



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Jorge Alexandre Mateus Ribeiro

INTEGRAÇÃO SENSORIAL E DIAGNÓSTICO DE POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Física, no ramo de Instrumentação,
orientada pelo Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso
e pelo Professor Doutor José Paulo Pires Domingues,
apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra.

Julho de 2019

Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

Integração Sensorial e Diagnóstico de Postos de Transformação em Redes de Distribuição de Eletricidade

Jorge Alexandre Mateus Ribeiro

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Física, no ramo de
Instrumentação, orientada pelo Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso
e pelo Professor Doutor José Paulo Pires Domingues

Julho de 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Resumo

Este trabalho destina-se a conceber a unidade concentradora de dados (UCD), que recebe informação de vários sensores inteligentes e realiza a respetiva fusão sensorial para obtenção de um diagnóstico de funcionamento de um posto de transformação (PT). Em particular, vigia os transformadores aí existentes visando a respetiva gestão de ativos. Existindo previamente alguns sensores inteligentes, foi também desenvolvida uma unidade de medida de temperatura ambiente e humidade relativa (UTH) para aplicação em PT (interior e exterior).

É discutida a estrutura do sistema de monitorização e diagnóstico de um PT; em particular são discutidas tecnologias de comunicação de curto e longo alcance para integrar o sistema, nomeadamente: Bluetooth Low Energy (BLE), SigFox, Lora, NarrowBand-IoT e tecnologias de comunicação móvel.

É também discutido o conjunto de regras baseadas nos dados obtidos pelos diferentes sensores e, a informação decorrente desta “fusão” incorpora mensagens periódicas de relatório bem como mensagens representando alertas e alarmes. É descrito o protótipo que serviu de base à prova de conceito de integração de sistemas.

Palavras-chave: IoT; Monitorização; Posto de Transformação; *Edge Computing*; BLE; Sensor Inteligente

Abstract

This work aims at the designing of a data concentrator unit (UCD), which receives information from several smart sensors and performs the sensorial fusion to obtain a status diagnosis of a secondary distribution substation (SDS). In particular, it watches over the transformers for asset management. An unit that measure ambient temperature and relative humidity (UTH) was also developed for SDS application (indoors and outdoors).

The structure of the monitoring and diagnosis system of a SDS is discussed; in particular, short and long-range communication technologies were discussed to integrate the system, namely: Bluetooth Low Energy (BLE), SigFox, Lora, NarrowBand-IoT and mobile communication technologies.

Constituting the most importante issue in the scope of this work, this essay discusses the set of rules based on the data obtained by the different sensors and the information resulting from this "fusion" incorporates periodic reporting messages as well as messages representing alerts and alarms. It is described the prototype that served as the basis for proof of concept of systems integration.

Keywords: IoT; Monitoring; Secondary Distribution Substations; *Edge Computing*; BLE; Smart Sensor

Agradecimentos

Começo por agradecer ao professor Francisco Cardoso e à Engenheira Joana Faria por toda a sabedoria e disponibilidade que transmitiram com o intuito de contribuir não só para o desenvolvimento deste projeto mas também da minha cultura tecnológica e industrial. Agradeço também ao professor José Domingues todo o apoio na concretização deste projeto.

À minha família e amigos, em especial aos meus pais, à minha namorada e ao médico Manuel Leite, agradeço o apoio incondicional não só neste projeto mas também em todas as etapas da minha vida.

Deixo também um agradecimento à Eneida pela contribuição no desenvolvimento deste projeto, em especial aos colaboradores Engenheiro Luís Oliveira e Engenheiro Alexandre Aparício.

A todos, muito obrigado.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Abreviaturas.....	xvii
Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.1.1 Novos Conceitos de Gestão Industrial	1
1.1.2 Caso de Estudo: Distribuição de Energia Elétrica	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura do documento	5
Capítulo 2: Digitalização da Produção Industrial: Indústria 4.0.....	7
2.1 Indústria 4.0	7
2.1.1 Enterprise Resource Planning.....	8
2.1.2 Manufacturing Execution System.....	9
2.1.3 Gestão de Ativos.....	9
2.2 Industrial Internet of Things	11
2.2.1 Modelos de Referência da Arquitetura IloT	12
2.3 Sistemas de Monitorização de Postos de Transformação	14
2.3.1 Transformador de Distribuição	14
2.3.2 Monitorização do estado técnico de funcionamento do Transformador de Distribuição.....	16
2.3.3 Estado da arte - Sistemas de Monitorização de Transformadores de Distribuição.....	19
2.4 Definição do projeto.....	23
2.5 Especificação Funcional.....	24

Capítulo 3: Arquitetura do Sistema	27
3.1 Partição funcional.....	27
3.2 Comunicação	29
3.2.1 Comunicação Interna.....	31
3.2.2 Comunicação Externa.....	33
3.2.2.1 Rede LPWAN	33
3.2.2.2 Redes de comunicação móvel.....	36
Capítulo 4: Unidade de Temperatura e Humidade Relativa	41
4.1 Descrição do Hardware	41
4.1.1 Funcionamento da unidade.....	42
4.1.2 Módulo de Processamento e Comunicação	43
4.1.3 Sensor de Temperatura e Humidade Relativa.....	44
4.1.4 Bateria e Regulador de Tensão	46
4.1.4.1 Consumo Total	46
4.1.4.2 Bateria e Regulador de Tensão	48
4.2 Custo de Produção.....	49
4.3 Fase de Testes.....	50
4.3.1 Primeira Fase de Testes	50
4.3.2 Segunda fase de Testes	53
Capítulo 5: Unidade Concentradora de Dados.....	57
5.1 Tecnologia de comunicação	57
5.2 Algoritmo de fusão e análise de dados	59
5.2.1 Fusão Sensorial.....	59
5.2.2 Análise de Dados.....	64
Capítulo 6: Conclusão.....	67
Referências	69
Anexos.....	74
Anexo I: Esquema da placa da Unidade de temperatura e humidade	75
Anexo II: Diagrama de blocos do módulo CC2650MODA.....	76

Anexo III: Classe Fusão Sensorial	77
Anexo IV: Classe Análise de Dados	78
Anexo V: Programa principal (main).....	80

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Representação das diferentes atividades necessárias para o fornecimento de energia elétrica [8].	3
Figura 2.1 - Ilustração das diferentes fases do ciclo de vida de um ativo [19].	10
Figura 2.2 - Esquema de um sistema IIoT baseado numa arquitetura de três camadas [22].	13
Figura 2.3 - Esquema que representa um sistema IIoT baseado na arquitetura <i>edge gateway</i> [22].	13
Figura 2.4 - Estrutura base de um transformador de distribuição [24].	15
Figura 2.5 - Representação dos vários tipos de falhas ao longo do tempo de vida de um ativo, neste caso concreto, de um transformador de distribuição. Esta curva também é conhecida por curva da banheira [26].	16
Figura 2.6 - Esquema que apresenta a importância de vários materiais e características para estimar o estado de saúde do transformador de distribuição [28].	18
Figura 2.7 – Esquema da estrutura de um Posto de Transformação cabinado [42]. ...	24
Figura 3.1 - Estrutura do sistema de monitorização de um PT. Legenda : UCD- Unidade Concentradora de Dados; UTHR – Unidade de Temperatura e Humidade Relativa; UM – Unidade Multisensorial; UTC – Unidade de Tensão e corrente; BLE – Bluetooth Low Energy; WWAN- Wireless Wide Area Network.....	27
Figura 3.2 - Representação do alcance de cada tipo de rede sem fios (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN) [47].....	30
Figura 3.3 - Representação da relação entre a largura de banda e o alcance para diferentes tecnologias de comunicação sem fios [48].	30
Figura 3.4 – Esquema da <i>stack</i> do protocolo <i>Bluetooth Low Energy</i> [50].....	31
Figura 3.5 - Representação da relação entre o alcance e o consumo energético para vários tipos de redes (WLAN, WPAN, LPWAN e Redes de comunicação móveis) [48].	34

Figura 3.6 - Representação das vantagens de cada tecnologia LPWAN (Sigfox, LoRaWan e NB-IoT) em termos de factores de interesse da IoT [46].	35
Figura 3.7 - Representação dos requisitos de uma tecnologia 5G [64].	38
Figura 3.8 - Representação da divisão de uma rede 5G em várias sub-redes direcionadas para diferentes aplicações [66].	39
Figura 4.1 – Representação da estrutura da Unidade de Temperatura e Humidade Relativa. Na figura da direita é possível observar a Unidade num perfil lateral. Na figura da esquerda é possível observar a Unidade vista do topo e sem tampa. A placa foi realizada no sistema eletrónico CAD da Eneida. Legenda da placa: U3 – Sensor de humidade e temperatura; U1 – Módulo de processamento e comunicação; J1 – Jumper; U2 – Regulador de tensão; K1 – Adaptador Jtag	41
Figura 4.2 - Esquema da placa de circuito impresso. A pilha é o único elemento que fica na parte inferior da placa	42
Figura 4.3 - Esquema que representa o funcionamento da UTH.....	43
Figura 4.4 - Representação da montagem do sensor HDC2080 à esquerda e do sensor HDC2010 à direita. Na imagem da esquerda é possível observar a janela representada a amarelo [73].....	45
Figura 4.5 - Representação do esquema de montagem do sensor na placa de circuito impresso tendo em conta a posição relativa do sensor com as aberturas na caixa [73].	46
Figura 4.6 - Protótipo com o sensor montado na placa e o kit de desenvolvimento Launchxl – CC2650. Legenda: 1 – Sensor montado na placa; 2 – Kit de desenvolvimento	51
Figura 4.7 - Imagem onde é possível observar a atividade da unidade.....	52
Figura 4.8 – Representação da ligação necessária para implementar o código na UTH. A seta cinzenta indica os pinos onde é necessário remover os <i>jumpers</i> . Nesta imagem os <i>jumpers</i> já foram removidos	53
Figura 4.9 – Resultado do teste de ligação.	54
Figura 4.10 – Gráfico de temperatura ao longo de um dia.	54

Figura 4.11 - Gráfico da humidade relativa ao longo de um dia.	55
Figura 4.12 - Imagem representativa da posição da unidade durante o teste realizado. É importante referir que o cabo não foi retirado porque é frágil e, numa fase de testes, não é aconselhado retirar o cabo uma vez que há a necessidade de o utilizar várias vezes.	55
Figura 5.1 - Esquema do sistema utilizado para realizar a prova de conceito no que diz respeito à comunicação do sistema	59
Figura 5.2 – Gráficos apresentados na aplicação IoT Central da plataforma Microsoft Azure	59
Figura 5.3 – Os modelos que o programa genético selecionou. A negrito encontram-se as quatro soluções que possivelmente descrevem melhor a HST [86]......	62

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Tabela que apresenta a percentagem de falhas num Transformador de Distribuição e, a respetiva causa [27]	17
Tabela 2.2 – Representação das possíveis causas para cada falha que pode surgir num transformador de distribuição [28].....	17
Tabela 2.3 - Comparação das características de produtos comercializados	23
Tabela 3.1 - Tabela que compara várias características das diferentes tecnologias LPWAN (Sigfox, LoRaWan e NB-IoT) [46].	36
Tabela 4.1 - Lista de sensores com várias características dos mesmos	44
Tabela 4.2 - Apresentação da estimativa dos consumos diários do sensor HDC2080 e do módulo CC2650MODA e dos consumos diário e durante 10 anos da Unidade.....	48
Tabela 4.3 - Lista de baterias com várias características das mesmas	49
Tabela 4.4 - Apresentação da estimativa do custo de produção da Unidade de temperatura de humidade relativa e dos respetivos componentes da mesma	50
Tabela 5.1 - Lista de variáveis medidas pelas várias unidades sensoriais distribuídas pelo Posto de Transformação	60

Abreviaturas

Lista de Abreviaturas

1G	Primeira Geração de comunicações móveis
2G	Segunda Geração de comunicações móveis
3G	Terceira Geração de comunicações móveis
3GP	<i>The 3rd Generation Partnership</i>
3GPP	<i>The 3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração de comunicações móveis
5G	Quinta Geração de comunicações móveis
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CCS	Code Composer Studio
CPS	Sistemas Ciberfísicos
DTM	<i>Distribution Transformer Monitor</i>
EDGE	<i>Enhanced Data-rate for GSM Evolution</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
GAP	Perfil de Acesso Genérico
GATT	Perfil Genérico de Atributos
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HST	Temperature do ponto quente
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>

IPv6	Versão 6 do Protocolo de Internet
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
LC	Capacidade de Carga
LOL	Loss of Life
LPWAN	<i>Low Power wide Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long term Evolution-Advanced</i>
LTE-M	<i>Long Term Evolution for Machines</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
MIMO	<i>Multiple-input multiple-output</i>
NB-IoT	<i>Narrowband-IoT</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PT	Posto de Transformação
SCS	Sensor Controller Studio
SIG	<i>Bluetooth Special Interest Group</i>
TAE	Temperatura ambiente no exterior do PT
TAI	Temperatura ambiente no interior do PT
TC	Temperatura na parte superior da tampa do TD
TD	Transformador de Distribuição
TI	Texas Instruments
TOT	Temperatura do óleo no topo do TD
TP	Transformador de Potência
UCD	Unidade concentradora de dados

UTH	Unidade de temperatura e humidade relativa
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WNAN	<i>Wireless Neighborhood Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless wide Area Network</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

1.1.1 Novos Conceitos de Gestão Industrial

A digitalização industrial teve início na terceira revolução industrial [1] com a introdução dos *Programmable Logic Controller* (PLC) para controlar e automatizar as linhas de produção industriais. No entanto, na altura não era explorado todo o potencial computacional dos PLC, uma vez que este dispositivo era visto como uma cadeia de relés. Com o desenvolvimento da cultura tecnológica no setor da indústria e os próprios avanços tecnológicos nas últimas décadas, a digitalização no setor industrial evoluiu significativamente e revolucionou o setor. Segundo a *Gartner* [2], a digitalização consiste na utilização de tecnologias de informação para alterar o modelo de negócio das empresas, providenciando novas receitas e oportunidades de criação de valor, preparando as mesmas para um futuro com tecnologia que permite: interoperabilidade, transparência da informação, descentralização da tomada de decisões e assistência automatizada.

