram, inequivocamente, a importância de proteger os dissipadores da radiação térmica emitida pela superfície quente, por intermédio da base de cartão e cortiça.

Os dados obtidos permitiram concluir ainda que, para cada marca, os modelos testados de mais baixo custo apresentaram uma eficiência superior ou igual aos modelos mais dispendiosos.

Para impulsionar a produção de energia, deve ser considerado o aumento da altura do U, de modo a obter um maior diferencial térmico nas faces das termopilhas.

Capítulo 6

Sensorização

6.1 - Sensores Digitais

Nos últimos tempos, tem-se assistido a uma preferência do mercado por sensores digitais ao invés de analógicos. Tal é justificável não só pela possibilidade de dispensar a utilização de um ADC do sistema, mas também porque, com o desenvolvimento dos sensores MEMS (*Micro-electro-mechanical systems*, MEMS), estes constituem uma mais valia em termos de miniaturização, baixo custo, baixo consumo e mesmo de performance.

O processo de produção de MEMS [101], fazendo uso de técnicas de microfabricação, é semelhante ao de produção de circuitos integrados, sendo a principal diferença a adição de componentes eletromecânicos (microsensores e microatuadores) aos puramente eletrónicos já presentes. Assim, os dispositivos MEMS incluem um ou mais transdutores, todo o condicionamento de sinal requerido e, por vezes, possuem mesmo um microcontrolador.

Os sensores digitais possuem geralmente uma interface eletrónica de comunicação em série síncrona de baixo nível, sendo as mais tradicionais a I²C (*Inter-Integrated Circuit*, I²C) e a SPI (*Serial Peripheral Interface*, SPI) [102]. Neste caso a escolha recaiu sobre a SPI, pois possui um menor consumo energético, a sua implementação é mais simples e o número de sensores digitais a utilizar não é muito elevado (não sendo necessários muitos pinos).

Numa conexão SPI [103] existe sempre um *master* e um ou mais *slaves*, que comunicam por intermédio de 4 canais: MISO (*Master In Slave Out*, MISO), o MOSI (*Master Out Slave In*, MOSI), o SCK (*Serial Clock*, SCK) e o SS (*Slave Select*, SS). Como se pode ver na figura 6.1, à exceção do SS que liga cada *slave* ao *master* individualmente, todos os outros canais são comuns a todos os dispositivos.

Os canais MISO e MOSI permitem uma comunicação *full-duplex* entre o *master* e o *slave* selecionado por intermédio do canal SS com o nível lógico zero. De notar que o *master* apenas

pode comunicar com um *slave* de cada vez e que os *slaves* não podem comunicar entre si. O canal SCK permite sincronizar a comunicação entre os dois dispositivos envolvidos.

Cada fabricante implementa uma versão específica do protocolo SPI, sendo importante ter em atenção fatores como a taxa máxima de transmissão permitida, o valor do MISO quando a comunicação está inativa, o valor do MOSI no início e fim da comunicação, o valor que o SCK assume quando o canal está disponível (zero ou um) e o momento da amostragem dos dados tendo em conta os impulsos do SCK (subida ou descida).

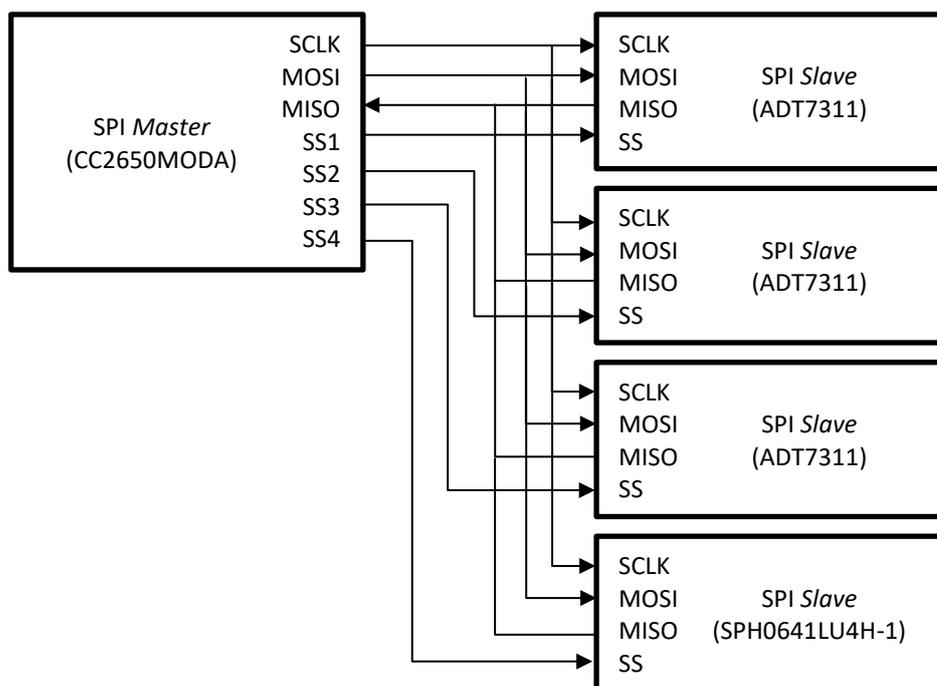


Figura 6.1 - Ligações SPI efetuadas no sistema em desenvolvimento.

6.1.2 - Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura MEMS usados neste projeto são os ADT7311 [93] (figura 6.2). Já foram usados sensores de temperatura da Analog Devices em projetos anteriores, tendo sido selecionado este modelo diferente principalmente pela precisão oferecida, $\pm 0,5$ °C. Os sensores ADT7311 apresentam valores de precisão e repetibilidade bastante adequados, baixo consumo e permitem a comunicação por SPI.

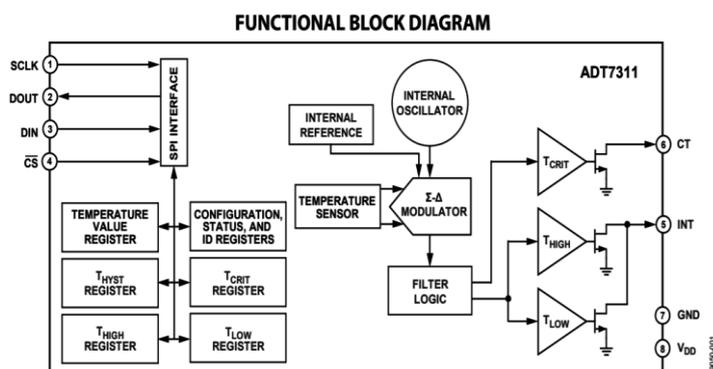


Figura 6.2 - Diagrama de blocos funcionais do sensor ADT7311 [93].

Dada a importância da informação acessível pelo conhecimento da temperatura, mas também pelo facto de serem estes os componentes eletrónicos que mais vão sofrer com temperaturas inusitadamente elevadas, optou-se pelo uso de três sensores iguais, numa redundância modular tripla [104].

Na redundância modular tripla, três elementos (neste caso, três sensores de temperatura) executam a mesma tarefa. Um processo de votação lógica por maioria dita o resultado final da tarefa ou leva ao descrédito do sistema e à identificação do elemento perturbador.

Neste contexto, o processo de votação deve devolver a média dos valores sempre que os três intervalos definidos pelos valores de temperatura medidos e pela precisão dos sensores ($\pm 0,5$ °C) se intersetem entre si, i.e., sempre que a diferença entre o máximo e o mínimo dos valores medidos for inferior a 1 °C. Quando não se verificar esta condição, caso exista uma intersecção de dois destes intervalos, o resultado assume a média dos respetivos valores medidos. Caso contrário, é anotado o erro e repete-se o processo. Ao fim de um certo número de erros consecutivos do mesmo sensor, este deve ser identificado como danificado e deve ser sinalizada a necessidade de revisão do dispositivo. Este algoritmo constitui assim um meio de autodiagnóstico.

6.1.3 - Microfone

A Knowles, que lançou o primeiro microfone MEMS capacitivos no mercado em 2003, é atualmente a líder de mercado com uma representação de 40% no total de vendas deste tipo de dispositivos [105]. Destaca-se, sobretudo, pela sua gama SiSonic™ que na sua quarta geração apresenta dimensões ainda mais reduzidas, novas soluções que permitem reduzir o ruído e capacidades de saída mais elevadas. Também a sua montagem à superfície permite reduzir custos.

Para este projeto foi selecionado o sensor SPH0641LU4H-1 [94], que irá ser responsável pela medição do zumbido. Este tem a particularidade de, por seleção, funcionar em duas gamas de frequências: a gama do audível e a gama dos ultrassons (curvas de resposta nas imagens 6.3 e 6.4).

Na tabela 6.1 são reproduzidos dados referidos na folha de especificações do SPH0641LU4H-1 referentes aos seus três modos de funcionamento: adormecido, standard e ultrassónico.

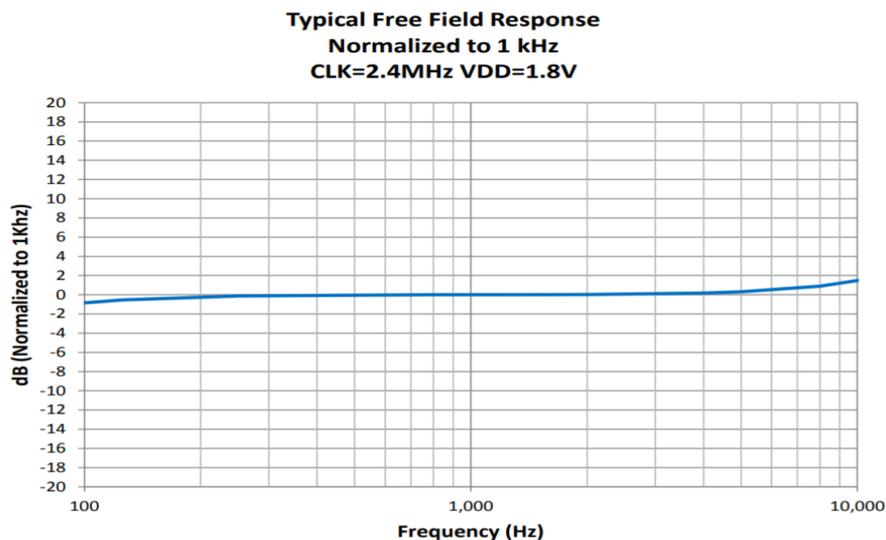


Figura 6.3 - Curva de resposta do SPH0641LU4H-1 no modo standard [94].