Muitas empresas, percebendo o valor da digitalização industrial, aderiram à tendência, com o objetivo de automatizar e agilizar todos os processos industriais, desde a produção até à administração. De acordo com uma pesquisa da *Gartner* [3], onde inquiriu milhares de empresas de 15 setores diferentes, 47% dos *CEO's* foram desafiados pelo conselho administrativo a aderir à digitalização industrial. Dos inquiridos que já aderiram à transformação digital, 56 % afirmou que já obtiveram um aumento no lucro. A digitalização é a base para a quarta revolução industrial.

A quarta revolução industrial [4], que decorre na presente época, propõe um novo conceito de indústria: a Indústria 4.0. Com base na digitalização, a Indústria 4.0, introduz novas formas de gestão numa empresa ao implementar sistemas de informação inovadores como os Sistemas Ciberfísicos (CPS) e sistemas de informação melhorados, pelas novas tecnologias, como o *Manufacturing Execution System* (MES) e o *Enterprise Resource Planning* (ERP). Um sistema ciberfísico consiste na integração de tecnologias de informação, mais propriamente a computação, nos processos físicos. Os computadores e redes de sensores sem fios vão monitorizar e controlar um processo físico ou uma máquina da produção, recolhendo dados que vão ser analisados pelo MES, o sistema responsável por gerir e controlar, em tempo real, todas as atividades relacionadas com a produção. Todo este processo é controlado por um sistema de hierarquia superior, o ERP, que é um sistema de gestão empresarial que permite conectar e gerir todos os departamentos e os respetivos processos de uma empresa, como por exemplo, gerir a partilha e o armazenamento de grandes volumes de informações e gerir os ativos da empresa.

A aplicação de sistemas de informação como o MES e o ERP aumenta a rapidez e a eficiência da produção [5], possibilitando uma maior quantidade e qualidade de produtos a um custo reduzido. As novas formas de gestão introduzidas pela indústria 4.0 podem provocar uma nova dinâmica na empresa, dando oportunidade a que o modelo de negócio possa ser repensado, assim como as interações com fornecedores, vendedores e consumidores. A Indústria 4.0 é uma revolução de gestão suportada por nove tecnologias que tiveram avanços significativos nos últimos anos, são elas: a *Industrial Internet of Things* (IIoT); a simulação; os sistemas integrados verticais e horizontais; a cibersegurança; a nuvem; a realidade aumentada; análise de grandes quantidades de dados; robôs autónomos e a fabricação aditiva [6].

Um tópico da Indústria 4.0 que é importante explorar no âmbito desta dissertação é a gestão de ativos. Este tipo de gestão permite planejar, controlar, ajustar e prolongar, de forma eficaz e eficiente, o ciclo de vida de um ativo de uma empresa, explorando todo o potencial da IIoT, nome atribuído à *Internet of Things* (IoT) quando aplicada no setor industrial. A gestão de ativos é indispensável quando um número elevado de ativos estão dispersos geograficamente. Nesta dissertação este tópico da Indústria 4.0 vai ser aplicado no sector de distribuição de energia elétrica.

1.1.2 Caso de Estudo: Distribuição de Energia Elétrica

A energia elétrica é uma das energias mais utilizadas no mundo, uma das razões para este facto é a facilidade de transporte e distribuição da mesma. Esta energia é produzida em centrais nucleares, centrais hidroelétricas ou barragens, centrais termoelétricas, parques eólicos e parques fotovoltaicos. Após ser produzida, a energia é transportada através de linhas de muito alta tensão para estações principais. Após a energia chegar a estas estações, a tensão elétrica é reduzida, através de transformadores de potência (TP), e distribuída por linhas de alta tensão. As linhas de alta tensão conduzem a energia elétrica para subestações, e em alguns casos alimentam diretamente grandes empresas. Nas subestações a tensão elétrica é novamente reduzida e distribuída através de linhas de média tensão para postos de transformação (PT) e, em alguns casos a energia elétrica é diretamente distribuída para médias empresas. Nos PT a tensão elétrica é novamente reduzida através de um transformador de distribuição (TD) e distribuída para os consumidores finais [7]. Na figura 1.1 estão representadas as várias etapas do percurso da energia elétrica até chegar ao consumidor final.

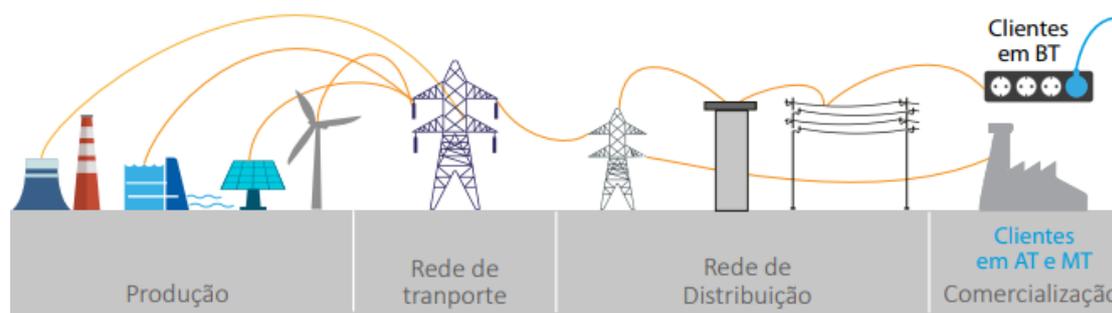


Figura 1.1 - Representação das diferentes atividades necessárias para o fornecimento de energia elétrica [8].

Os transformadores são instrumentos fundamentais da rede de distribuição elétrica, a falha dos mesmos traduz-se em cortes de eletricidade em certas regiões e, conseqüentemente, em perdas monetárias para a empresa responsável pela distribuição de eletricidade, não só, pela coima associada ao corte de eletricidade mas, também pela substituição ou reparação do transformador. Assim, a gestão de ativos dos vários transformadores ao longo da rede é essencial para prever e antecipar falhas ou avarias. Para TP a gestão de ativos já é realizada e foi amplamente estudada devido ao custo elevado deste tipo de transformadores (na ordem de um milhão de euros) e à importância que este tem numa rede pois, em caso de falha, a região que sofre um corte de eletricidade é bastante grande podendo mesmo ser uma cidade inteira. A gestão de

ativos para TD tem sido desprezada devido à insignificância deste transformador quando comparado com um TP, uma vez que, é muito mais barato (na ordem dos milhares de euros) e em caso de falha, a região que sofre um corte de eletricidade é muito pequena.

1.2 Objetivos

Só em Portugal existiam, em 2015, 67 063 PT [9] podendo, portanto, considerar-se a monitorização dos TD relevante para reduzir os custos de manutenção e também o número de cortes de eletricidade, aumentando a qualidade do serviço prestado. Assim, esta dissertação surge no âmbito de um projeto realizado em conjunto pelo LIBPhys-UC e a Eneida - Wireless & Sensors, tendo como objetivo implementar um sistema de monitorização em tempo real para TD em PT, permitindo fazer o diagnóstico dos mesmos e, assim, saber o estado de saúde da máquina. O sistema vai ser composto por uma unidade concentradora de dados, uma unidade que mede tensões e correntes que saem do TD, um multisensor responsável por determinar em que regime está a funcionar o TD e duas unidades de medição de temperatura ambiente e humidade relativa, uma no interior e outra no exterior do PT. As unidades sensoriais vão gerar dados e enviar os mesmos para a unidade concentradora de dados através de um protocolo específico de comunicação. A unidade concentradora vai integrar os dados recebidos pelas várias unidades sensoriais e vai realizar o diagnóstico do TD e, posteriormente, enviar o resultado para uma plataforma online onde o mesmo é visualizado e armazenado.

Este projeto tem vindo a ser executado e, por isso, algumas unidades sensoriais já existem. A unidade de medição de tensão e corrente já foi realizada e aplicada. A unidade multisensor já foi projetada e está em fase de testes [10]. Assim sendo, o intuito desta dissertação é conceber a unidade concentradora de dados (UCD) e a unidade de medida de temperatura ambiente e humidade relativa (UTH).

1.3 Estrutura do documento

O documento encontra-se dividido em 6 capítulos:

1. Introdução: Neste capítulo é apresentada a motivação para abordar o tema, o objetivo da dissertação e a estrutura do documento
2. Digitalização da Produção Industrial: Indústria 4.0: É apresentada uma visão pessoal da Indústria 4.0 e do papel da gestão de ativos e da IoT na mesma. São apresentados os constituintes de um TD arrefecido a óleo bem como os fatores que caracterizam o estado de funcionamento do mesmo. Neste capítulo também está inserido o estado da arte de sistemas de monitorização de TD assim como os requisitos e as especificações do projeto.
3. Arquitetura de Sistema: Nesta secção é apresentada a arquitetura do sistema de monitorização e também são apresentadas várias tecnologias de comunicação.
4. Unidade de Temperatura e humidade: É apresentada a descrição do hardware que vai constituir a unidade e também a forma mais indicada de programar a unidade. No final deste capítulo vários testes são apresentados.
5. Unidade concentradora de Dados: Neste capítulo é apresentada uma discussão sobre qual a tecnologia de comunicação de longo alcance indicada para integrar a unidade concentradora de dados, seguida de uma prova de conceito relativa à comunicação da mesma. É também apresentado um algoritmo de fusão e análise de dados para integrar a unidade.
6. Conclusão: É apresentada a revisão do trabalho e uma proposta de trabalho futuro.

Capítulo 2

Digitalização da Produção Industrial: Indústria 4.0

2.1 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 pode revolucionar a gestão empresarial. A essência da Indústria 4.0 está nos dados, na informação que estes podem gerar e, conseqüentemente, como se pode gerir e melhorar toda a dinâmica de uma empresa com base na informação gerada.

Esta revolução começou com a digitalização da produção implementando os CPS, sistemas constituídos por ativos no setor da produção, maioritariamente máquinas, equipados com *software* embebido possuindo, assim, capacidade computacional. Através da capacidade computacional é possível conhecer exatamente o estado, a capacidade e as diferentes opções de configuração dos ativos e, no limite, tomar decisões autonomamente [11]. Todos os dados gerados pelos CPS são transmitidos para o MES através de uma rede de comunicação. O MES, o sistema responsável por gerir e controlar, em tempo real, todas as atividades relacionadas com a produção vai analisar esses dados e, em alguns casos, reordenar operações caso detete falhas ou anomalias. Todo este processo e os restantes processos de uma empresa são supervisionados pelo ERP, um sistema de hierarquia superior que também é responsável por realizar a gestão dos ativos [12]. Os Sistemas MES e ERP e o tópico gestão de ativos vão ser explorados com mais detalhe nas secções seguintes.

As novas formas de gestão introduzidas pela indústria 4.0 podem provocar uma nova dinâmica na empresa, dando oportunidade a que o modelo de negócio possa ser

repensado, assim como as interações com fornecedores, vendedores e consumidores. Para se beneficiar das vantagens da Indústria 4.0 é necessário integrar os vários sistemas de informação (CPS, MES, ERP) garantindo que são compatíveis e, planejar de forma consistente o fluxo de dados para se gerar informação com qualidade. A implementação, com sucesso, da Indústria 4.0 numa empresa pode permitir reduzir os custos da produção entre 10 a 30 %, os custos de logística entre 10 a 30 % e os custos de gestão de qualidade entre 10 a 20 % [4].

2.1.1 Enterprise Resource Planning

O ERP, que consiste num sistema de *software* de gestão empresarial, permite integrar todos os processos e funções de uma empresa para apresentar uma visão geral da dinâmica da empresa. Estes sistemas possuem uma estrutura modular e permitem a integração de informação de todos os departamentos da empresa através de uma base de dados partilhada [13]. O sistema ERP permite aumentar a eficiência e a eficácia de cada departamento da organização e da empresa como um todo.

Segundo a *Deloitte* [14], um desafio da Indústria 4.0 e dos sistemas ERP é inovar a gestão de dados, incluindo o seu armazenamento, a troca e o uso dos dados para maximizar o valor da informação contida nesses mesmos dados. Para inovar a gestão de dados é necessário: simplificar os modelos de dados dos sistemas ERP; partilhar, processar e distribuir o armazenamento de dados pelos diferentes sistemas (ERP, MES, CPS); diminuir o tempo de resposta de um sistema ERP a um pedido de dados; e por fim, os sistemas ERP devem relacionar os dados de diferentes departamentos de modo a criar novas informações e desencadear processos automáticos.

A implementação de um sistema ERP, com sucesso, ainda é um desafio para a maioria das empresas [15], uma vez que, muitas vezes não conseguem adaptar os sistemas ERP de acordo com as suas necessidades específicas. Para implementar um sistema ERP com sucesso é necessário planejar a estratégia de implementação do sistema, definir os requisitos fundamentais que o sistema deve possuir e definir um período de adaptação e treino não só para os colaboradores da empresa se ambientarem com o sistema ERP mas também para localizar e corrigir falhas ou erros no sistema.

2.1.2 Manufacturing Execution System

O MES é um sistema que permite: planejar todos os processos da produção de forma otimizada; suportar a tomada de decisões, relacionadas com a produção, com base na informação armazenada; documentar todos os processos da produção; monitorizar e gerir todos os processos da produção, a qualidade dos produtos e o inventário [16]. Todas estas tarefas devem ser realizadas em tempo real.

Uma função do MES que merece destaque, é o armazenamento e a análise dos dados provenientes dos CPS. Este sistema tem a capacidade de armazenar e analisar todos os dados dos processos relacionados com a produção o que permite detetar, em tempo real, falhas nos processos de produção e desvios do padrão de qualidade [17] o que torna a produção mais eficiente e melhora a qualidade do produto final.

Um dos objetivos da Indústria 4.0 é digitalizar a produção. O MES é um sistema crítico para esse objetivo, uma vez que é o sistema que gere toda a produção e permite a troca de informação, em tempo real, entre CPS para se tomarem as melhores decisões de forma rápida e, assim, tornar a produção mais eficaz, eficiente e automatizada.

2.1.3 Gestão de Ativos

De acordo com a norma ISO 5000 [18], a prática de gestão de ativos expressa os objetivos de uma empresa em decisões, planos e atividades relacionados com ativos, utilizando uma abordagem baseada na gestão de risco. Esta prática envolve uma gestão do equilíbrio entre custos, oportunidades, riscos e o desempenho desejado de um ativo, para atingir os objetivos da empresa. Este equilíbrio deve ser avaliado e revisto em períodos definidos pelas empresas, uma vez que os fatores condicionantes da decisão podem ser alterados.

A implementação da gestão dos ativos oferece vários benefícios a uma empresa. Dentro dos vários benefícios destacam-se: a otimização do desempenho financeiro, isto é, a otimização do retorno de um investimento num ativo; decisões mais acertadas no investimento em ativos, ou seja, a otimização no balanceamento entre custos, riscos, oportunidades e desempenho; gestão do risco, uma vez que um conhecimento mais profundo do ativo, devido à sua gestão, permite reduzir o risco das decisões; otimização do desempenho de serviços prestados ou produtos; otimização da eficiência e eficácia, isto é, a otimização do desempenho dos produtos e dos serviços traduz-se na

otimização dos processos o que resulta na otimização da eficácia e eficiência de uma empresa.

A gestão de ativos permite que uma empresa examine a necessidade e o desempenho de ativos. Além disso, ainda permite a aplicação de abordagens analíticas para a gestão de um ativo ao longo das diferentes fases do seu ciclo de vida [18].

Segundo a mesma norma, ISO 5000 [18], um ativo é algo que tem valor real ou potencial para uma empresa. O ciclo de vida de um ativo envolve um conjunto de processos que vai desde o planeamento até ao abate do respetivo ativo. Segundo *Robert Davis*, numa visão mais geral, o ciclo de vida de um ativo pode ser dividido em quatro fases, como é possível observar na figura 2.1: aquisição, comissionamento, operação e abate [19].

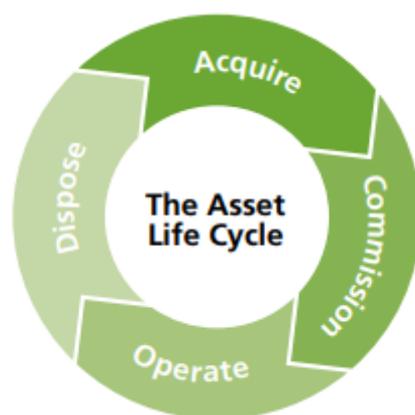


Figura 2.1 - Ilustração das diferentes fases do ciclo de vida de um ativo [19].

A fase de aquisição engloba o planeamento, o projeto e a própria aquisição do ativo. Esta fase é importante para garantir que o ativo adquirido é o adequado para atingir os objetivos pretendidos. A fase seguinte é a fase de comissionamento. Esta fase engloba a construção/criação e instalação de um ativo garantindo que o mesmo está funcional, isto é, garantindo que o ativo não foi danificado ou instalado incorretamente e que não falta nenhum recurso para garantir as funcionalidades para as quais foi projetado. A seguir à fase de comissionamento, vem a fase de operação. Esta é a fase mais longa do ciclo de vida de um ativo, durante a qual o ativo realiza as funções para as quais foi planeado e projetado. Durante esta fase do ciclo de vida, o ativo tem que ser sujeito a manutenção, tanto preditiva como preventiva monitorizando o estado de saúde do mesmo. Por vezes, nesta fase do ciclo de vida, alguns ativos sofrem modificações ou atualizações para se tornarem mais eficientes. Por último vem a fase

de abate, sendo esta a etapa final no ciclo de vida de um ativo. Quando os custos de operação e manutenção se tornam demasiado altos, é necessário planejar o abate do ativo e, conseqüentemente, a aquisição de um novo ativo. Todas estas fases do ciclo de vida de um ativo podem ser estruturadas e otimizadas através de um sistema de gestão de ativos.

Um sistema de gestão de ativos é usado para coordenar e controlar todos os processos de gestão de ativos. Um sistema de gestão de ativos fornece, a uma empresa, um conjunto de ferramentas para desenvolver, coordenar e controlar todos os processos do ciclo de vida de um ativo. O Sistema garante que os objetivos delineados para a gestão de ativos são alcançados de forma consistente. No caso da Indústria 4.0 as funções do sistema de gestão de ativos são garantidas pelo ERP.

2.2 Industrial Internet of Things

A IloT é um paradigma que permite formar uma rede de sensores, em larga escala, nas linhas de produção industriais para monitorizar os processos da produção e as máquinas que constituem as várias linhas de produção de uma fábrica, com o objetivo de obter dados das mesmas. A IloT, em última análise, é um elemento de ligação entre os CPS e o MES. Devido às suas características, a IloT é uma ferramenta essencial para a gestão de ativos.

A IloT permite aumentar o controlo operacional, reduzindo o tempo de inatividade não planeado das máquinas e, conseqüentemente, a maximização da rentabilidade e eficiência das mesmas. Segundo um estudo feito pela *Accenture*, a manutenção preventiva das máquinas feita com o apoio da IloT, gera uma poupança de 12% em encargos de manutenção programada, o que permite uma redução de 30% nos custos totais de manutenção e uma redução de 70% no tempo de inatividade de uma máquina [20].

2.2.1 Modelos de Referência da Arquitetura IIoT

Michael Wayrich e Christof Ebert enumeram em [21] vários requisitos que são necessários para elaborar um modelo que seja uma referência de uma arquitetura IIoT:

- Conectividade, que permite intercomunicação entre as unidades a fim de garantir os necessários fluxos de informação e, aquisição de dados, análise e atuação para extrair informação e conhecimento, de modo a melhorar os serviços oferecidos;
- Uma arquitetura flexível é importante para providenciar soluções para adicionar ou remover um dispositivo à rede ou alterar as configurações de um dispositivo da rede e, lidar com o aumento de volume de processamento;
- Segurança, é necessária para maior confiança e privacidade das empresas.

Uma arquitetura IIoT de referência, com base nestes requisitos, permite formar uma rede com várias funcionalidades, mecanismos e estruturas de informação. Para formar um verdadeiro modelo é ainda necessário a interação de várias entidades para integrar todas as considerações e formar um único modelo de arquitetura IIoT.

A implementação de sistemas IIoT segue certas arquiteturas padrão [22], nomeadamente: arquitetura de três camadas e a arquitetura *edge gateway*. Destas arquiteturas resultam várias variantes dependendo dos requisitos do sistema.

A arquitetura de três camadas é dividida, como o nome indica e se pode observar na figura 2.2, em três camadas: a camada empresarial, a camada da plataforma e a camada fronteira.

A rede de proximidade conecta sensores, atuadores e dispositivos aos quais se dá o nome de nós da rede. A camada fronteira obtém dados dos vários nós da rede, através da rede de proximidade. A rede de acesso estabelece a ligação, permitindo fluxos de informação e comandos, entre a camada fronteira e a camada da plataforma. A camada da plataforma tem como função receber e processar os dados vindos da camada de fronteira e também enviar comandos de controlo, vindos da camada empresarial, para a camada fronteira. A rede de serviços estabelece ligação entre a camada de plataforma e a camada empresarial. A camada empresarial implementa aplicações específicas, disponibiliza sistemas de apoio a decisões e providencia interface para os utilizadores. Esta arquitetura é mais vulgar numa fábrica de produção onde os ativos estão concentrados num certo espaço.



Figura 2.2 - Esquema de um sistema IIoT baseado numa arquitetura de três camadas [22].

A arquitetura *edge gateway* consiste numa solução para ligar uma rede local a uma rede de longo alcance através de uma *gateway*, como é possível observar na figura 2.3. A *gateway* permite isolar a rede local, funcionando como ponto de ligação à rede de longo alcance. A *gateway* também exerce funções como integração de dados para executar processamento e análise local com o objetivo de realizar gestão de ativos. A principal vantagem desta arquitetura é a diminuição da complexidade de um sistema IIoT, permitindo aumentar o número de ativos na rede. No entanto, esta arquitetura não é aconselhada para ativos móveis, uma vez que a rede local tem limites físicos. Esta arquitetura é cultivada pela dispersão dos ativos de uma empresa numa grande área geográfica.

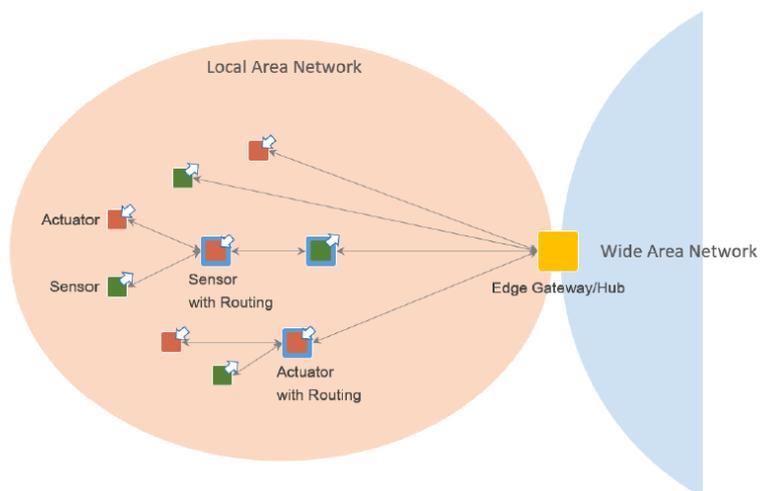


Figura 2.3 - Esquema que representa um sistema IIoT baseado na arquitetura *edge gateway* [22].

A rede local pode ser com ou sem fios e usar diferentes topologias: topologia em malha, topologia par para par ou topologia em estrela. Independentemente da topologia utilizada para a rede local, os nós dessa rede não podem ser acedidos pela rede de longo alcance.

A arquitetura edge gateway pode ser considerada uma evolução da arquitetura de três camadas. Nesta evolução pode considerar-se que da arquitetura de três camadas para a arquitetura edge gateway, a camada intermédia (camada de plataforma) desaparece e as funções dessa camada são suportadas pela gateway. Esta tendência evolutiva foi possível devido a três tecnologias fundamentais: o progresso na microeletrónica a nível de processadores e memória; técnicas de inteligência artificial que no passado eram tidas como centradas numa única máquina e agora começam a ser repartidas graças à microeletrónica; e as redes de comunicação de dados móveis que permitem comunicações a grandes distâncias.

Devido às características de cada arquitetura, a que mais se enquadra neste projeto é a arquitetura edge *gateway*, uma vez que permite isolar o sistema dentro do PT utilizando a unidade concentradora de dados como gateway, funcionando como ponto de ligação à rede de longo alcance e exercendo funções de gestão de ativos, realizando a integração de dados para executar processamento e análise local.

2.3 Sistemas de Monitorização de Postos de Transformação

2.3.1 Transformador de Distribuição

Um transformador de distribuição tem como função reduzir a tensão da eletricidade que chega a um posto de transformação pela última vez numa rede de distribuição antes da mesma eletricidade ser distribuída para os consumidores finais em baixa tensão.

Um transformador de distribuição trifásico clássico é formado por um núcleo de ferro com três membros que atua como circuito magnético. O núcleo é laminado e bem isolado para reduzir as perdas no ferro e as correntes de *Foucault*. Cada membro do núcleo vai ser envolvido por um enrolamento de baixa tensão e um enrolamento de média tensão. As espiras dos enrolamentos estão isoladas com papel impregnado e todo o bloco trifásico encontra-se imerso em óleo, com o duplo propósito de isolamento

e dissipação de calor, gerado por efeito de joule nos enrolamentos, por convecção. O tanque e a tampa superior do transformador vão proteger os enrolamentos e o núcleo dos efeitos atmosféricos. Na tampa superior do transformador são colocadas as buchas, um comutador de tomadas, para ajustamento da tensão de saída em função da carga, e um indicador do nível de óleo. As buchas providenciam isolamento entre os condutores e o tanque [23]. Na figura que se segue, figura 2.4, é possível visualizar a estrutura base de um transformador de distribuição.



Figura 2.4 - Estrutura base de um transformador de distribuição [24].