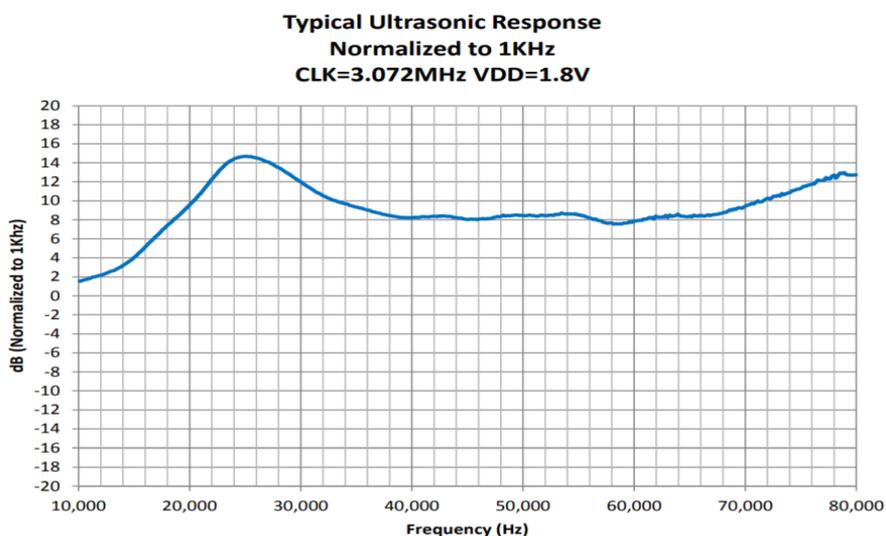


Figura 6.4 - Curva de resposta do SPH0641LU4H-1 no modo ultrassônico [94].

Tabela 6.1 - Dados relativos aos três modos de funcionamento do SPH0641LU4H-1 [94].

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Supply Current	I _{DD}	Ultrasonic Mode (f _{CLOCK} = 3,072 MHz, V _{DD} = 1,8 V)	-	845	1000	μA
		Standard Mode (f _{CLOCK} = 2,4 MHz, V _{DD} = 1,8 V)	-	620	700	μA
		Low-Power Mode (f _{CLOCK} = 768 kHz, V _{DD} = 1,8 V)	-	235	270	μA
Sensitivity	S	94 dB SPL @ 1 kHz	-27	-26	-25	dBFS
Signal to Noise Ratio	SNR	94 dB SPL @ 1 kHz, A-weighted	-	64.3	-	dB(A)
Total Harmonic Distortion	THD	94 dB SPL @ 1 kHz, S = Typ	-	0.2	-	%

6.2 - Sensores Analógicos

Sendo verdade que os sensores analógicos têm vindo a perder terreno, também o é que, em certos casos, os sensores digitais ainda não conseguem igualar as performances conseguidas pelos analógicos. Dois exemplos disso mesmo são a deteção de descargas parciais no interior e exterior do transformador, com recurso a sensores ultrassónicos e a uma antena RF, respetivamente.

6.2.1 - Sensor de Ultrassons

Olivier Lopes [106], na sua tese de mestrado, relata um conjunto de testes laboratoriais por si efetuados que lhe permitiram verificar que os microfones piezoelétricos apresentam um melhor desempenho na deteção de descargas parciais do que os MEMS, com uma melhor sensibilidade e um melhor fator de qualidade. O autor destaca os microfones Prowave devido aos seus fatores de qualidade elevados e às suas frequências de ressonância próximas dos 40 kHz. Esta última característica, como indica o autor, é de extrema importância devido à menor atenuação para esta frequência do sinal sonoro emitido nas descargas elétricas.

Num processo em tudo semelhante à segunda fase de testes descrita por Olivier (recorrendo a um gerador de Van der Graaf PHYWE 07643.93, a um osciloscópio Tektronix TDS 210 e a um sensor 400PT160), foi avaliada a melhoria introduzida por um pavilhão auditivo simulado com um pequeno funil plástico com o tubo cortado. A conclusão foi que a melhoria, inferior a 10% no pico de tensão aos terminais do sensor, não é significativa para que seja considerado o aumento de complexidade e de custos para “escavar” um pavilhão auditivo no U de alumínio.

Importa comparar o 400PT160 [107], um sensor mono-estático (transdutor que pode funcionar como recetor e transmissor) desenvolvido para sistemas de medição de distâncias, com o equivalente 400SR160 [108], um sensor bi-estático (apenas recetor) standard com grelha, não mencionado na tese referida.

Ambos apresentam picos de sensibilidade para $40,0 \pm 1,0$ KHz e dimensões similares. Quanto à sensibilidade e à largura de banda a -6 dB, o 400PT160 apresenta valores mínimos de -65 dB e de 2,0 KHz, enquanto que para o 400SR160 estes valores são de -61 dB e de 2,5 KHz.

Importa ainda analisar tanto a resposta de ambos os sensores em frequência como a sua resposta direcional, visíveis nas figuras 6.5 e 6.6. Como facilmente se comprova, o 400PT160 é bastante mais direcional. Assim, apesar da melhor sensibilidade do 400SR160, o melhor fator de qualidade e a maior direccionalidade do 400PT160 fazem deste uma melhor proposta. De notar que interessa que este sensor apenas detete os sinais provenientes do interior do transformador.

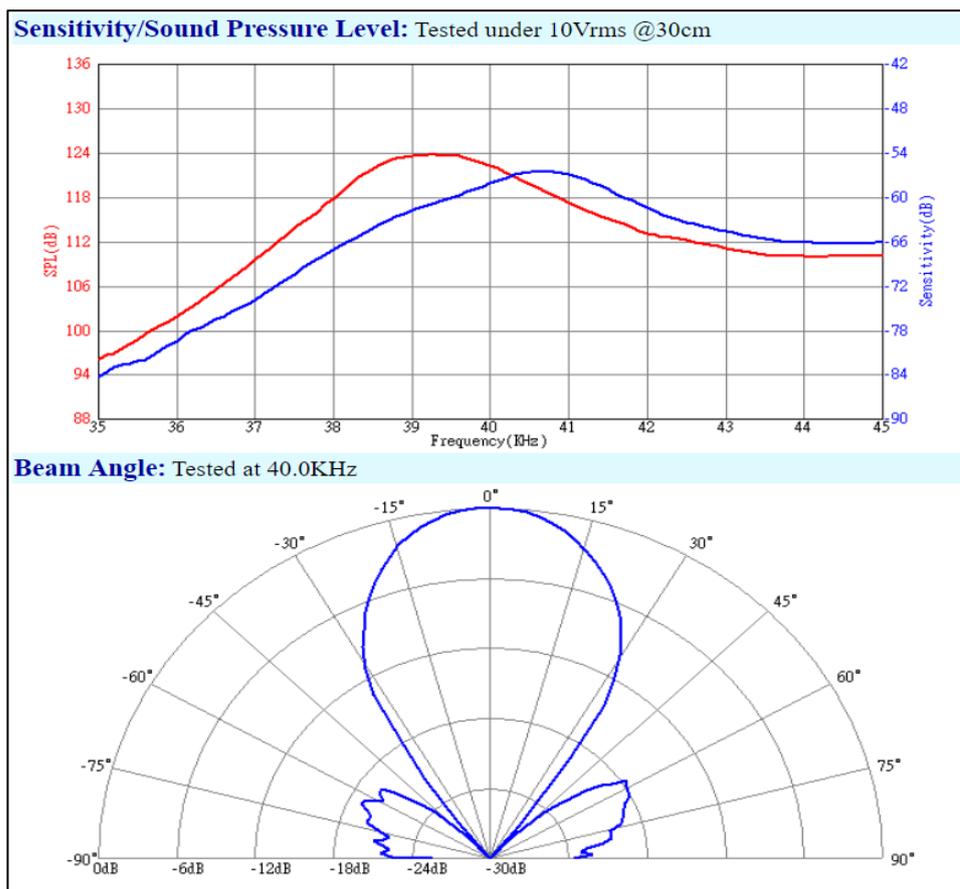


Figura 6.5 - Resposta em frequência e resposta direcional do 400PT160 [107].

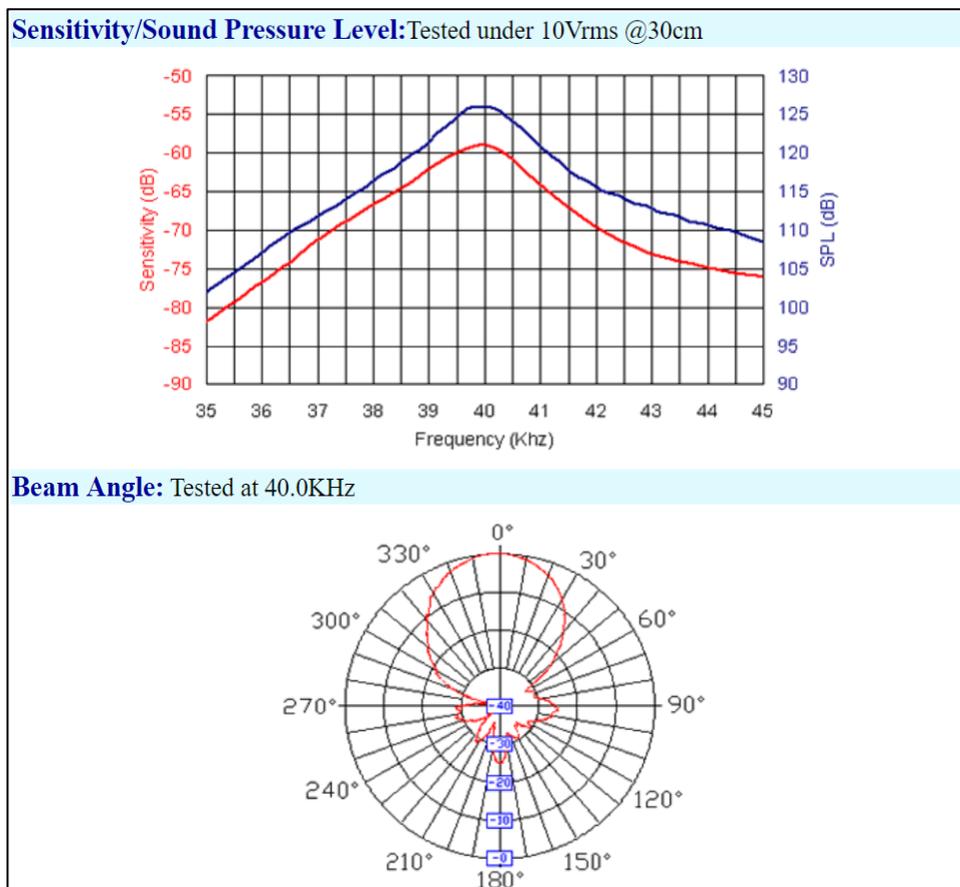


Figura 6.6 - Resposta em frequência e resposta direcional do 400SR160 [108].