Os transformadores arrefecidos a óleo podem ser herméticos ou equipados com tanque de expansão, sendo que apenas os transformadores mais potentes são equipados com tanque de expansão [25]. Os transformadores herméticos apresentam várias vantagens por serem completamente isolados: a água não penetra o tanque; não ocorre oxidação do óleo por contacto com o oxigénio; e, como não contêm nenhum equipamento de secagem de ar, tornam-se mais simples e os custos de manutenção também são menores [25].

2.3.2 Monitorização do estado técnico de funcionamento do Transformador de Distribuição

O estado de saúde de um transformador de distribuição pode ser caracterizado pelo número de falhas ao longo do seu tempo de vida útil. A taxa de falhas, para todos os ativos, incluindo o transformador de distribuição, segue a curva que está representada na figura 2.5. Esta curva, também conhecida por curva da banheira (em inglês *Bathtube Curve*), pode ser dividida em três fases distintas: fase inicial, fase de vida útil e a fase final.

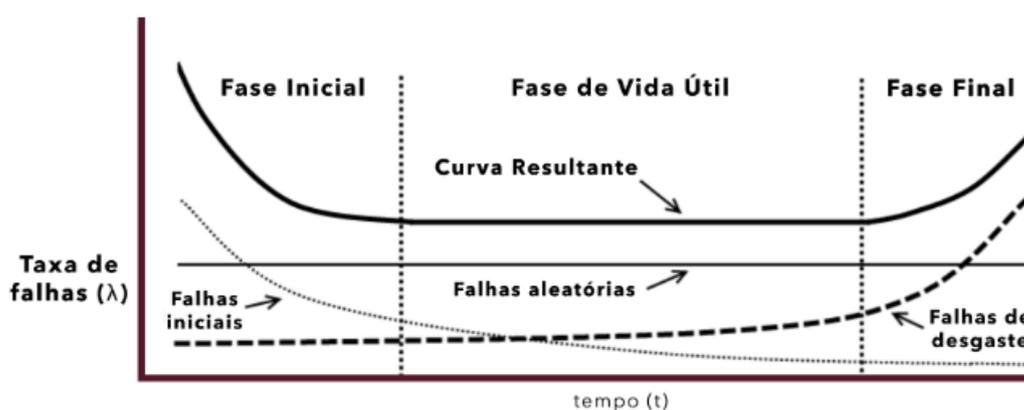


Figura 2.5 - Representação dos vários tipos de falhas ao longo do tempo de vida de um ativo, neste caso concreto, de um transformador de distribuição. Esta curva também é conhecida por curva da banheira [26].

Na fase inicial da vida de um transformador, a taxa de falhas é relativamente elevada devido a problemas de fabricação, instalação e erros de planeamento. Esta fase também é denominada de mortalidade infantil. Passada a fase de mortalidade infantil, a taxa de falhas diminui atingindo o estado estacionário, que corresponde à fase de vida útil. Nesta fase, as falhas, normalmente, são aleatórias e com origem em perturbações externas. Com o passar do tempo o transformador começa a apresentar mais falhas devido ao envelhecimento. Este tipo de falhas aumenta consideravelmente quando se entra na fase final da vida do transformador.

De modo a prolongar o tempo de vida útil do transformador e reduzir as falhas do mesmo, deve-se monitorizar o estado de saúde do transformador ao longo do seu tempo de vida útil.

Na tabela que se segue, tabela 2.1, são apresentados os vários tipos de causas que contribuem para a redução do tempo de vida útil de um TD e provocam falhas no funcionamento do mesmo.

Tabela 2.1 – Tabela que apresenta a percentagem de falhas num Transformador de Distribuição e, a respetiva causa [27].

Causes	% of Failures
Insulation failure	26
Loose connection	07
Over loading	24
Manufacturing problems	05
Improper maintenance	16
Oil contamination	04
Line surges	04
Fire/ explosions	03
Lightning	03
Floods	02
Moistures	01
Unknown	05

Observando a tabela, é possível afirmar que metade das falhas de um transformador de distribuição se devem a falhas de isolamento e sobrecarga do transformador. Na maioria dos casos, as causas que são apresentadas na tabela 2.1 traduzem-se em aumentos da temperatura do transformador ou em descargas dentro e fora do tranque do transformador. Na tabela 2.2, é apresentada uma relação entre as principais falhas e as possíveis causas.

Tabela 2.2 – Representação das possíveis causas para cada falha que pode surgir num transformador de distribuição [28].

Tipo de Falha	Causa
Descarga Parcial	<ul style="list-style-type: none"> Falha no isolamento devido a desgaste ou “stress elétrico”.
Descarga de baixa energia	<ul style="list-style-type: none"> Gases no óleo; Perfurações no papel isolador; Desproteção do núcleo. Falha nos contactos do carregador de carga ou nas buchas;
Descarga de alta energia	<ul style="list-style-type: none"> Óleo queimado; Destruição do papel isolador. Descoloração do papel isolador;
Aumento de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> Maus contactos no carregador de carga e nas buchas; Sobrecarga ou problemas na convecção.

Alguns materiais ou características têm mais preponderância que outros para prolongar o tempo de vida útil do transformador, como se pode observar no esquema da figura 2.6. O óleo e o papel isolador são os materiais mais importantes a monitorizar e analisar, sendo que o papel isolador é monitorizado através da deteção de fragmentos do mesmo no óleo (furanos). Estes materiais são responsáveis por fornecer isolamento elétrico e, o isolamento é um bom indicador do estado do transformador [10].

Características como o fator de potência, a capacidade e a corrente de excitação também são importantes para indicar o estado de saúde do transformador. Outras características e respectivos métodos também podem ajudar a estimar a condição do transformador apesar de não serem tão preponderantes como os outros materiais e características do transformador que foram enunciados.

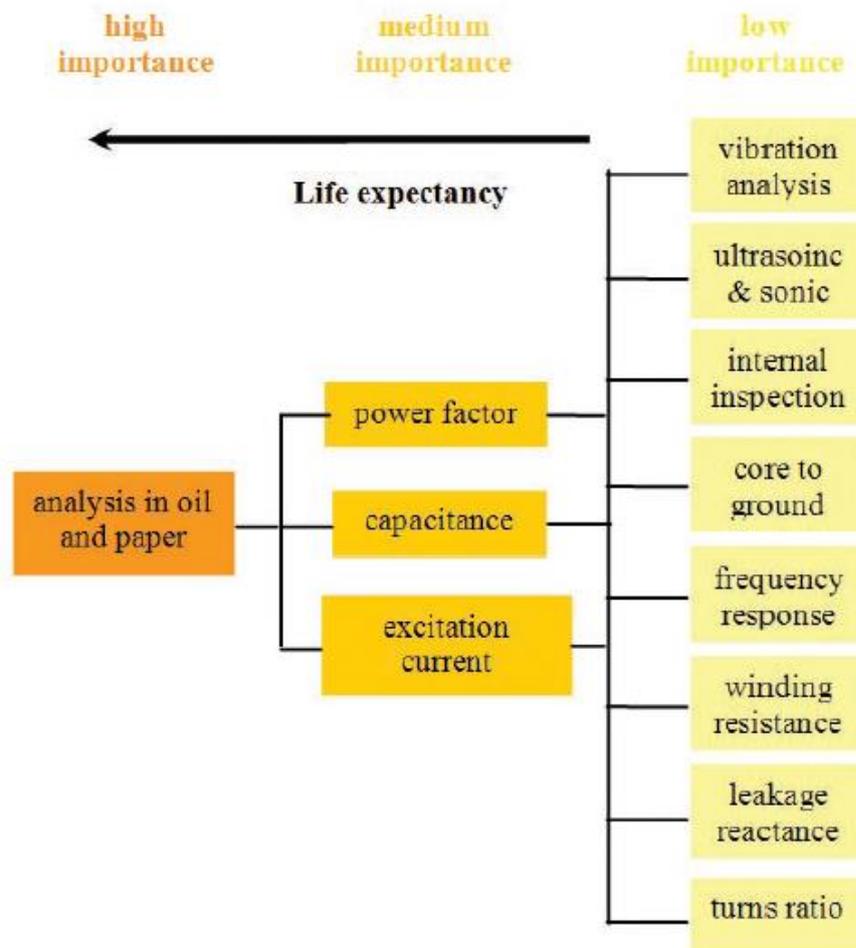


Figura 2.6 - Esquema que apresenta a importância de vários materiais e características para estimar o estado de saúde do transformador de distribuição [28].

2.3.3 Estado da arte - Sistemas de Monitorização de Transformadores de Distribuição

O recurso a sistemas de monitorização de postos de transformação e de transformadores de distribuição é uma tendência relativamente recente, que faz parte do moderno conceito da rede de distribuição inteligente [29]. Esta tendência deve-se não só à tecnologia disponível que existe atualmente, seja de comunicação ou sensorial, mas principalmente devido às novas fontes de energia distribuídas bem como novos utilizadores da rede de eletricidade, como por exemplo veículos elétricos, que têm impactos significativos na rede, nomeadamente, fluxos de potência inversa e flutuações de tensão [30]. Assim, são apresentadas várias propostas de métodos e sistemas de monitorização de postos de transformação e transformadores de distribuição.

Segundo Aleksandar Janjic et al. [31], um posto de transformação inteligente permite monitorizar e controlar, em tempo real, os equipamentos do PT de forma mais fiável e eficiente. Os dispositivos inteligentes podem ser instalados num posto de transformação tradicional para realizar as funções de monitorização, controlo e gestão do sistema. As principais funções dos dispositivos inteligentes de um posto de transformação são:

- Análises inteligentes para detecção de falhas e processamento de alarmes, etc.;
- Controlo para correções, ações preditivas e previsão de estado de emergência;
- Manutenção e gestão dos ativos;
- Segurança física inteligente;
- Conexão e utilização do Sistema de Informação Geográfico.

No artigo “*Distribution Transformer Monitoring System Using Internet of Things (IoT)*” [32] é apresentado um sistema para monitorizar transformadores de distribuição permitindo otimizar a gestão do transformador e ajudar os responsáveis a tomar decisões baseadas nos dados obtidos. Este sistema permite monitorizar o nível do óleo, a vibração do transformador, a corrente e tensão de cada circuito de saída e a humidade e temperatura ambiente. Todos os dados são exibidos num LCD que está instalado no posto de transformação e também numa página Web que recebe os dados,

periodicamente, através de um módulo GSM/GPRS. Quando é ativado um alarme é enviada uma mensagem para os responsáveis.

Em [33] é apresentado um sistema para obter o fator de envelhecimento do papel isolador de um transformador de distribuição. Este sistema é baseado na norma IEEE C57.91 e no modelo de energia térmica dinâmica dos autores. O modelo de energia térmica permite estimar a energia térmica dos enrolamentos sob diferentes cargas com o objetivo final de estimar, através da norma referida, a temperatura do óleo no topo do transformador e a temperatura mais elevada nos enrolamentos (no artigo referida como *hottest-spot temperature*). O fator de envelhecimento é obtido através da norma referida. Para aplicar o método, para além dos dados obtidos com o modelo de energia térmica, são necessários vários dados informativos do transformador, a carga do mesmo e a temperatura ambiente. Os dados relativos à carga são extraídos de uma página Web com dados relativos ao transformador, em intervalos de uma hora. Os valores da temperatura, são extraídos da página *Web Yahoo*, em intervalos de quinze minutos. Os dados são armazenados numa base de dados do servidor. O cliente pode visualizar os resultados, que são apresentados sob a forma de gráficos, ao estabelecer uma conexão ao servidor através de uma página *Web*. Os dados para realizar os cálculos do fator de envelhecimento do transformador também podem ser introduzidos manualmente pelo cliente.

T. Ku *et al.* apresentam em [34] um sistema de gestão de transformadores de distribuição específico para a companhia *Taiwan Power Company*. Este sistema permite supervisionar várias variáveis de um transformador e controlar a carga disponibilizada para o consumidor quando o transformador está sobrecarregado. O sistema é composto por uma unidade terminal do transformador, um módulo de comunicação e um sistema de cartografia automático. A unidade terminal monitoriza a temperatura do óleo, a corrente e tensão e a potência de cada circuito de saída. Esta unidade também obtém a potência consumida pelos consumidores que são alimentados pelo transformador em questão. Para enviar a informação recolhida pela unidade terminal do transformador e também os alarmes, em caso de valores anormais das variáveis, é utilizado um módulo *Power Line Communication* de banda estreita para comunicar com uma unidade *gateway*, a partir da qual a informação progride para a estação principal através de cabos de fibra ótica. A informação ao chegar à estação principal é disponibilizada no sistema de cartografia automático, sendo acionado um alarme neste sistema sempre que uma variável sair do intervalo de valores considerados normais. Este sistema permite ainda analisar perdas no transformador.

Em [35] é proposto um sistema para monitorizar um posto de transformação. O sistema consiste num dispositivo baseado no microcomputador *Raspberry Pi 3B*. O sistema, através de vários sensores, monitoriza a temperatura do transformador de distribuição, a tensão dos barramentos de média e baixa tensão, o sistema de correção do fator de potência e o gerador. O dispositivo vai transmitir os dados obtidos para um servidor através da tecnologia *Wi-Fi*. Todos os dados podem ser acedidos e supervisionados através de uma aplicação Web ou móvel.

K. Banumathi et al. apresentam em [36] um sistema de monitorização, não intrusivo, de transformadores de distribuição ao qual dão o nome de *Transformer Health Monitoring System*. O sistema supervisiona através de vários sensores, a temperatura externa do transformador, o nível do óleo e a tensão e corrente de cada circuito de saída. Quando o sistema deteta um valor anormal nas medições envia uma mensagem, através de GSM para um telemóvel de uma pessoa responsável pelo transformador a alertar que uma das variáveis supervisionadas está com um valor anormal.

A ABB comercializa desde 2017 o primeiro transformador de distribuição digital, o *TXpert* [37]. O *TXpert* contém um sistema GPS e consegue obter dados da temperatura ambiente, da temperatura do óleo no topo do transformador, da pressão e humidade no interior do transformador, da presença de hidrogénio no óleo e ainda medir a tensão e corrente dos circuitos de saída. Estes dados são obtidos através do sistema de sensores que é introduzido no transformador quando este está a ser fabricado. O *TXpert* realiza ainda análises locais como a distorção harmónica total e o cálculo do tempo de vida útil do papel isolador. Toda a informação, transmitida via *Wi-Fi*, *Ethernet* ou comunicações móveis, pode ser visualizada numa plataforma *online*. Esta inovação permite identificar tendências de operação, potenciais falhas e otimizar a gestão do ativo, neste caso o próprio transformador.

A *Inhmeter* comercializa um sistema de gestão de transformadores de distribuição não intrusivo [38]. Este sistema tem como unidade principal a unidade terminal do transformador que tem como funções recolher e reunir os dados de vários sensores que monitorizaram várias variáveis do TD e, enviar os dados e alarmes para uma unidade de hierarquia superior chamada *Smart DTMS*. Os dados e alarmes enviados para a *Smart DTMS*, através de comunicações móveis, fibra ótica, *DSL* ou *Ethernet* são processados e analisados. Este sistema permite monitorizar através de vários sensores a temperatura no exterior do transformador, a temperatura do óleo do transformador, o fator de potência, a tensão e corrente nos circuitos de saída. Este sistema possui ainda três dispositivos eletrónicos inteligentes que permitem equilibrar a

tensão e o fator de potência das três fases do transformador, controlar os cabos de alimentação dos postes de iluminação da rua e ainda controlar a ligação entre o transformador e os cabos de baixa tensão.

A *hIOTron* comercializa um sistema de gestão intrusivo de transformadores de distribuição [39]. O sistema monitoriza parâmetros essenciais como temperatura ambiente, humidade, resistência dos enrolamentos e tensão e corrente em cada circuito de saída. Para além dos parâmetros essenciais este sistema monitoriza outros parâmetros como a deteção da temperatura mais elevada nos enrolamentos (em inglês *hottest-spot temperature*), a potência reativa total, a curva de magnetização e deteta a presença de insetos no transformador. O sistema possui alguma capacidade de análise na unidade dentro do posto de transformação, mas a maior parte da capacidade de processamento e análise está na plataforma IoT da empresa. Este sistema permite detetar anomalias, otimizar a gestão de ativos, realizar manutenção preditiva e percebe quando o transformador está perto do colapso.

A *Grid 20/20* comercializa o *OptaNODE™ DTM (Distribution Transformer Monitor)* [40], um dispositivo não intrusivo, de rápida e fácil instalação para monitorizar um transformador de distribuição. O *OptaNODE™ DTM* suporta várias tecnologias de comunicação como comunicação móvel e tecnologia radiofrequência. Os dados recolhidos pelo dispositivo (tabela 2.3) permitem que a plataforma da empresa realize o processamento e análise dos dados, disponibilizando numa aplicação toda a informação relativa ao transformador, o que permite otimizar o ciclo de vida do mesmo.

A *Ellevio*, a segunda maior empresa de sistemas de distribuição na Suécia, apresenta um estudo a comparar três sistemas de monitorização, de diferentes fabricantes, para diferentes postos de transformação [41]. A empresa retirou várias conclusões deste estudo:

- Em postos de transformação existentes devem ser utilizados sistemas de monitorização simples, enquanto que nos postos de transformação novos devem ser utilizados sistemas de monitorização mais avançados.
- Medições com qualidade permitem detetar falhas no sistema que não eram possíveis de detetar e são facilmente corrigidas.
- É importante selecionar os dados mais relevantes a comunicar para otimizar o processamento e análise dos mesmos.

- A resolução temporal também é importante e, na visão da empresa, intervalos de 15 minutos permitem um bom compromisso entre qualidade e quantidade.
- A empresa destaca também que ao incorporar novas tecnologias nos produtos requer também novos níveis de competência nas equipas.

Na tabela que se segue, é possível comparar os vários produtos comercializados.

Tabela 2.3 - Comparação das características de produtos comercializados

Produto	Monitorização de variáveis				Monitorização de outras variáveis	Análises locais	A/P W	Comunicação
	TA H	T O	PH G	T C				
<i>TXpert</i>	•	•	•	•	• Possui GPS	•	•	<ul style="list-style-type: none"> • Wi-fi • Ethernet • Comunicações móveis • Fibra ótica
Sistema da Inhemeter	•	•	x	•	<ul style="list-style-type: none"> • Fator de potência • Balanceamento da carga 	•	•	<ul style="list-style-type: none"> • Ethernet • Comunicações móveis
Sistema da hIOTron	•	x	x	•	<ul style="list-style-type: none"> • Pontos quentes • Resistência dos enrolamentos • Curva de magnetização • Detecção de insetos no TD 	•	•	-
OptaNODE™ DTM	•	x	x	•	<ul style="list-style-type: none"> • Fator de potência • Frequência da linha 	•	•	<ul style="list-style-type: none"> • Comunicação móvel • Tecnologia Radiofrequência

Legenda: “•”- possui a característica; “x” – não possui a característica; “-” – não há informação suficiente; TAH – Temperatura ambiente e humidade; TO – Temperatura do óleo; PHG – Pressão, humidade e Gases no interior do TD; TC – Tensões e Correntes; A/PW – Aplicação ou página Web.

2.4 Definição do projeto

Esta dissertação surge no âmbito de um projeto realizado em conjunto pelo LIBPhys-UC e a Eneida - Wireless & Sensors, tendo como objetivo implementar um sistema de monitorização em tempo real para PT cabinados.

Um Posto de Transformação é um elemento integrante da rede de distribuição de energia eléctrica. Assim, a electricidade é distribuída para um PT através de cabos de média tensão que, através de um dispositivo seccionador e de protecção automática (disjuntor), alimenta um ou mais Transformadores de Distribuição, que realizam a transformação de tensão para a baixa tensão. A distribuição final da potência, já em

baixa tensão, é organizada num quadro elétrico através de múltiplos circuitos em paralelo, cada um dos quais é, aí, protegido por um fusível. Na figura que se segue está representada a estrutura de um PT.

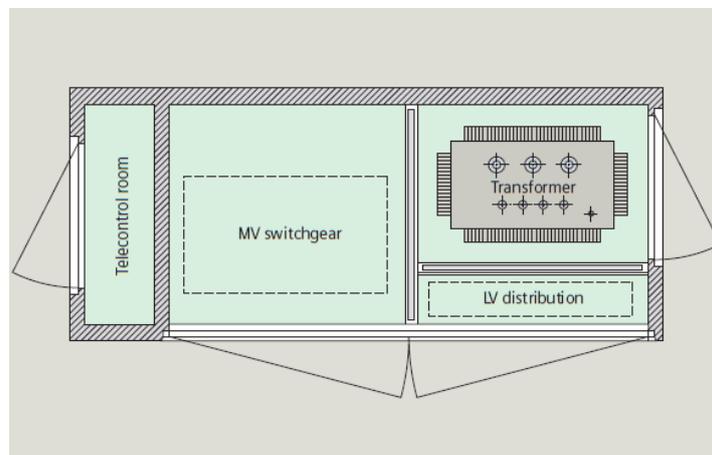


Figura 2.7 – Esquema da estrutura de um Posto de Transformação cabinado [42].

O sistema de monitorização deve ser projetado tendo como base uma arquitetura *edge gateway*, uma vez que é pretendido implementar o conceito de *edge computing* [43], concedendo poder de processamento e análise à *gateway* do sistema para reduzir a quantidade de dados enviados para a plataforma.

Devido às características da arquitetura *edge gateway*, são necessárias duas redes de comunicação: uma rede de curto alcance para comunicação dentro do PT e uma rede de longo alcance para comunicação com uma base de dados centralizada. Um requisito imposto pelo parceiro industrial é a utilização de *Bluetooth Low Energy* (BLE) como rede de curto alcance resultado das vantagens reconhecidas no respeitante consumo, largura de banda e imunidade ao ruído, que têm conduzido a uma grande aceitação no mercado IoT.

Sendo o TD o elemento principal e fundamental do PT, a principal função do sistema de monitorização é monitorizar e analisar o estado de funcionamento do TD de modo a prolongar o tempo de vida útil do mesmo.

2.5 Especificação Funcional

Para monitorizar e analisar o estado de funcionamento do TD o sistema de monitorização deve realizar várias funções. Uma função indispensável é a monitorização de várias variáveis do TD, como por exemplo, a temperatura do óleo,

descargas parciais dentro do TD e nas buchas e, detecção de zumbidos para prevenção de falhas núcleo.

Os consumidores finais, por vezes, podem sobrecarregar o transformador devido a excessos de consumo elétrico. Logo, o sistema de monitorização também tem de monitorizar a tensão e a corrente de cada circuito de saída em baixa tensão do transformador para saber em que regime está a funcionar o transformador.

A ventilação dentro do PT ocorre por convecção. Vários fatores podem afetar a ventilação dentro do compartimento, como por exemplo, acumulação de lixo na grelha que permite o fluxo de ar com o exterior. A falha no sistema natural de ventilação pode levar ao aquecimento TD, portanto é necessário monitorizar a temperatura ambiente no exterior e no interior do PT.

A monitorização das variáveis referidas vai originar vários dados. O sistema tem de juntar esses dados e combiná-los, isto é, tem de ter um dispositivo capaz de realizar a fusão sensorial para obter e analisar o estado de funcionamento do TD. Este dispositivo também vai exercer funções de gateway para comunicar os dados através de uma rede de longo alcance para uma plataforma online. Este dispositivo deve também exercer a função de central de alarmes.

Capítulo 3

Arquitetura do Sistema

3.1 Partição funcional

Para executar as funções enunciadas na secção 2.5 o sistema vai ser dividido, como se pode observar na figura 3.1, em cinco unidades: uma unidade concentradora de dados; uma unidade multissensorial; uma unidade de medida de tensões e correntes e duas unidades de medição de temperatura ambiente e humidade relativa.

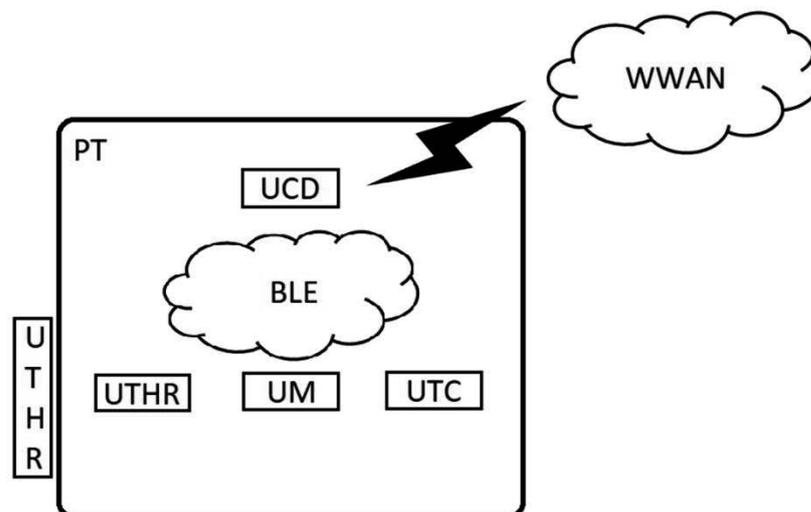


Figura 3.1 - Estrutura do sistema de monitorização de um PT. Legenda : UCD- Unidade Concentradora de Dados; UTHR – Unidade de Temperatura e Humidade Relativa; UM – Unidade Multissensorial; UTC – Unidade de Tensão e corrente; BLE – Bluetooth Low Energy; WWAN- Wireless Wide Area Network

Este sistema visa a monitorização e diagnóstico do(s) transformador(es) dentro do PT, na linha do sistema já apresentado em [44], agora de forma mais abrangente pelo cuidado colocado na avaliação do estado do transformador. Portanto de acordo

com o interesse do mercado a sensorização será mais ou menos alargada, logo a arquitetura atual do sistema prevê a integração da panóplia de dispositivos do sistema referido e não apenas aqueles que servem o propósito específico de diagnóstico de transformadores.

- **Unidade concentradora de dados**

A unidade concentradora de dados corresponde-se localmente com as quatro unidades sensoriais distribuídas pelo PT através de *Bluetooth Low Energy*. Esta unidade vai receber dados de cada unidade com um intervalo de periodicidade bem definido.

Após receber os dados, a UCD vai realizar a fusão sensorial, integrando os dados recebidos da maneira mais simples possível, isto é, utilizando a menor capacidade computacional possível sem perder informação importante. O resultado da fusão e análise sensorial é o diagnóstico do estado de funcionamento do transformador e, de uma forma geral, do PT. A fusão e análise sensorial vai-se realizar através de um algoritmo que vai ser apresentado no capítulo 5.

O diagnóstico do estado de funcionamento do transformador vai ser transmitido diariamente para uma plataforma online, que suporta funções de gestão de ativos (operação, manutenção e planeamento), através de uma rede pública de dados sem fios. Esta unidade tem ainda o papel de central de avisos/alarmes.