Contudo, ambos estes sensores têm uma característica que, apesar de não os excluir de utilização na maior parte dos TD, pode em certos casos ser comprometedora: a gama de temperaturas de funcionamento até aos 70 °C.

Assim, para esses casos, o sensor MA40S4R [109] da Murata pode ser uma solução, visto que permite o funcionamento até aos 85 °C e tem um pico de sensibilidade de -63 dB em torno dos 40 KHz.

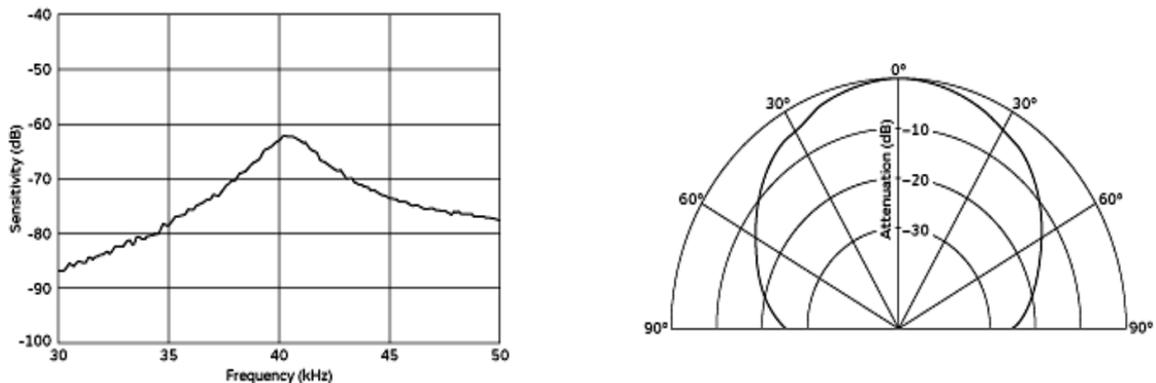


Figura 6.7 - Resposta em frequência e resposta direcional do MA40S4R [109].

De notar que o sinal obtido terá de ser amplificado, com recurso a um amplificador de instrumentação, numa relação ainda a determinar em condições reais. Será também avaliado o uso circuito integrado detetor de envolvente [110].

6.2.2 - Antena RF

O método de deteção de descargas parciais mais simples é pela captação de sinais de radiofrequência [111, 112]. Kamendren Govender et al. [111] referem que as descargas parciais originam sinais nas gamas de frequência VHF (*Very High Frequencies*, VHF, 30 a 300 MHz) e UHF (*Ultra High Frequencies*, UHF, 300 MHz a 3 GHz). Analisando o espectro de frequências obtido de descargas parciais nas travessias para estas duas gamas de frequência e o espectro obtido da radiação de fundo (rádios, TV, redes de operadoras móveis, ...), os autores destacam as frequências de 400MHz (60dB) e de 1000MHz (30dB) como sendo as que melhor permitem identificar este fenómeno.

O facto de serem comuns alguns sistemas de comunicação sem fios na proximidade dos 433MHz faz com que, para gamas de frequência nesta proximidade, existam várias antenas a um preço acessível. Como a potência emitida permitida nesses sistemas é limitada, com a definição de um valor *threshold*, estas antenas constituem uma boa proposta de valor. A nossa escolha foi a 0433AT62A0020E [113], baseado em três fatores: o preço, a gama de frequências e as dimensões. A sua gama de frequências vai dos 423 MHz aos 443 MHz com o pico de eficiência nos 433 MHz e com possibilidade de ser sintonizada nos 403 e nos 460 MHz.

Na presente data, encontra-se em testes a possibilidade de usar também um circuito detetor de envolvente da onda captada pela antena [110]. Neste caso será usado um circuito simples de um típico desmodulador de amplitude composto por um díodo de precisão como detetor de pico seguido de um filtro passa baixo. Por seleção e união de máximos obtidos, o sinal resultante permite determinar a duração da descarga e a sua intensidade. Por integração deste sinal, é possível determinar a “energia” associada à descarga, permitindo distinguir vários níveis de alarme a comunicar à central de controlo remoto.

Capítulo 7

Conclusão

Desta parceria entre o laboratório LIBPhys-UC e a Eneida Wireless & Sensors, S.A. resultou um sensor inteligente para a monitorização remota de transformadores de distribuição, tendo em vista o suporte à sua manutenção prescritiva. Este sistema encontra-se em fase de prototipagem final, estando agendada para finais do corrente mês de julho a primeira bateria de testes integrais em condições reais. Ao longo do processo de desenvolvimento, realizaram-se ensaios parcelares relativos à comunicação local, à alimentação em potência, à medida de temperatura e à deteção de descargas elétricas no ar. Devido à impossibilidade de aceder a um TD danificado e à especificidade de ambos os testes sonoros (captação de zumbido e principalmente de deteção de descargas parciais no interior do TD), estes terão de ser realizados em laboratórios altamente diferenciados, no Instituto Superior Técnico e na EFACEC.

Este dispositivo é considerado inovador, pelas funcionalidades e soluções tecnológicas assumidas, bem como pelo interesse manifestado pelo mercado. A partir do trabalho aqui apresentado, caberá à Eneida a realização final do desenvolvimento de produto, tendo por base os testes acima referidos.

É ainda importante referir, em termos de trabalho futuro, o desenvolvimento de uma *gateway*, que poderá ter por base o modelo EWS-DTVI-g [59], e do algoritmo que permita a integração da informação dos diversos sensores a implementar num PT, visando a sua manutenção prescritiva como um todo.

Referências

- [1] N. Hunke, Z. Yusuf, M. Rübmann, F. Schmiege, A. Bhatia, and N. Kalra. (2017, 05-10-2017). *Winning in IoT: It's All About the Business Processes*. Available: <https://www.bcgperspectives.com/content/articles/hardware-software-energy-environment-winning-in-iot-all-about-winning-processes/>
- [2] "Services and IoT Applications and Analytics Will Capture some 60% of IoT Spending," ed. www.bcgperspectives.com: The Boston Consulting Group, 2017.
- [3] "Ten Use Cases Will Drive IoT Growth Through 2020," ed. www.bcgperspectives.com: The Boston Consulting Group, 2017.
- [4] J. Manyika, M. Chui, P. Bisson, J. Woetzel, R. Dobbs, J. Bughin, *et al.*, "THE INTERNET OF THINGS: MAPPING THE VALUE BEYOND THE HYPE," McKinsey Global Institute, www.mckinsey.com Junho 2015.
- [5] "The Future of Electricity," ed. <http://www3.weforum.org> World Economic Forum, March 2017.
- [6] I. PÉREZ-ARRIAGA, C. KNITTEL, R. MILLER, and R. TABORS, "UTILITY OF THE FUTURE," ed: MIT Energy Initiative, 2016.
- [7] P. Ferreira, "Arquitetura do InovGrid: focada no cliente e numa infra-estrutura integrada," ed. Seminário "O Meio Edificado ao Serviço de uma Elevada Qualidade de Vida": EDP Inovação, 2012, pp. "InovGrid" - Redes Inteligentes ao Serviço da Prosperidade Renovável.
- [8] H. D. Keulenaer, D. Chapman, and S. Fassbinder, "The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers," in *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ No. 482)*, 2001, p. 5 pp. vol.4.
- [9] (09/10/2017). *Caracterização da RND*. Available: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/RND%E2%80%93Caracterizacao.aspx>
- [10] "LOT 2: Distribution and power transformers Tasks 1-7," January 2011.
- [11] S. Fassbinder and R. Targosz, "Application Note - Transformers in Power Distribution Networks."
- [12] (02-01-2018). *TOSHIBA ENERGY SYSTEMS & SOLUTIONS CORPORATION - Transformer - Gas Insulated Transformers*. Available: <http://www.toshiba-tds.com/tandd/products/trans/en/gitrans.htm>
- [13] G. Hollings, "The difference between distribution and power transformers," ed. www.abb-conversations.com (06/02/2018), 2013.
- [14] (2018, 02/01/2018). *Choice of MV/LV transformer - Electrical Installation Guide (Schneider Electrics)*. Available: http://www.electrical-installation.org/enwiki/Choice_of_MV/LV_transformer
- [15] J.-M. COUYADE and P. LAUZEVIS, "ACCELERATED AGEING TEST OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS," presented at the CIRED, 2015.
- [16] (2017, 30/12/2017). *Hermetically-sealed totally-filled transformer*. Available: <http://www.electrical-installation.org/enw/images/a/a3/PB116687.jpg>
- [17] P. Boss, "Insulating fluids for power transformers," presented at the <http://a2.cigre.org/Publications/SC-A2-Position-Papers> (02/01/2018).
- [18] S. Tenbohlen, "Transformer Reliability Survey," in *Tutorial CIGRÉ WG A2.37*, ed.
- [19] J. Faiz and B. Siahkollah, "Differences between conventional and electronic tap-changers and modifications of controller," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 1342-1349, 2006.
- [20] A. Mamizadeh and İ. İ, "Evaluation and comparing the loss of life for outdoor and MV/LV prefabricated oil immersed power transformer based on nonlinear thermal models," in *2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2011, pp. I-183-I-187.
- [21] D. J. Wilkins. (30/01/2018). *The Bathtub Curve and Product Failure Behavior*. Available: <http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>