- **Unidade multissensorial**

A unidade multissensorial [10], que é colocada na tampa do transformador, possui vários sensores e, ao mesmo tempo, várias funções. Esta unidade possui um sensor de ultrassons que deteta descargas parciais no interior do TD através dos ultrassons, na banda dos 40 kHz, gerados por faíscas elétricas. A unidade multissensorial mede a temperatura na tampa do transformador para, posteriormente, estimar a temperatura do óleo no topo do transformador. Para além dos dois sensores já referidos, a unidade multissensorial possui também uma antena para medir a energia e a duração de uma descarga parcial nas buchas do TD e um microfone para a medida de zumbido entre 80 a 500 Hz para detetar frequências e amplitudes de vibração anormais do núcleo do transformador. Assim sendo esta unidade tem como função, de uma forma geral, detetar falhas que possam ocorrer no TD. Esta unidade vai enviar mensagens para a unidade concentradora de dados, em intervalos de tempo definidos pela unidade concentradora de dados, com a média dos valores da temperatura, o número de descargas parciais que ocorrerem dentro do TD e nas buchas e a deteção de zumbidos nesse intervalo de tempo.

- **Unidade de medição de tensões e correntes**

A unidade de medição de tensões e correntes no quadro do PT [45] tem como função medir as correntes em cada circuito de saída do TD em baixa tensão e a tensão em cada fase do transformador. Após realizar as medições indicadas, a unidade calcula a frequência, direção do fluxo energético, fator de potência, distorção harmônica total, potência (instantânea, ativa, reativa e aparente) e a Energia (ativa, reativa e aparente) em cada circuito de saída. Estas variáveis permitem analisar os circuitos de saída do TD e também monitorizar o consumo dos consumidores finais. Esta unidade vai comunicar com a unidade concentradora de dados, em intervalos de tempo definidos pela unidade concentradora de dados, transmitindo as medidas efetuadas e as variáveis calculadas que sejam necessárias para realizar a fusão sensorial.

- **Unidades de medição de temperatura ambiente e humidade relativa**

As unidades de medição de temperatura e humidade relativa, tanto no exterior e no interior do PT, têm a função de medir a temperatura ambiente e a humidade relativa no interior e no exterior do PT com o objetivo de monitorizar o fluxo natural de calor no PT e detetar subidas de temperatura na cabine do PT. Estas unidades realizam medições de temperatura ambiente e humidade relativa sendo os respetivos valores armazenados e, em intervalos de tempo definidos pela unidade concentradora de dados, será enviada uma mensagem para a mesma unidade com a média de cada variável medida.

3.2 Comunicação

As tecnologias de comunicação que incorporam um sistema IoT dependem dos requisitos desse sistema como, por exemplo, alcance, largura de banda e consumo energético. Normalmente, as aplicações IoT requerem longo alcance, largura de banda reduzida e um baixo consumo energético [46]. Por vezes uma tecnologia de comunicação não é suficiente para se obter um sistema com os requisitos desejados, portanto é necessário utilizar mais que uma tecnologia de comunicação num sistema IoT, como é o caso do sistema descrito neste documento.

Existem vários tipos de redes sem fios: *Wireless Personal Area Network* (WPAN); *Wireless Local Area Network* (WLAN); *Wireless Neighborhood Area Network* (WNAM); *Wireless Wide Area Network* (WWAN) e *Low Power Wide Area Network*

(LPWAN). Dentro de cada tipo de rede existem várias tecnologias de comunicação sem fios, como é possível observar na Figura 3.2.

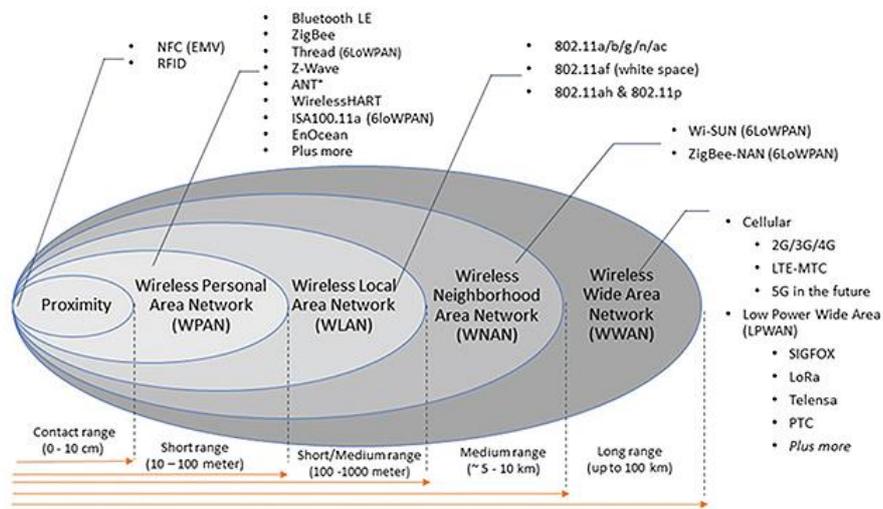


Figura 3.2 - Representação do alcance de cada tipo de rede sem fios (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN) [47].

O alcance, consumo energético e largura de banda das várias tecnologias de comunicação, são características que estão interligadas. Para utilizar uma tecnologia com um longo alcance e uma largura de banda elevada, o consumo energético será mais elevado. Caso o alcance necessário seja menor e a largura de banda se mantiver igual, o consumo energético irá diminuir, da mesma forma que irá diminuir, se a largura de banda diminuir e o alcance se mantiver igual. Na figura que se segue, Figura 3.3, é possível observar a relação entre o alcance e a largura de banda de várias tecnologias de comunicação sem fios.

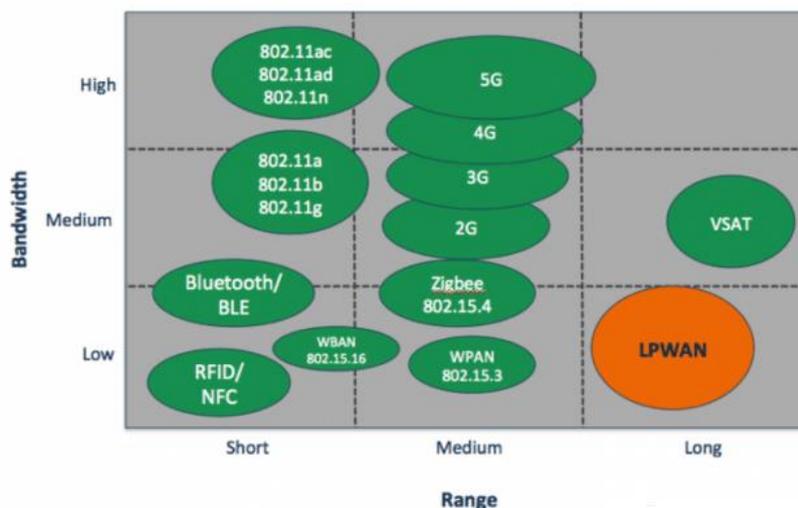


Figura 3.3 - Representação da relação entre a largura de banda e o alcance para diferentes tecnologias de comunicação sem fios [48].

3.2.1 Comunicação Interna

A comunicação interna no sistema de monitorização a implementar diz respeito à comunicação que se vai realizar entre a unidade concentradora de dados e as unidades sensoriais. Para comunicar entres as unidades referidas deve ser utilizada uma rede de curto alcance, consumo energético reduzido e largura de banda reduzida, uma vez que a frequência de comunicação é reduzida. Observando as figuras 3.2 e 3.3, vários protocolos de comunicação podem ser estudados e considerados, como por exemplo BLE, *ZigBee*, etc. No entanto, como já foi referido, a tecnologia de comunicação que vai ser utilizada para comunicação interna é BLE e, portanto, vai ser esta a única tecnologia estudada para a comunicação interna.

- **Bluetooth Low Energy**

O BLE [49] é um protocolo de comunicação sem fios para curtas distâncias que foi desenvolvido pelo *Bluetooth Special Interest Group* (SIG) e disponibilizado, em 2010, na versão 4.0 do *Bluetooth*, denominada *Bluetooth Smart*. O BLE destaca-se de todos os protocolos de comunicação anteriores da tecnologia Bluetooth por ser um protocolo de baixo consumo energético desenhado para aplicações no domínio da IoT, como por exemplo, dispositivos alimentados a bateria para monitorizar e controlar variáveis.

A *stack* do BLE [50] está dividida em duas partes principais, como se pode observar na figura 3.4, o *controller* e o *host*. Esta divisão dá-se porque no Bluetooth clássico as diferentes partes são implementadas separadamente.

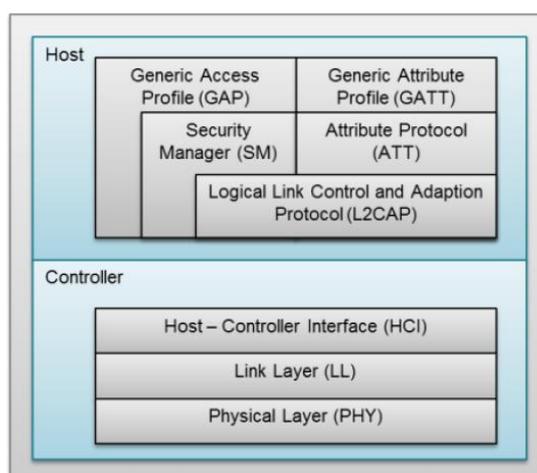


Figura 3.4 – Esquema da *stack* do protocolo *Bluetooth Low Energy* [50].

O *controller* é composto pela camada física, a camada de ligação e a interface entre o *controller* e o *host*. O *host* é composto pelo protocolo de adaptação e controlo lógico da ligação, o protocolo de atributos, o perfil de acesso genérico, o perfil de atributos e a

camada de gestão de segurança. O *controller* da *stack* do BLE não é compatível com o *controller* da *stack* do *Bluetooth*, portanto um dispositivo que suporta apenas BLE não pode comunicar com um dispositivo que suporta apenas *Bluetooth*.

O BLE comunica, com uma taxa de transmissão de 1Mbps na banda dos 2.4 GHz, denominada banda *Industrial Scientific and Medical* (ISM), através de quarenta canais de radiofrequência sendo que três desses canais, denominados canais de *advertising*, são utilizados para descobrir dispositivos, estabelecer conexões e transmitir dados sem estabelecer uma ligação. Os restantes canais servem para comunicação bidirecional depois de estabelecida a ligação entre os dispositivos.

Um dispositivo BLE possui um dos quatro perfis possíveis definidos pela camada de perfil de acesso genérico (GAP): *broadcaster*, *observer*, central e periférico. Um *broadcaster* transmite dados através dos canais de *advertising* e não aceita ligações. Os dados transmitidos pelo dispositivo *broadcaster* são recebidos pelo *observer*, que também não aceita ligações. Um periférico, no modo *advertiser*, envia mensagens, através dos canais de *advertising*, a informar que está disponível para estabelecer uma ligação. Um dispositivo central, no modo *initiating*, ao receber a mensagem enviada pelo periférico, envia um pedido de ligação a esse mesmo dispositivo periférico. Após ser estabelecida a ligação, o central desempenha o papel de *master* e o periférico desempenha a função de *slave* com o objetivo de trocarem informações. O central pode estabelecer ligação com vários periféricos, enquanto que um periférico pode estabelecer ligação apenas com um dispositivo central. O perfil genérico de atributos (GATT) define o papel de cliente ou servidor para um dispositivo, sendo que um cliente executa pedidos de leitura e escrita e um servidor responde a esses pedidos. Por norma um central desempenha o papel de cliente e um periférico o papel de servidor, no entanto o inverso também é possível.

Em 2013 foi lançada uma atualização do *Bluetooth Smart*, a versão 4.1 do *Bluetooth*, onde se destacaram três alterações em relação à versão anterior: os dispositivos podem atuar como concentradores e nós, simultaneamente, permitindo a periféricos comunicar independentemente; melhoramento do consumo energético aumentando o intervalo de tempo entre conexões; e eliminação da interferência das tecnologias de quarta geração de comunicações móveis, Long Term Evolution (LTE), que reduzia o desempenho do BLE.

Em 2014 foi lançada outra atualização do *Bluetooth Smart*, a versão 4.2, onde se observam atualizações de segurança tornando as comunicações mais seguras, aumento da velocidade de transmissão e o aumento da capacidade dos pacotes de

mensagens. O destaque desta atualização é a incorporação da versão 6 do protocolo de Internet (IPv6) permitindo acesso direto à Internet.

Em 2016 foi disponibilizado o *Bluetooth 5* com a finalidade de aumentar as aplicações do *Bluetooth* na IoT. Assim, nesta nova versão do *Bluetooth* a velocidade de transmissão duplicou, o alcance quadruplicou e a capacidade de mensagens no modo *broadcasting* aumentou oito vezes. Esta versão é compatível com as versões anteriores do *Bluetooth* e está preparada para a coexistência com a diversidade de tecnologias de comunicação que a IoT proporciona sem causar interferência devido à introdução de um sistema denominado *Slot Availability Masks* [51]. Em 2017, o *Bluetooth SIG* disponibilizou a topologia *mesh* para o *Bluetooth* o que tornou esta tecnologia ainda mais interessante para aplicações IoT.

3.2.2 Comunicação Externa

A comunicação externa, no sistema de monitorização, corresponde à comunicação entre a unidade concentradora de dados e uma plataforma online. A tecnologia de comunicação a ser utilizada tem que ser de longo alcance e possuir uma boa cobertura geográfica. A frequência de comunicação não é muito elevada, assim sendo a largura de banda não necessita de ser elevada e, o consumo energético não é relevante, uma vez que a unidade concentradora de dados é alimentada por uma tomada.