- [22] "TECHNICAL INSTRUCTIONS DGPT2®," ed: Automation 2000, 2017.
- [23] J. Kuffel, E. Kuffel, and W. S. Zaengl, *High voltage engineering: fundamentals*: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [24] S. Chakravorti, D. Dey, and B. Chatterjee, *Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers*: Springer, 2013.
- [25] J. Holtzhausen and W. Vosloo, *High Voltage Engineering Practice and Theory* <http://www.dbc.wroc.pl/dlibra> (30/01/2018), 2014.
- [26] S. F. Waterer, "7 Predictive Maintenance Technologies That Enhance Power Equipment Reliability," *Schneider Electric USA*, vol. Document Number 11991100DDBB11220098, November 2012.
- [27] C. Bartoletti, M. Desiderio, D. D. Carlo, G. Fazio, F. Muzi, G. Sacerdoti, *et al.*, "Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 221-229, 2004.
- [28] A. Inc., "TXpert - The world's first digital distribution transformer," ed. <http://new.abb.com/news/detail/1097/worlds-first-digital-distribution-transformer>, 2017.
- [29] J. F. TISSIER and J. CORNET, "NEW SOFT SENSORS FOR DISTRIBUTION TRANSFORMER MONITORING," *24th International Conference on Electricity Distribution*, vol. Paper 0840 CIRED, 2017.
- [30] R. R. Pawar, P. A. Wagh, and S. B. Deosarkar, "Distribution transformer monitoring system using Internet of Things (IoT)," in *2017 International Conference on Computational Intelligence in Data Science (ICCIDS)*, 2017, pp. 1-4.
- [31] N. CLERC, I. BEYL, and H. HOELTZEL, "IOT SERVICES FOR A SMART LV GRID MANAGEMENT," *Glasgow, 12-15 June 2017*, vol. Paper 1214 CIRED, 2017.
- [32] J. Johansson, H. Sporre, L. Selberg, and O. Hansson, "Monitoring systems for secondary substations - a comparative study," *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2017.
- [33] C. Eastham, D. Longo, K. Tavernier, and L. Pickford, "Improving asset management with online partial discharge monitoring of ring main units and secondary substations," *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2017.
- [34] A. LEITÃO, P. CARREIRA, J. M. ALVES, F. GOMES, M. CORDEIRO, and F. CARDOSO, "USING SMART SENSORS IN THE REMOTE CONDITION MONITORING OF SECONDARY DISTRIBUTION SUBSTATIONS," *23rd International Conference on Electricity Distribution*, vol. 15-18 June 2015, 2015.
- [35] P. PIPET, M. CLEMENCE, and D. LEBLOND, "WIRELESS CONNECTION IN DISTRIBUTION SUBSTATION," presented at the CIRED, 2015.
- [36] ITeCons. (2018). *NEXTSTEP - NEXT distribution SubStation improvEd Platform*. Available: <http://www.itecons.uc.pt/projectos/nextstep/index.php?module=sec&id=675> (03/07/2018). *Comsol Multiphysics*. Available: <https://www.comsol.com/>
- [37] Mathworks. *Matlab*. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [38] O. d. R. Lopes, "Sensores inteligentes para a detecção de descargas parciais em activos de subestações de distribuição de energia eléctrica," 2015.
- [39] K. L. Shu Yinbiao, Peter Lanctot, *et al.*, "Internet of Things: Wireless Sensor Networks," IEC Basecamp, <https://basecamp.iec.ch/download/iec-white-papers-internet-of-things-wireless-sensor-networks/January> 26, 2018 2018.
- [40] L. W. McKeen, "1 - Introduction to Plastics and Elastomers," in *Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers (Second Edition)*, L. W. McKeen, Ed., ed Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2008, pp. 1-39.
- [41] AlticeLabs, "IoT Cellular Networks", ed, 2017.
- [42] N. Lethaby, "Wireless connectivity for the Internet of Things: One size does not fit all," T. Instruments, Ed., ed, 2017.
- [43] Northstream, "Connectivity technologies for IoT," ed, 2016.
- [44] B. SIG. (2018, 10/04/2018). *Ever wonder about the history of the Bluetooth Special Interest Group?* Available: <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history>
- [45] Z. Alliance. (2018, 11/04/2018). *What is Zigbee?* Available: <http://www.zigbee.org/what-is-zigbee/>

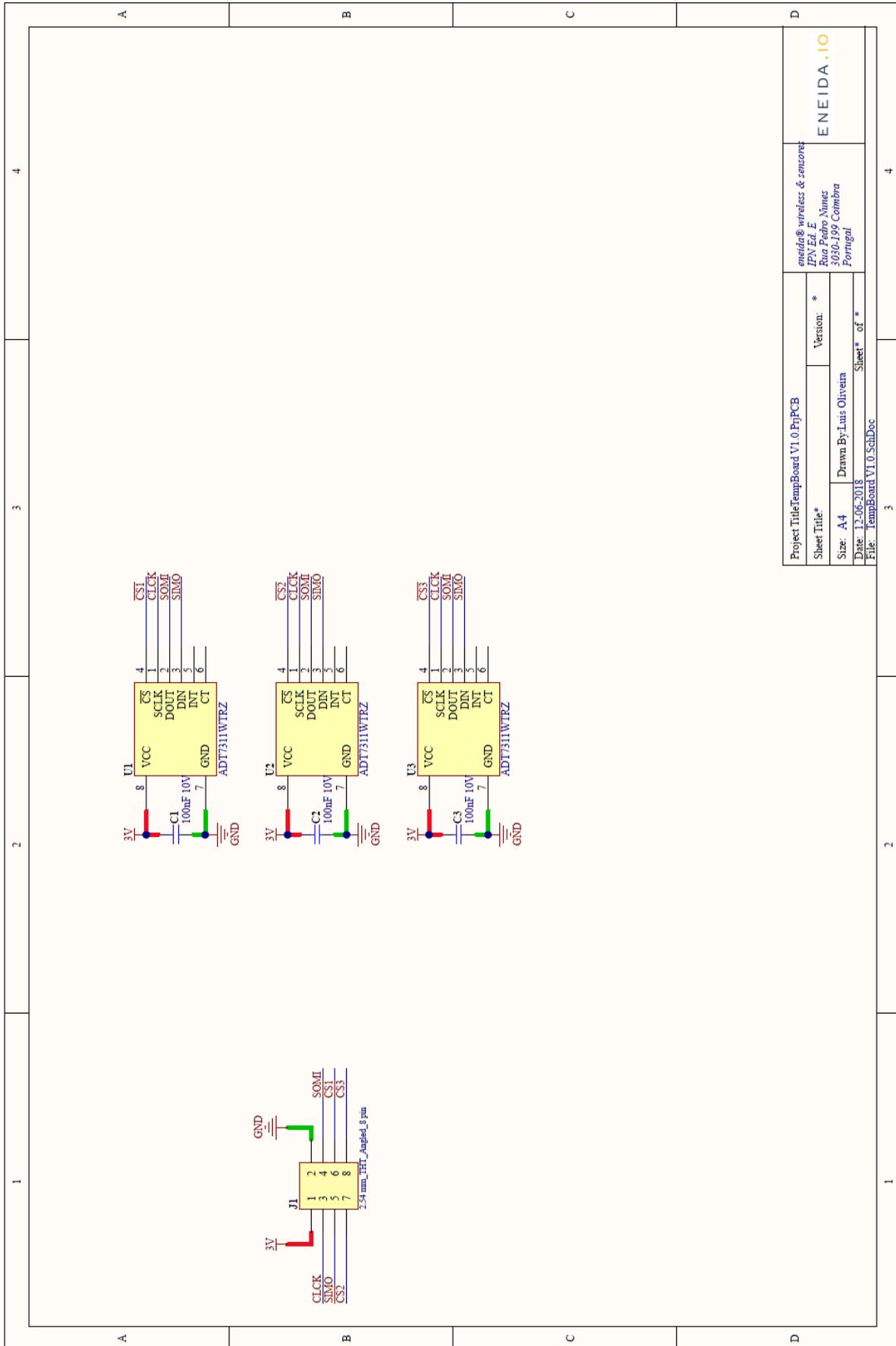
- [47] A. Dementyev, S. Hodges, S. Taylor, and J. Smith, "Power consumption analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT sensor nodes in a cyclic sleep scenario," in *2013 IEEE International Wireless Symposium (IWS)*, 2013, pp. 1-4.
- [48] J. Olsson, "6LoWPAN demystified," T. Instruments, Ed., ed, 2014.
- [49] T. Group. (2018, 11/04/2018). *Thread: FAQ / DEVELOPERS*. Available: <https://www.threadgroup.org/support#faq>
- [50] "PAN1760A Bluetooth Low Energy Module: Product Specification," Panasonic, Ed., ed.
- [51] "BMD-340 Module for Bluetooth 5 and Thread - Data sheet," RIGADO, Ed., ed.
- [52] T. Instruments, "CC2650MODA SimpleLink™ Bluetooth® low energy Wireless MCU Module," ed, SWRS187C -AUGUST 2016-REVISED JULY 2017.
- [53] T. Instruments, "CC2650MODA," <http://www.ti.com/lsds/ti/ko/wireless-connectivity/certified-wireless-modules/overview.page>, Ed., ed, 2016.
- [54] T. Instruments. (23/07/2016). *SimpleLink™ CC2650 wireless MCU LaunchPad™ Development Kit*. Available: <http://www.ti.com/tool/launchxl-CC2650>
- [55] "Datasheet ADT7301," A. DEVICES, Ed., ed, 2005.
- [56] T. Instruments. *Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE)*. Available: <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>
- [57] T. Instruments. *Sensor Controller Studio*. Available: <http://www.ti.com/tool/SENSOR-CONTROLLER-STUDIO>
- [58] T. Instruments. *TI SimpleLink™ Starter*. Available: <https://itunes.apple.com/pt/app/ti-simplelink-starter/id1037784820?mt=8>
- [59] Microsoft. (05/07/2018). *What's a Universal Windows Platform (UWP) app?* Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/uwp/get-started/universal-application-platform-guide>
- [60] ENEIDA.io. (2018, 10/04/2018). *Low Voltage Network Monitoring and Optimization*. Available: <https://eneida.io/deepgrid-one/>
- [61] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, 2018/01/04/ 2018.
- [62] (2018, 15/05/2018). *Specialised Narrowband-IoT services*. Available: <http://www.vodafone.com/business/iot/managed-iot-connectivity/nb-iot>
- [63] Nokia. (2017, Optimizing distribution automation with private LTE networks. Available: <https://networks.nokia.com/use-case/utility-FAN-DA>
- [64] S. Bexiga. (2017, Aí está o primeiro "Smart Meter NB-IoT" do mundo e é português. Available: <http://www.jornaleconomico.sapo.pt/noticias/ai-esta-o-primeiro-smart-meter-nb-iot-do-mundo-e-e-portugues-182524>
- [65] L. Alliance™. (15-05-2018). *What is the LoRaWAN™ Specification?* Available: <https://lora-alliance.org/about-lorawan>
- [66] Sigfox. (16-05-2018). *Sigfox, the world's leading IoT services provider*. Available: <https://www.sigfox.com/en>
- [67] M. Raza, N. Aslam, H. Le-Minh, S. Hussain, Y. Cao, and N. M. Khan, "A Critical Analysis of Research Potential, Challenges, and Future Directives in Industrial Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, pp. 39-95, 2018.
- [68] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, pp. 1989-2001, 2013.
- [69] "Energy Harvesting: Off-Grid Microwatt to Megawatt 2017-2027," IDTechEx2017.
- [70] R. WALLING and G. B. SHATTUCK, "DISTRIBUTION TRANSFORMERS BEHAVIOR AND AGING IN LOCAL DELIVERY DISTRIBUTION SYSTEMS," presented at the 19th CIRED, Vienna, 2007.
- [71] A. Othman, "Energy storage system options in Intelligent Wireless Sensor Network," in *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 2017, pp. 772-778.
- [72] "Datasheet LTC3108," L. T. CORPORATION, Ed., ed, 2010.
- [73] "Datasheet LTC3109," L. T. CORPORATION, Ed., ed, 2010.
- [74] S. M. V. SEMEDO, "Gestão de energia em redes de sensores sem fios," PhD, Departamento de Física, Universidade de Coimbra, 2016.
- [75] K. Thangaraj, "DEVELOPMENT OF EFFICIENT ENERGY STORAGE AND POWER MANAGEMENT FOR AUTONOMOUS AIRCRAFT STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS," PhD, School of Engineering, Cardiff University, 2017.

- [76] F. J. DiSalvo, "Thermoelectric Cooling and Power Generation," ed. VOL 285 30 JULY 1999: <http://www.sciencemag.org/>, 1999.
- [77] X. H. Maxime Markov, Han-Chun Liu, Naiming Liu, Joseph Poon, Keivan Esfarjani, Mona Zebarjadi. (2018, Semi-metals as potential thermoelectric materials: case of HgTe. Available: <https://arxiv.org/pdf/1801.04324.pdf>
- [78] J. Smoot. (2018, 2018-06-04). Choosing and Using Advanced Peltier Modules for Thermoelectric Cooling. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2018/feb/choosing-using-advanced-peltier-modules-thermoelectric-cooling>
- [79] A. Montecucco, J. Siviter, and A. R. Knox, "The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel," *Applied Energy*, vol. 123, pp. 47-54, 2014/06/15/ 2014.
- [80] M. Eletronics. (01/06/2018). *PT8,12,F2,4040,TA,W6*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Laird/PT812F24040TAW6?qs=sGAEpiMZZMtAhbGwPnfBjVs6jbUOMQ2snfEXN3ihdyvEOrYeNtjfyQ%3d%3d>
- [81] M. Eletronics. (01/06/2018). *UT15,200,F2,4040,TA,W6*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Laird/UT15200F24040TAW6?qs=sGAEpiMZZMtAhbGwPnfBjVs6jbUOMQ2sgrZxz71qmvi9tJKcFfuVlg%3d%3d>
- [82] M. Eletronics. (01/06/2018). *CP60440*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/CUI/CP60440?qs=WyjLAZoYn52V83Qxt0LyPA%3D%3D>
- [83] M. Eletronics. (01/06/2018). *CP85438*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/CUI/CP85438?qs=%2fha2pyFadugRcl86h9EcN7%252bdWQIOfztmNGzLiFh2ATE%3d>
- [84] M. Eletronics. (01/06/2018). *CP85435*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/CUI/CP85435?qs=%2fha2pyFadujfYRXwUUH5GLVNhh9Qgn7VeK99tq%252bhCAA%3d>
- [85] P. Harrop. (2017, 17/06/2018). Battery Elimination in Electronics and Electrical Engineering. *IDTechEx*. Available: <https://www.idtechex.com/research/articles/battery-elimination-in-electronics-and-electrical-engineering-00011638.asp>
- [86] Murata, "Charge and Discharge of EDLC," T. S. a. P. o. E. D. L. Capacitor, Ed., ed.
- [87] M. Eletronics. (01/06/2018). *FT0H104ZF*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/?qs=iaWy59%2Fd4KBQJajlplycVw%3D%3D>
- [88] M. Eletronics. (01/06/2018). *FT0H224ZF*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/KEMET/FT0H224ZF?qs=6Y36ihRkJPXv0lFt2OqM5w%3D%3D>
- [89] Farnell. (01/06/2018). *MBH42.5002-25P/2.6*. Available: http://pt.farnell.com/malico/mbh42-5002-25p-2-6/heat-sink-42-5x42-5x25mm/dp/1373266?ost=MBH42.5002-25P%2F2.6&ddkey=http%3Apt-PT%2FElement14_Portugal%2Fsearch
- [90] Farnell. (01/06/2018). *CEBF0145451601-00*. Available: http://pt.farnell.com/malico/cebf0145451601-00/cooler-bga-40x40mm/dp/1373240?ost=CEBF0145451601-00&ddkey=http%3Apt-PT%2FElement14_Portugal%2Fsearch
- [91] C. L. a. M. H. Joakim Lindh. (2017, Measuring Bluetooth Low Energy Power Consumption (SWRA478C). Available: <http://www.ti.com/lit/an/swra478c/swra478c.pdf>
- [92] (2010, 06-06-2018). *NXP's New 120 MHz ARM Cortex-M3 Microcontrollers Top DSP Benchmarks*. Available: <https://www.design-reuse.com/news/22739/nxp-arm-cortex-m3-microcontroller.html>
- [93] "Datasheet ADT7311," A. DEVICES, Ed., ed, 2011.
- [94] "Datasheet SPH0641LU4H-1," K. Electronics, Ed., ed, 2014.
- [95] S. NAJAR and E. ETIEN, "SOFT SENSOR FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS: THERMAL AND ELECTRICAL MODELS," *23rd International Conference on Electricity Distribution*, vol. Paper 0419 CIRED, 2015.
- [96] T. SANTIAGO, F. BARROSO, J. GERIA, R. LOURENÇO, A. PEREIRA, and R. MONTEIRO, "DYNAMIC VENTILATION OF SECONDARY SUBSTATION: INCREASE OR DECREASE THE OPENINGS?," presented at the 23rd CIRED, Lyon, 2015.

- [97] Farnell. (01/06/2018). *MPC404025T*. Available: <http://pt.farnell.com/amec-thermasol/mpc404025t/heat-sink-ceramic-40-40-2-5-std/dp/1892477>
- [98] Farnell. (01/06/2018). *CCI11*. Available: <http://pt.farnell.com/cci/cci11/heat-sink-40x40x5mm/dp/1373300>
- [99] PHASAK. (01/06/2018). *DTA 025*. Available: <http://www.phasak.com/pt/producto/massa-termica-em-seringa-branca-5-8-25-g>
- [100] M. Eletronics. (01/06/2018). *FS0H224ZF*. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/KEMET/FS0H224ZF?qs=iaWy59%2Fd4KAM%2F%252bWi0sl5hA%3D%3D>
- [101] Sensera, "MEMS and MEMS Microfabrication," ed. <http://sensera.com/2018/wp-content/uploads/2018/04/What-are-MEMS.pdf>, 2018.
- [102] (14-06-2018). *Introduction to I²C and SPI protocols*. Available: <https://www.byteparadigm.com/applications/introduction-to-i2c-and-spi-protocols/>
- [103] M. Usach. (2013, *SPI Interface. Analog Devices*. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1248.pdf>
- [104] R. E. Lyons and W. Vanderkulk, "The Use of Triple-Modular Redundancy to Improve Computer Reliability," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 6, pp. 200-209, 1962.
- [105] C. L. G. B. S. R. Fraux, "Knowles MEMS Microphones in Apple iPhone 7 Plus: Patent-to-Product Mapping," 2017.
- [106] O. d. R. Lopes, "Sensores inteligentes para a detecção de descargas parciais em activos de subestações de distribuição de energia eléctrica," Tese de Mestrado, Dep. Física, Universidade de Coimbra, 2015.
- [107] "Datasheet 400PT160," Prowave, Ed., ed, 2005.
- [108] "Datasheet 400SR160," Prowave, Ed., ed, 2005.
- [109] murata. (01/06/2018). *MA40S4R*. Available: <https://www.murata.com/products/productdetail?partno=MA40S4R>
- [110] T. F. Schubert and E. M. Kim, *Fundamentals of Electronics: Book 4: Oscillators and Advanced Electronics Topics*: Morgan & Claypool Publishers, 2016.
- [111] L. M. Kamendren Govender, Alan Nesbitt. (2010, 14/06/2018). Partial discharge detection using RFI measurements. *energize*. Available: https://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/Energize%20%202010/01_TT_01_PartialDischarge.pdf
- [112] Q. Liu, S. s. Zheng, Q. Zhang, and H. y. Ying, "Experimental study on UHF pattern of partial discharges in transformer bushings," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016, pp. 1-4.
- [113] "Datasheet 0433AT62A0020E," J. Technology, Ed., ed, 2018.