Tendo em conta os requisitos da comunicação externa e observando as figuras 3.2 e 3.3 vão ser estudadas e consideradas redes LPWAN e redes de comunicação móvel.

3.2.2.1 Rede LPWAN

As redes LPWAN são redes de comunicação sem fios projetadas para permitir comunicações de longo alcance, na ordem dos km, e com larguras de banda reduzidas, entre 10 bps e unidades de Kbps [52]. Estas redes possuem ainda um consumo energético muito reduzido quando comparadas com outras redes, como é possível observar na figura 3.4, podendo as baterias dos dispositivos inteligentes, que utilizem tecnologias LPWAN, durar 10 anos [48].

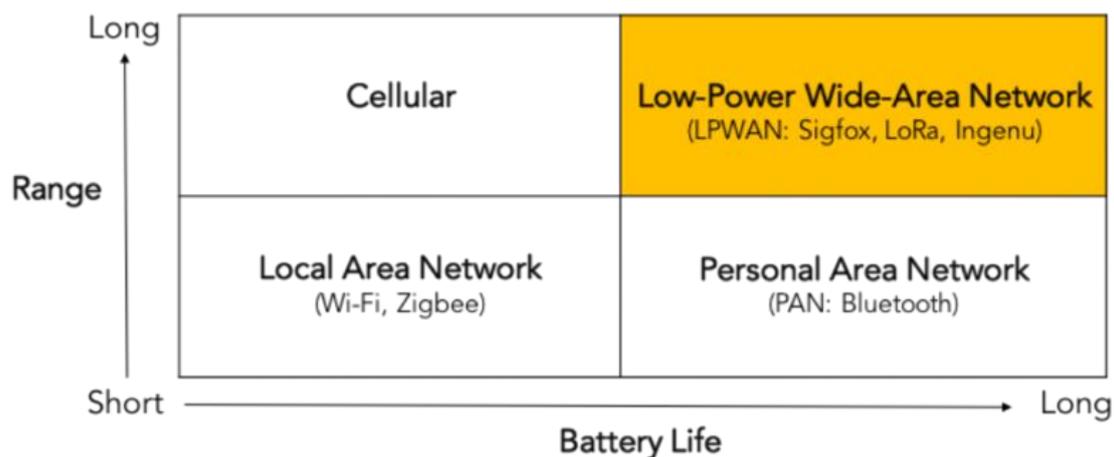


Figura 3.5 - Representação da relação entre o alcance e o consumo energético para vários tipos de redes (WLAN, WPAN, LPWAN e Redes de comunicação móveis) [48].

Dentro das redes LPWAN existem várias tecnologias, como por exemplo, Sigfox, LoraWan, *Narrowband-IoT* (NB-IoT), Ingenu, etc. Neste documento irão ser exploradas apenas as tecnologias Sigfox, LoRaWan e NB-IoT. Uma tecnologia que também merece uma referência apesar de não ser explorada é a tecnologia LTE-M. Esta tecnologia LPWAN tem um potencial enorme para a IoT devido à compatibilidade com as infraestruturas da tecnologia LTE, no entanto não vai ser explorada porque é uma tecnologia indicada para aplicações críticas e a tecnologia NB-IoT, do ponto de vista do sistema de monitorização a implementar, cumpre os mesmo requisitos que a tecnologia LTE-M com a vantagem de ser mais barata.

- **Sigfox**

A Sigfox é uma rede baseada na técnica *Ultra Narrow Band* [53] permitindo comunicações a quilómetros de distância com grande robustez, o que dá à rede uma boa proteção contra ataques de *jamming*. Esta rede adotou um modelo semelhante ao de um operador de rede móvel [54] utilizando a gama de frequências ISM 868-869 MHz e 902-928 MHz com uma largura de banda de 100 bps ou 600 bps dependendo das regiões. A comunicação é bidirecional, permitindo mensagens dos dispositivos inteligentes para as estações (*uplink*) com um tamanho máximo de 12 bytes e mensagens das estações para os dispositivos inteligentes (*downlink*) com um tamanho máximo de 8 bytes. O número de mensagens também é limitado, sendo que, no máximo, é possível enviar 140 mensagens e receber 4 mensagens por dispositivo num dia, conseguindo assim um consumo energético muito reduzido. A rede Sigfox permite ainda a conexão de biliões de dispositivos devido à diversidade espacial, no tempo e na frequência [55].

- **LoRaWan**

Esta tecnologia é repartida em duas partes: LoRa e LoRaWan. A Lora é uma camada física que permite comunicações de longo alcance, na ordem dos quilómetros. A LoraWan é um protocolo de comunicação, realizado pela LoRa Alliance, e define a arquitetura da rede. Esta rede utiliza a gama de frequências ISM com uma largura de banda na ordem dos 50 Kbps, dependendo do fator de espalhamento [56]. A comunicação é bidirecional, permitindo mensagens com um tamanho máximo de 234 bytes, não existindo limite de mensagens por dia. Os dispositivos inteligentes são classificados (classe A, B e C) conforme a posse de sensores e/ou actuadores [56]. Esta distinção entre os vários dispositivos permite estabelecer diferentes formas de resposta a um *uplink* e, conseqüentemente, reduzir o consumo energético da rede.

- **NB-IoT**

A NB-IoT é uma tecnologia, de longo alcance e baixo consumo energético, desenvolvida pelo *The 3rd Generation Partnership (3GP)* compatível com as infraestruturas da tecnologia *Long Term Evolution (LTE)*. Esta tecnologia é uma otimização/evolução da tecnologia LTE que utiliza a banda estreita de frequências reduzindo, assim, o consumo energético. A NB-IoT utiliza uma gama de frequências licenciadas, oferece o mesmo nível de segurança que o LTE [57] e uma largura de banda com limite máximo de 200 Kbps. A comunicação é bidirecional, em regime *half-duplex*, para um tamanho máximo de mensagens de 1600 bytes [58]. Esta tecnologia por ser instalada em redes próprias ou em redes de operadoras [59].

Na tabela 3.1 e na figura 3.5 é possível analisar e comparar várias características das tecnologias LPWAN exploradas neste documento.

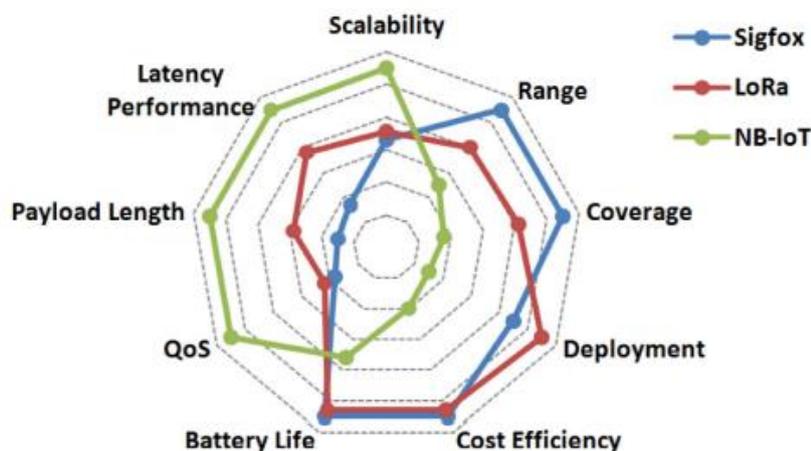


Figura 3.6 - Representação das vantagens de cada tecnologia LPWAN (Sigfox, LoRaWan e NB-IoT) em termos de factores de interesse da IoT [46].

Tabela 3.1 - Tabela que compara várias características das diferentes tecnologias LPWAN (Sigfox, LoRaWan e NB-IoT) [46].

	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

3.2.2.2 Redes de comunicação móvel

A primeira geração de comunicações móveis, denominada 1G, surge na década de 80. Estas redes de comunicação móvel eram analógicas e permitiam apenas comunicação por voz com uma velocidade de transferência de dados na ordem das unidades de Kbps. Contudo, a qualidade da comunicação era fraca, não existia encriptação de informação e as várias redes existentes não eram compatíveis. Com o aumento do número de utilizadores percebeu-se que esta geração de comunicações móveis não tinha capacidade suficiente para corresponder à procura, surgindo assim a segunda geração de comunicações móveis (2G), no início da década de 90.

As redes de comunicação móvel da segunda geração transitaram para o domínio digital. Esta transição possibilitou o aumento da fiabilidade, da robustez e da segurança das redes e passou-se a utilizar o espectro de radiofrequências de forma mais eficiente. A tecnologia mais usada desta geração é o *Global System for Mobile Communications* (GSM). O GSM permite realizar comunicações no estrangeiro, a uma velocidade de 9,6 Kbps, devido à introdução do *roaming* internacional cobrindo 90% da população [60]. A transição entre a segunda geração e a terceira geração de comunicações móveis (3G) dá-se através da tecnologia *General Packet Radio Service* (GPRS), possibilitando a transferência de dados, através de pacotes, a uma velocidade de 100 Kbps [61]. Outra tecnologia conhecida que surge na transição entre a 2G e 3G é o *Enhanced Data-rate for GSM Evolution* (EDGE), que possibilita transferência de dados a velocidades ainda maiores. A tecnologia EDGE é uma tecnologia com várias características de 3G, apenas não atinge velocidades de transmissão de dados suficientemente grandes para ser considerada uma tecnologia 3G.

A terceira geração de comunicações móveis surge no início da década de 2000. A 3G fornece um maior leque de serviços que se estende desde aplicações multimédia (vídeo, dados e áudio) até à utilização de vários serviços disponíveis de internet (*world wide web*, correio electrónico, etc.). Esta geração de comunicações móveis quando surgiu, apresentava uma taxa de transmissão de dados na ordem dos 300 Kbps para *downlinks* e 50 Kbps para *uplinks*. Com a evolução da tecnologia foi possível melhorar esta transmissão de dados, sendo que, atualmente é possível obter velocidades na ordem da unidade de Mbps para *downlinks* e algumas centenas de Kbps para *uplinks*. As redes 3G têm capacidade para suportar um maior número de utilizadores.

A quarta geração de comunicações móveis (4G) surge no fim da década de 2000. Esta geração fornece todos os serviços que a antiga geração fornecia porém com maior velocidade, maior largura de banda, melhor cobertura e maior qualidade de rede, o que fez com que as tecnologias 3G caíssem em desuso. A tecnologia mais popular desta geração é a *Long Term Evolution* (LTE). Esta tecnologia permite velocidades de 100 Mbps para *downlinks* e 50 Mbps para *uplinks* com latências menor que 5 ms [62]. Esta tecnologia foi melhorada em termos de desempenho e recebeu o nome de *Long term Evolution-Advanced* (LTE-A), há até quem considere a LTE-A a tecnologia de transição da 4G para a 5G. A tecnologia LTE-A possui taxas de transmissão de dados na ordem dos Gbps e tem uma capacidade de suporte de utilizadores maior quando comparada com as tecnologias anteriores. Porém as tecnologias 4G não têm grande eficiência energética e, a capacidade para suportar novos utilizadores, apesar de ser grande, não é suficiente para corresponder à procura existente por novas tecnologias de comunicação móveis. Estes fatores, entre outros, tornam viável a pesquisa para criar uma nova geração de comunicações móveis, a quinta geração.

Atualmente, procura-se implementar a quinta geração de comunicações móveis (5G). Segundo o projeto "*The 3rd Generation Partnership Project*", a expectativa é que tecnologias 5G comecem a ser comercializadas em 2020 [63]. No entanto, o 5G não será apenas uma atualização da quarta geração de comunicações móveis. Esta nova geração de comunicações móveis terá uma ampla gama de aplicações, principalmente no que à IoT diz respeito. Para além de melhorar a rapidez e a qualidade de serviço das comunicações móveis, em geral, a 5G vai ser utilizada em aplicações no domínio da IoT como controlo em tempo real, comunicação não crítica entre sensores e *gateways*, etc. Este leque enorme de aplicações de tecnologias 5G só é possível devido aos requisitos específicos que são apresentados na figura 3.7.

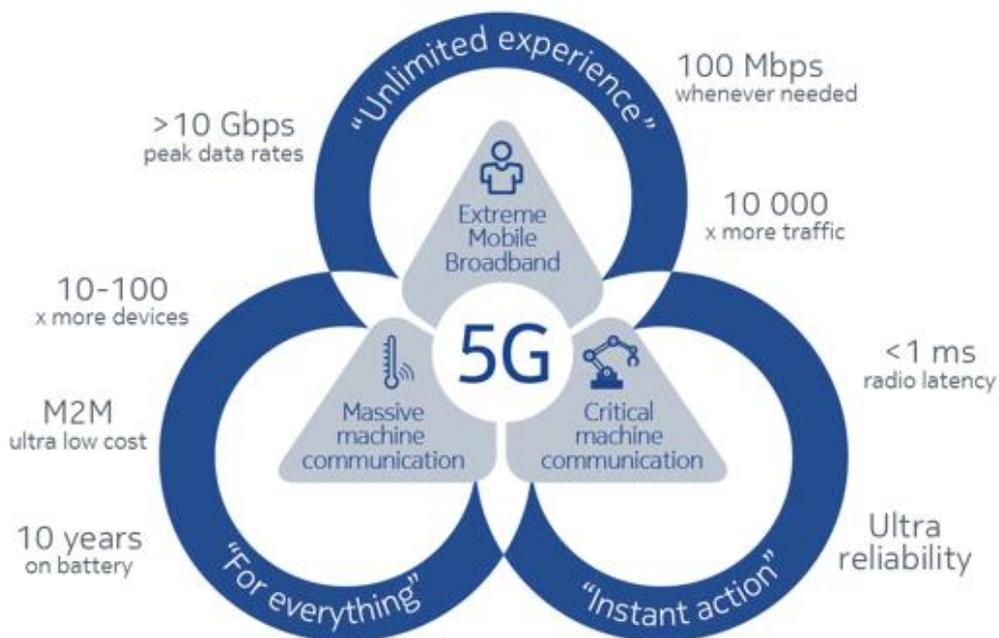


Figura 3.7 - Representação dos requisitos de uma tecnologia 5G [64].