Anexos

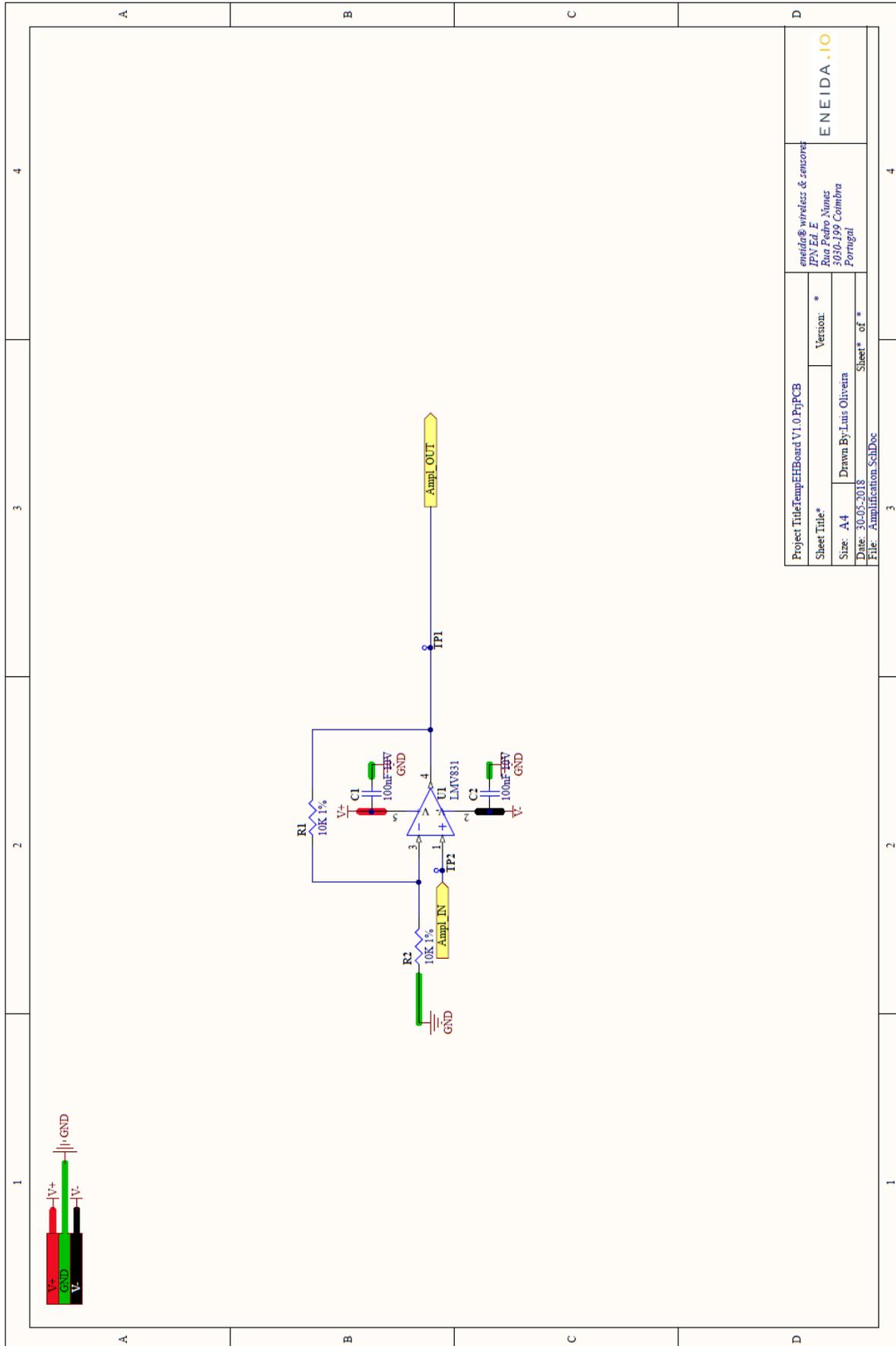
Anexo 1: Esquemas Eléctricos da Placa de Sensores de Temperatura



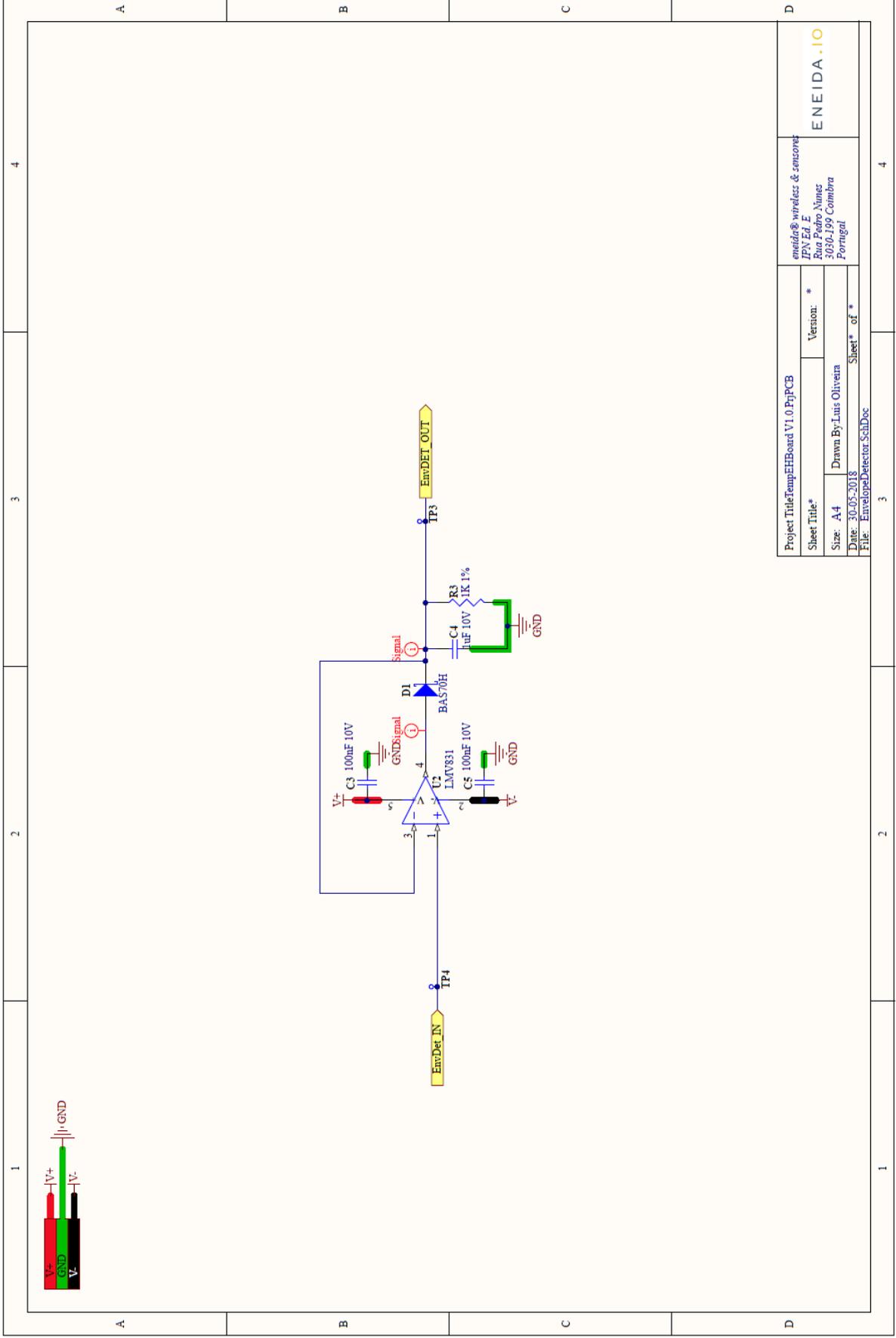
Anexo 2: Lista de materiais (BOM) da Placa de Sensores de Temperatura

Comment	Description	Designator	Footprint	Lib Ref	Manufacturer	Manufacturer Part Number	Quantity	Supplier 1	Supplier 2	Supplier Part Number 1	Supplier Part Number 2
100nF 10V	Capacitor	C1, C2, C3	CAPC1608X55N EIA0603	Cap			3				
2.54 mm, THT, Angled, 8 pin	Pin Header WR-PH-11		61300821021	6130082	Würth Electronics	61300821021	1	Farnell	Mouser	2356196	710-61300821021
ADT731WTRZ	Automotive, ±0.5°C	U1, U2, U3	SOIC127P60X175-8N	ADT7311	Analog Devices	ADT7311WTRZ	3	Farnell	Mouser	2672039	584-ADT7311WTRZ

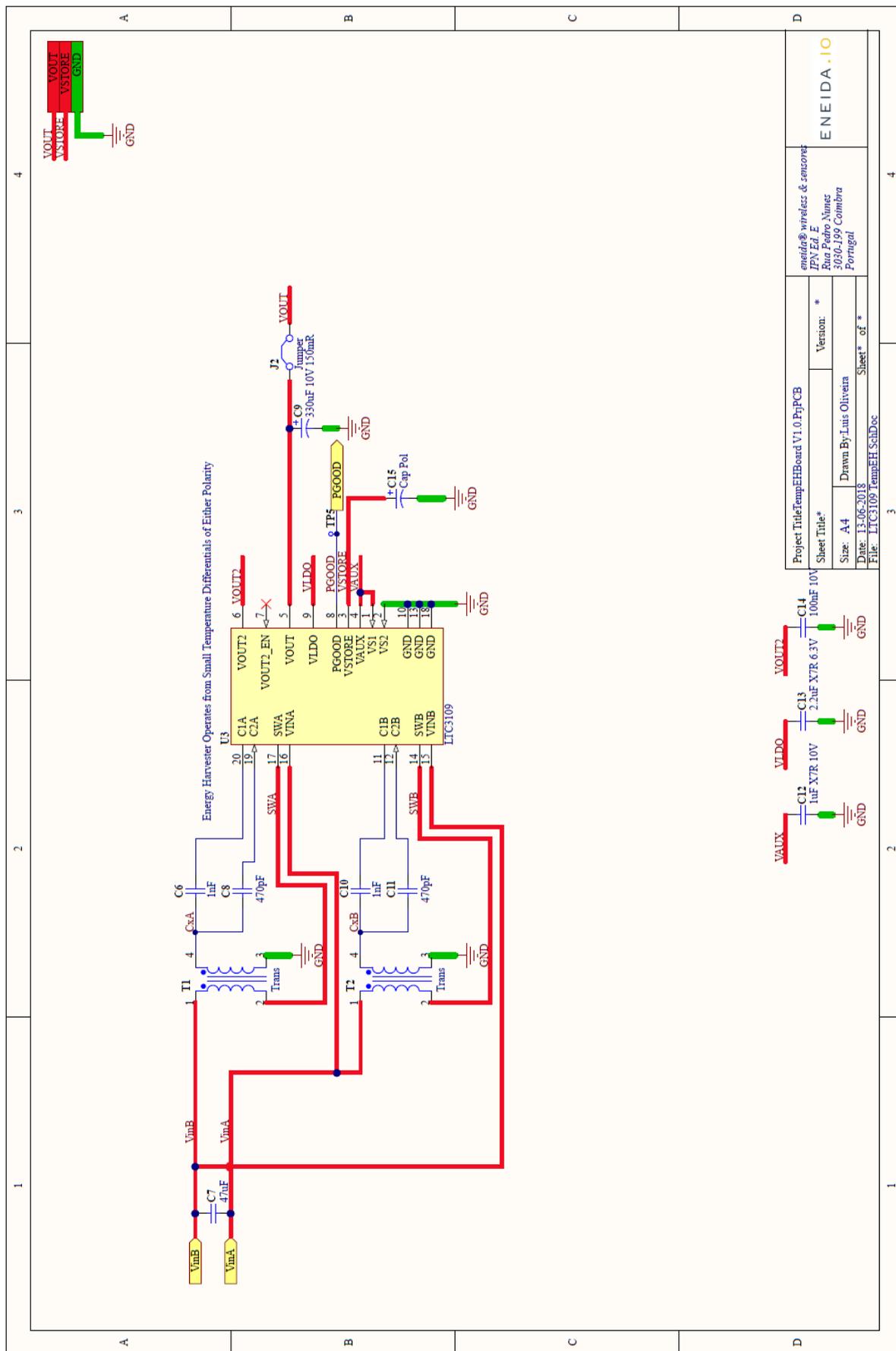
Anexo 3: Esquemas Eléctricos da Placa Vertical



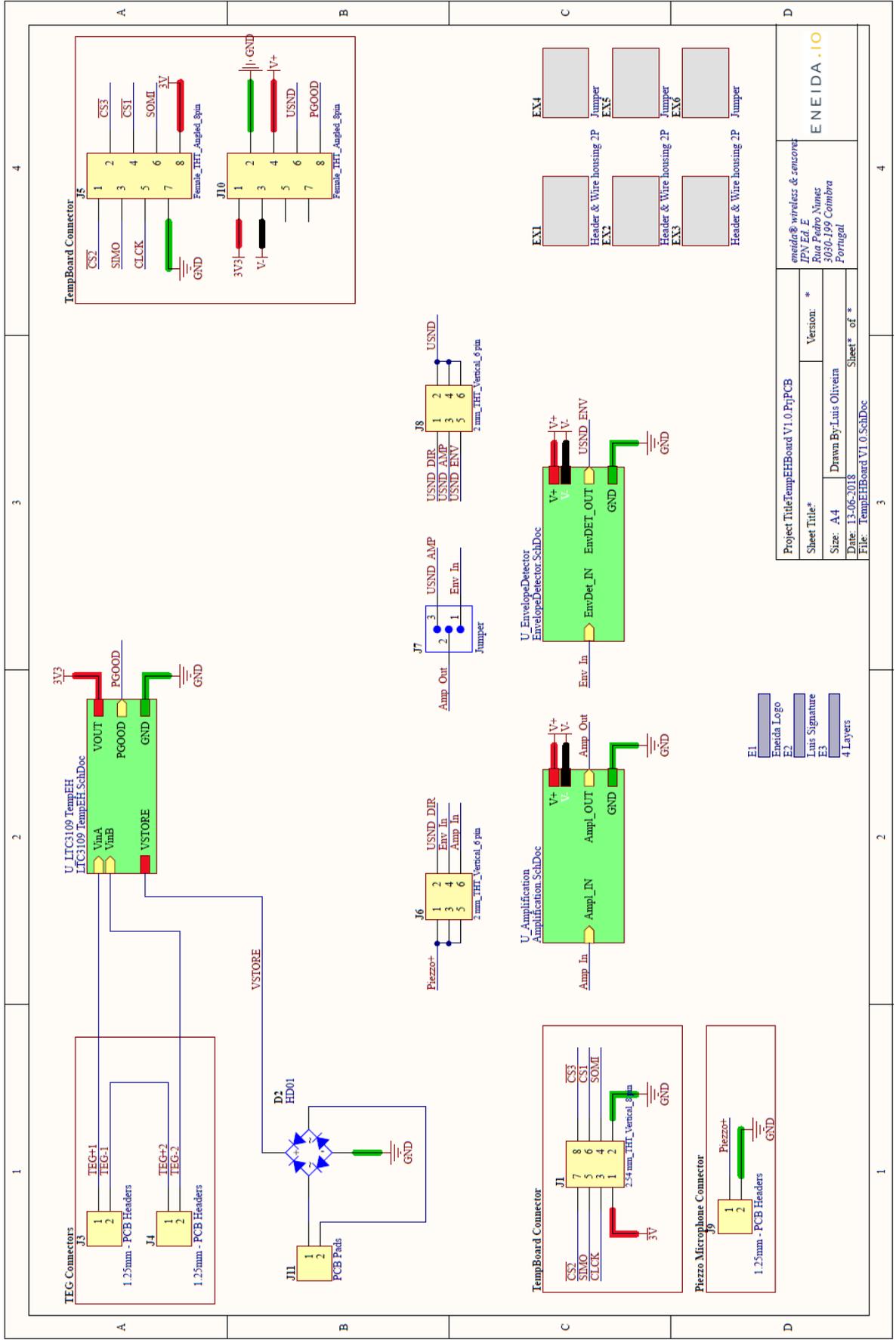
Project Title: TempEEBoard V1.0 PjtPCB		eneida@wireless & sensors	
Sheet Title: *		IPN, Ed. E	
Size: A4		Rua Psadro Nunes	
Date: 30-05-2018		3030-199 Coimbra	
File: Amplification SchDoc		Portugal	
Version: *		ENEIDA .IO	
Drawn By: Luis Oliveira			
Sheet* of *			



Project Title: TempEHBoard V1.0 PnpPCB		eneida@wireless & sensors	
Sheet Title*	Version: *	FPN, F.E. y Rosa P. de 3030, 199 Coimbra Portugal	
Size: A4	Drawn By: Luis Oliveira		
Date: 30.05.2018	File: EnvelopeDetector_SchDoc	Sheet* of *	



Project Title: TempEHBoard V1.0 PjPCB		eneida@wireless & sensors	
Sheet Title*		IPN Ed. E	
Size: A4	Drawn By: Luis Oliveira	Rua Pedro Nunes 3030-199 Coimbra Portugal	
Date: 13-06-2018	Version: *	ENEIDA .IO	
File: LTC3109 TempEH SchDoc	Sheet* of *		



Project Title: TempEHBoard V1.0 PnpPCB	
Sheet Title:	eneida@ynefless & sensors
Size:	IPV Ed. F
Date:	Rua Pedro Nunes
File:	3030-199 Coimbra
	Portugal
Version:	*
Drawn By:	Luis Oliveira
Sheet # of #	

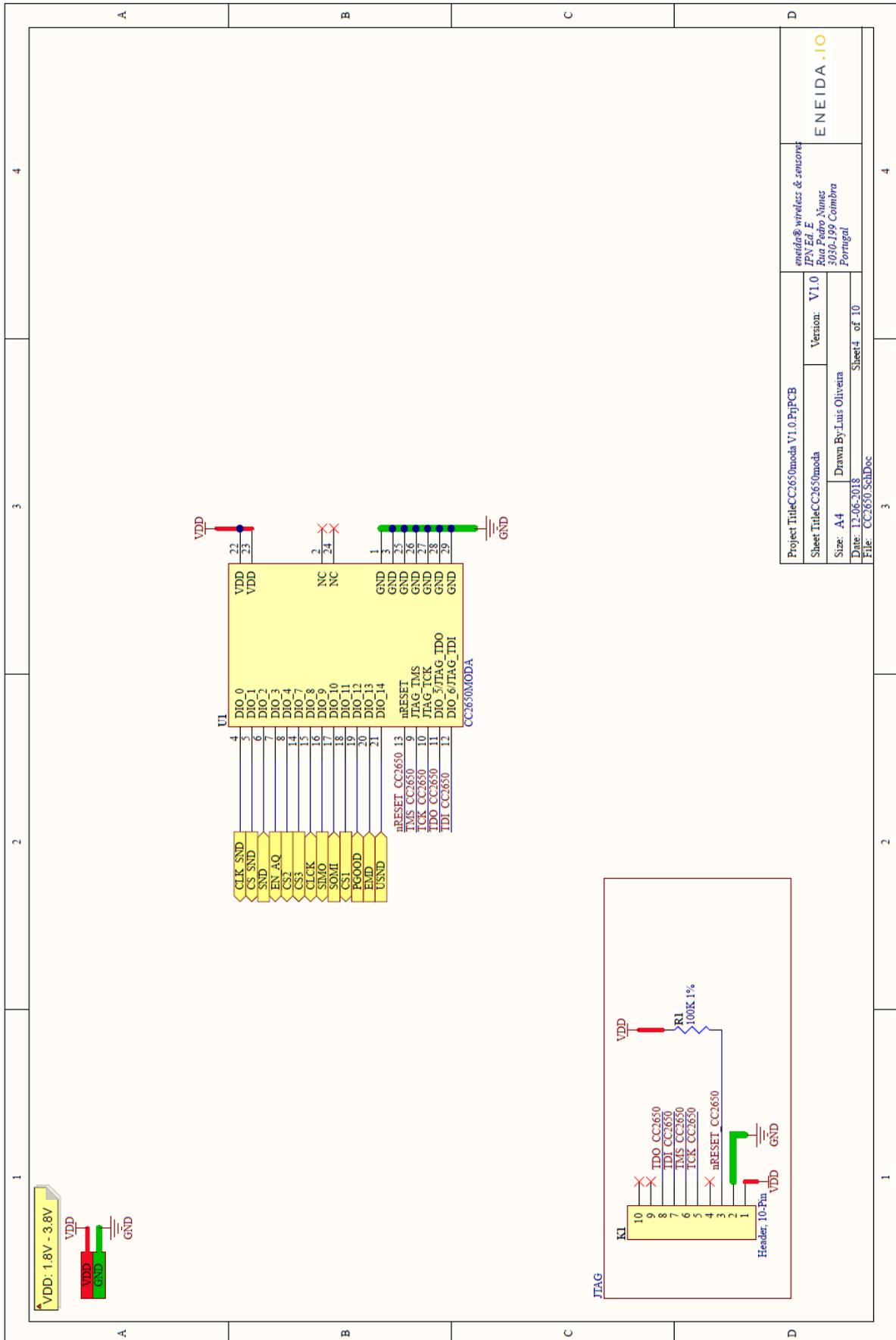
- E1 Enxada Logo
- E2 Enxada Logo
- E3 Luis Signature
- E4 4 Layers

ENEIDA . IO

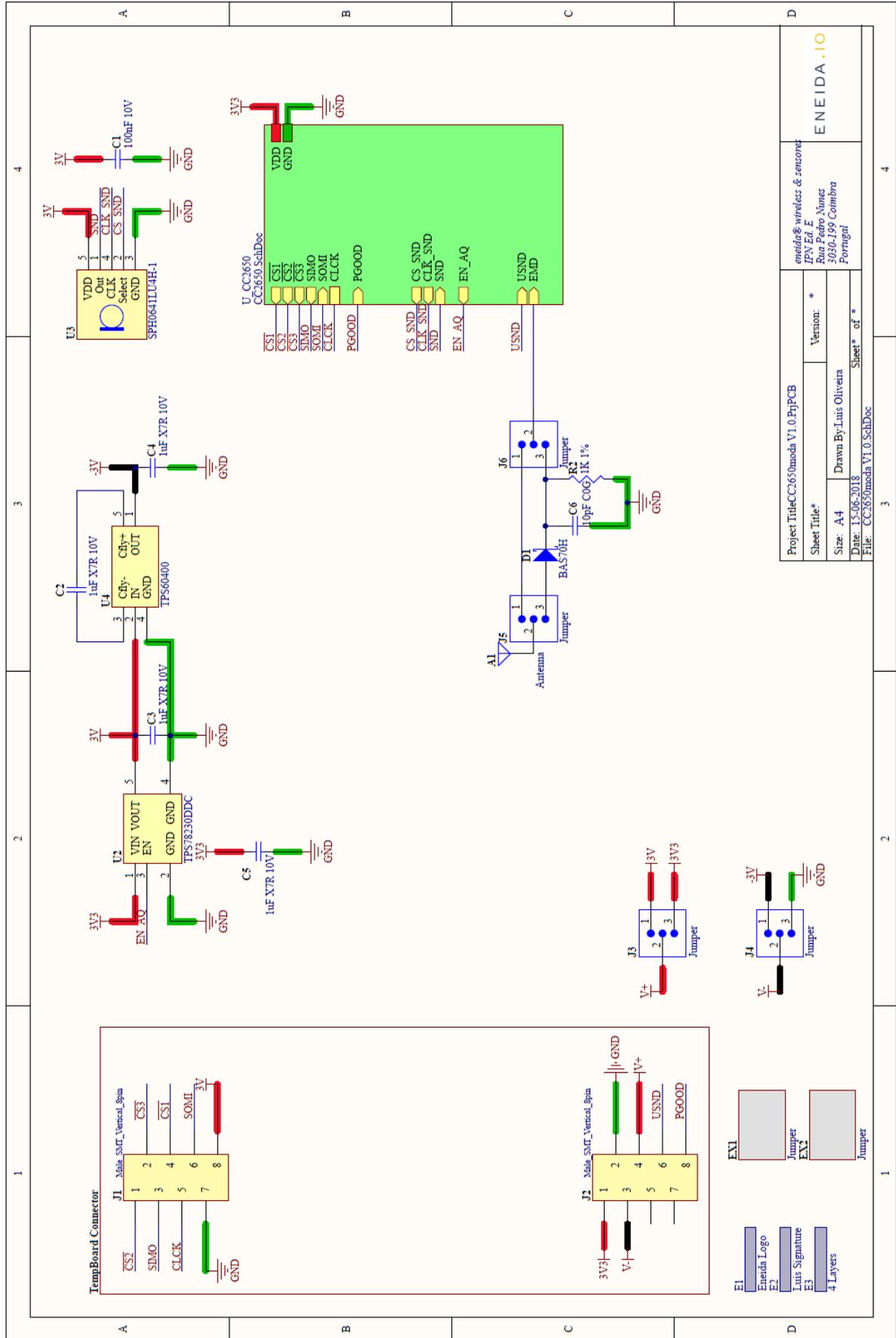
Anexo 4: Lista de materiais (BOM) da Placa Vertical

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Manufacturer	Manufacturer Part Number	Quantity	Supplier 1	Supplier 2	Supplier Part Number 1	Supplier Part Number 2
100nF 10V	Capacitor	C1, C2, C3, C5, C14	CAPC1608X55N EIA0603	Cap			5				
1uF 10V	Capacitor	C4	CAPC1608X55N EIA0603	Cap			1				
1nF	Capacitor	C6, C10	CAPC1608X55N EIA0603	Cap			2				
47uF	Capacitor	C7	CAPC3225X200N EIA1210	Cap			1				
470pF	Capacitor	C8, C11	CAPC1608X55N EIA0603	Cap			2				
330uF 10V 150mR	Polarized Capacitor	C9	CAPMP734-3X31N D	Cap Pol	KEMET	T495D337K010ATE150	1	Mouser		80-T495D337K010ATE150	
1uF X7R 10V	Capacitor	C12	CAPC2012X90N EIA0805	Cap	Wurth Electronics	885012207078	1	Mouser		710-885012207078	
2.2uF X7R 6.3V	Capacitor	C13	CAPC2012X90N EIA0805	Cap			1				
220mf	Polarized Capacitor	C15	CAP.Multi_14.5X12X5.08	Cap Pol	KEMET	FT0H224ZF	1	Farnell	Mouser	2708921	80-FT0H224ZF
BAS70H	Schottky Diode	D1	SOD-123	DIODE_S	NEXPERIA	BAS70H,115	1	Farnell	Mouser	1757750	771-BAS70H-T/R
HD01	BRIDGE RECTIFIER	D2	HDxx	HD01	Diodes Incorporated	HD01-T	1	Farnell	Mouser	1858614	621-HD01-T
Header & Wire housing 2P	Extra Comp.	EX1, EX2, EX3		Extra Co	Molex	51021-0200	3	Mouser	Farnell	538-51021-0200	889477
Jumper Cover 2mm	Extra Comp.	EX4, EX5, EX6		Extra Co	Wurth Electronics	60800213421	3	Mouser		710-60800213421	
Switch Jumper	Jumper Wire	J2	Switch_jumper_2	Jumper	ITW Pancon	JS44-1-G0	1	Farnell		2292958	
1.25mm - PCB Headers	Header, 2-Pin	J3, J4, J9	1.25MM2P	Header	Molex	53047-0210	3	Mouser	Farnell	538-53047-0210	9733051
Female_TH_T_Angled_8pin	MiniModule Connector	J5, J10	690368180872	69036818			2				
2 mm_TH_Vertical 6 pin	Pin Header WR-PH	J6, J8	62000621121	6130062	Wurth Electronics	61300621121	2	Farnell	Mouser	2356131	710-61300621121
Pin 1x3 2mm		J7	62000311121	JUMPER 3M		951103-8622-AR	1	Farnell	Mouser	1907806	517-951103-8622-AR
10K 1%	Resistencias	R1, R2	RESC1608X55N EIA0603	RES			2				
1K 1%	Resistencias	R3	RESC1608X55N EIA0603	RES			1				
Trans	Transformer	T1, T2	WE-EHPI_5838	Trans Eq	Wurth Electronics	74488540070	2	Mouser	Farnell	710-74488540070	2249879
AMP-OPA-LMV551-5		U1, U2	SOT6P210X110-5N SC-70 5	SYM-001	Texas Instruments	LMV831MG/NOPB	2	Mouser	Farnell	926-LMV831MG/NOPB	2496283
LT-1TC3109-UF-20		U3	SOP63P600X175-20N	SYM-012			1				

Anexo 5: Esquemas Elétricos da Placa Horizontal Superior



Project Title: CC2650m0da V1.0.PjPCB		eneida@wiresless & sensors	
Sheet Title: CC2650m0da	Version: V1.0	ENEIDA.IO	
Date: 12/06/2018	Drawn By: Lus Oliveira	Rua Paulo Nunes 3090-199 Coimbra Portugal	
File: CC2650_SchDoc	Sheet 4 of 10		



Project Title: CC2650mmoda V1.0.PnpPCB		eneida@wireless & sensors	
Sheet Title: *		JPV Ed. E	
Size: A4		Rua Pedro Nunes	
Date: 13-06-2018		5050-199 Coimbra	
File: CC2650mmoda V1.0.SchDoc		Portugal	
Version: *	Sheet* of *	ENEIDA .IO	

- E1
- E2 Eneida Logo
- E3 Luis Signature
- E4 4 Layers
- J1 Jumper
- J2 Jumper
- J3 Jumper
- J4 Jumper
- J5 Jumper
- J6 Jumper

Anexo 6: Lista de materiais (BOM) da Placa Horizontal Superior

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Manufacturer	Manufacturer Part Number	Quantity	Supplier 1	Supplier 2	Supplier Part Number 1	Supplier Part Number 2
Antenna	Generic Antenna	A1	ANTC5050X130N	Antenna	Johanson	0433AT62A0020E	1	Farnell	Mouser	2148530	609-0433AT62A0020E
100nF 10V	Capacitor	C1	CAPC3216X140L EIA1206	Cap			1				
1uF X7R 10V	Capacitor	C2, C3, C4, C5	CAPC2012X90N EIA0805	Cap			4				
10pF COG	Capacitor	C6	CAPC1608X55N EIA0603	Cap			1				
BAS70H	Schottky Diode	D1	SOD-123	DIODE SCHOTTKY	SIEXPERIA	BAS70H,115	1	Farnell	Mouser	1757750	771-BAS70H-T/R
Jumper Cover 2mm	Extra Comp.	EX1, EX2		Extra Co	Würth Electronics	60800213421	2	Mouser		710-60800213421	
Male SMT_Verical_8pin	MiniModule Come	J1, J2	690357280876	temp	Würth Electronics	690357280876	2	Farnell	Mouser	2827989	710-690357280876
Pin 1x3 2mm	Header, 10-Pin	J3, J4, J5, J6	62000311121	JUMPER 3M		951103-8622-AR	4	Farnell	Mouser	1907806	517-951103-8622-AR
Header, 10-Pin	Header, 10-Pin	K1	1.27MM 2X5M (1.27) SMD	Header	WURTH ELEKTRONIK	82101021021	1	Farnell	Mouser	1022310	855-M50-3600342
100K 1%	Resistências	R1	RESC1608X55N EIA0603	RES			1				
1K 1%	Resistências	R2	RESC1608X55N EIA0603	RES			1				
CC2650MODA		U1	CC2650MODA	CC2650M	Texas Instruments	CC2650MODAM0HR	1	Farnell	Mouser	2664483	595-CC2650MODAM0HF
TPS78230DDC	150-mA, Ultra-Low	U2	SOT95P280X145-5N SOT23-5	TPS7823	Texas Instruments	TPS78230DDDCR	1	Mouser		595-TPS78230DDDCR	
SPH0641LU4H-1	Microphone With N	U3	SPH0641LU4H-1	SPH0641	KNOWLES ACOUSTICS	SPU0410LRSH	1	Newark		79R7389	
TPS60400	Unregulated 60mA	U4	SOT95P280X145-5N SOT23-5	TPS6040	Texas Instruments	TPS60400DBVR	1	Farnell	Mouser	2342563	595-TPS60400DBVR