Apesar dos requisitos apresentados, não é possível utilizar todos estes requisitos no seu potencial máximo, simultaneamente. Por exemplo, na comunicação não crítica entre sensores e *gateways*, é necessário um consumo energético muito baixo; no entanto, a taxa de transmissão de dados (largura de banda) pode ser baixa, ou seja, não é necessário utilizar todo o potencial da largura de banda, o que permite potencializar a redução do consumo energético. Portanto, é necessário introduzir uma técnica denominada divisão de redes 5G [65].

Esta técnica consiste em dividir uma rede 5G em várias sub-redes, como se pode observar na figura 3.8. Cada sub-rede tem uma funcionalidade diferente direcionada para um grupo específico de aplicações, extraindo diferentes níveis de potencial dos requisitos disponibilizados pelas tecnologias 5G. Cada sub-rede funciona de forma independente apesar de todas estarem ligadas à mesma “nuvem”.

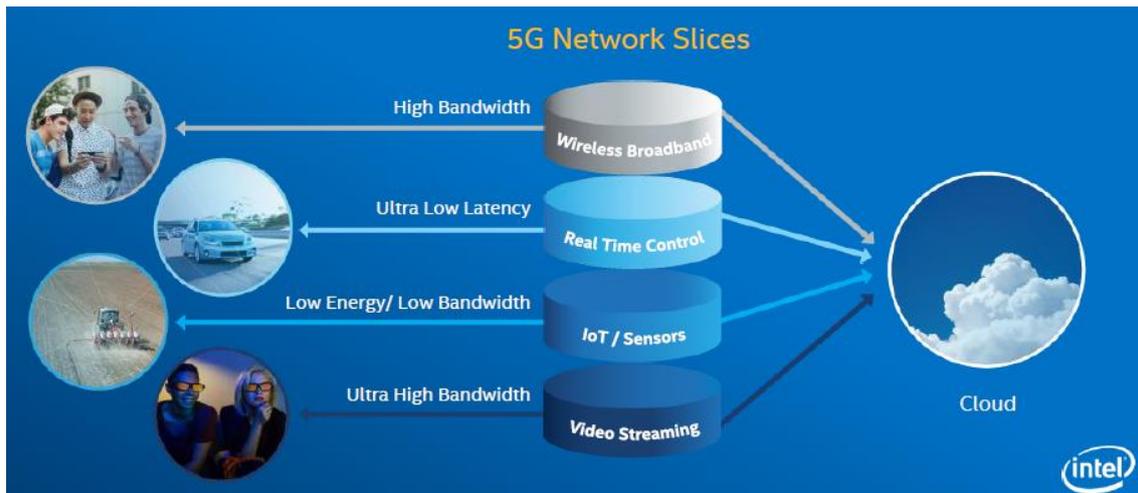


Figura 3.8 - Representação da divisão de uma rede 5G em várias sub-redes direcionadas para diferentes aplicações [66].

A heterogeneidade das redes 5G permite ajustar a exploração de recursos à necessidade de comunicação. Para existir esta heterogeneidade numa rede 5G, os dispositivos ligados à rede devem ser capazes de comunicar através de várias gamas de frequências, cobrindo várias ordens de grandeza, desde as centenas de kHz até às centenas de GHz, incluindo a atual tecnologia de comunicação 4G (LTE). As redes 5G vão incluir várias tecnologias, tais como, *mmWave*, *small Cells*, *Multiple-input multiple-output* (MIMO), comunicações Dispositivo-Dispositivo, etc [67].

Capítulo 4

Unidade de Temperatura e Humidade Relativa

4.1 Descrição do Hardware

A UTH é constituída por uma caixa com uma placa de circuito impresso no seu interior, como é possível observar na figura 4.1. Ao desenhar a placa, houve o cuidado de reduzir o número de circuitos integrados o mais possível para tornar a placa simples, mais barata e reduzir a probabilidade de avarias.

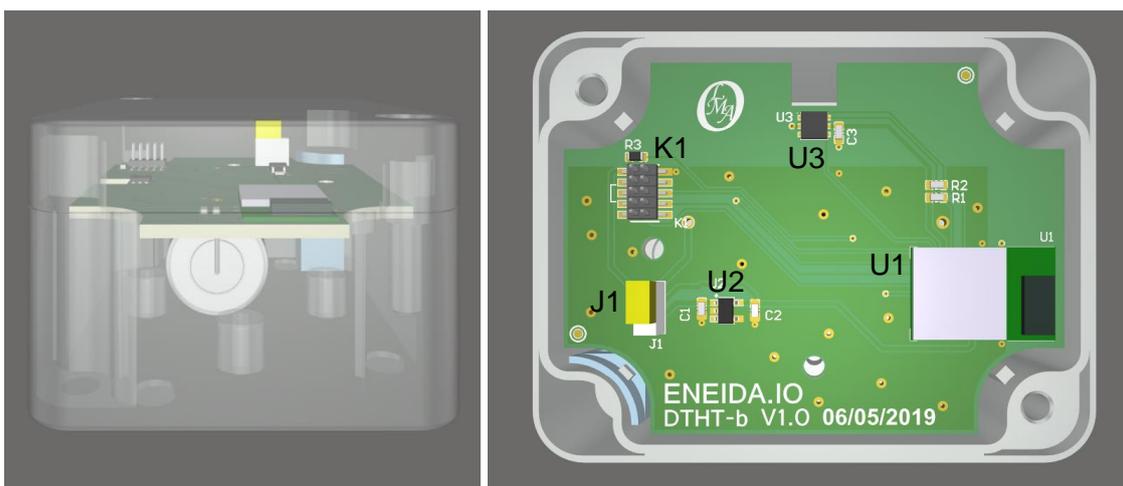


Figura 4.1 – Representação da estrutura da Unidade de Temperatura e Humidade Relativa. Na figura da esquerda é possível observar a Unidade num perfil lateral. Na figura da direita é possível observar a Unidade vista do topo e sem tampa. A placa foi realizada no sistema eletrónico CAD da Eneida. Legenda da placa: U3 – Sensor de humidade e temperatura; U1 – Módulo de processamento e comunicação; J1 – Jumper; U2 – Regulador de tensão; K1 – Adaptador Jtag

A placa de circuito impresso é constituída por uma bateria para alimentar a placa, vários componentes eletrónicos passivos, um adaptador JTAG e três circuitos integrados: o circuito do módulo de processamento e comunicação, o circuito do sensor de temperatura e humidade relativa e o circuito do regulador de tensão. Na figura 4.2 é apresentado um esquema da placa, já o esquemático da placa é apresentado no Anexo I. O adaptador JTAG permite programar e realizar o *debug* da placa de circuito impresso através de um *debugger* [68] ligado a um computador com *software* de programação compatível com o processador a utilizar. É importante referir que a placa contém um

jumper com a função de isolar a bateria dos restantes componentes de modo a estes serem alimentados apenas quando a placa for instalada no local pretendido e, assim não gastar bateria desnecessariamente. A bateria vai ser colocada na parte inferior da placa com o objetivo de não ser um obstáculo à comunicação e, portanto, não interferir com o alcance do BLE.



Figura 4.2 - Esquema da placa de circuito impresso. A pilha é o único elemento que fica na parte inferior da placa

4.1.1 Funcionamento da unidade

A unidade vai ter duas funções distintas: a comunicação e a medição de temperatura e humidade. No que diz respeito à comunicação o *bluetooth* vai estar no modo *advertising* durante dez segundos, uma vez que é um intervalo aceitável para comunicar com a UCD sem consumir muita energia. O período de comunicação tem de ser múltiplo de cinco, sendo o período de comunicação mínimo aceitável dez minutos, visto que a temperatura e humidade não vão variar significativamente, dentro e fora de um PT, durante um período inferior ao referido. Ainda assim, no que diz respeito às medições, a UTH vai realizar três medições de temperatura e humidade em cada intervalo de comunicação e envia a média tanto de temperatura como de humidade para a UCD. Definidas as variáveis de funcionamento é necessário que as funções estejam sincronizadas para que as três medições sejam realizadas dentro de intervalo de comunicação para a UTH comunicar para a UCD a média dessas três medições.

Para que a sincronização seja realizada de forma correta é necessário, primeiro que tudo definir uma forma iniciar a sincronização, isto é, iniciar as medições e o intervalo de comunicação simultaneamente. Assim sendo, a forma de iniciar a sincronização vai ser a primeira ligação BLE, ou seja, o *bluetooth* da UTH vai permanecer no modo *advertising* até a primeira ligação ser estabelecida. Após terminar a primeira ligação, o *bluetooth* transita para o modo *standby*, durante o intervalo de comunicação definido e, o sensor é ligado para começar a realizar medidas de

temperatura e humidade. O intervalo de comunicação é inicialmente dez minutos, o período mínimo aceitável, podendo ser atualizado pela UCD. Durante o intervalo de comunicação a sensor realiza três medições de temperatura e humidade em intervalos de tempo iguais. Após terminar o intervalo de comunicação o *bluetooth* transita do modo *standby* para o modo *advertising* no qual permanece durante dez segundos independentemente de estabelecer uma ligação ou não. Após terminar o intervalo de *advertising*, o *bluetooth* volta a transitar para o modo *standby* no qual permanece durante o intervalo de comunicação menos os dez segundos em que esteve no modo *advertising*, sendo que neste intervalo de comunicação volta a realizar três medições de temperatura e humidade, entrando assim, num ciclo infinito. Na figura que se segue, figura 4.3, é possível observar um esquema do funcionamento da unidade.

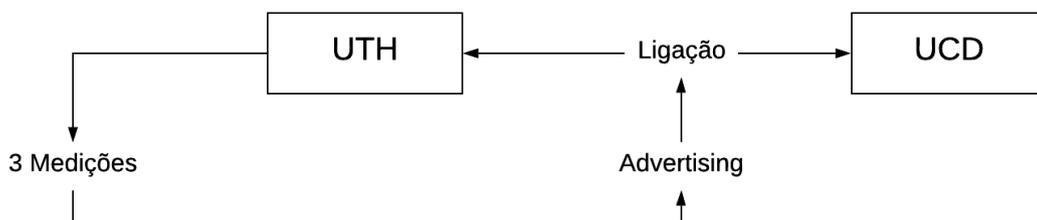


Figura 4.3 - Esquema que representa o funcionamento da UTH.

4.1.2 Módulo de Processamento e Comunicação

David Lima, na sua dissertação [69], apresenta um estudo realizado para determinar qual o módulo de processamento e comunicação indicado para integrar a unidade multissensorial do sistema de monitorização a implementar. O estudo realizado pelo autor revela que o módulo mais indicado a utilizar é o CC2650MODA da Texas Instruments (TI), realçando a inclusão da antena no módulo, um processador dedicado à comunicação e outro processador para controlar sensores, a facilidade em adquirir este módulo e, toda a documentação *online* existente que facilita a programação deste módulo. Para além de todos os argumentos enumerados é importante referir que este módulo possui um Kit de desenvolvimento, o LAUNCHXL-CC2650, que pode ser utilizado na fase de testes facilitando a programação da placa e, permite economizar tempo, uma vez que a programação da placa se pode realizar enquanto esta é

fabricada. Portanto, o módulo de comunicação e processamento a utilizar nesta unidade é o CC2650MODA.

O módulo CC2650MODA [70] é um microcontrolador, desenhado para comunicações BLE, que possui um processador principal de 32 bits, o ARM Cortex-M3, um processador dedicado à comunicação, o ARM Cortex-M0, e um controlador de sensores de 16 bits. O controlador de sensores tem a capacidade de obter dados de sensores externos enquanto o resto do sistema está adormecido, permitindo assim economizar energia na obtenção de dados. A *stack* do BLE e o protocolo de acesso médio IEEE 802.15.4 estão embebidos na ROM e correm parcialmente no ARM Cortex-M0, libertando espaço na memória *flash*. É importante referir que este módulo possui uma interface JTAG para realizar o *debug* da placa. O diagrama de blocos do módulo CC2650MODA é apresentado no Anexo II.

4.1.3 Sensor de Temperatura e Humidade Relativa

O sensor a seleccionar deve ser capaz de medir temperaturas e humidade relativa nos ambientes em que for inserido, logo serão excluídos sensores que não têm capacidade para medir temperatura entre -20 °C e 60 °C e humidades relativas entre 0% e 100%. Na tabela 4.1, é possível observar três sensores e as suas principais características.

Tabela 4.1 - Lista de sensores com várias características dos mesmos

Sensor	Fabricante	Package	Accuracy T (°C)	Accuracy RH (%)	Sleep Current (nA)	Supply voltage (V)	Preço/1000 unidades (€)
SHTC3	Sensirion	DFN	±0.2	±2	300	1,62-3,6	1,59
HDC2080	TI	WSO8	±0.2	±2	50	1,62-3,6	1,17
HDC2010	TI	DSBGA	±0.2	±2	50	1,62-3,6	1,02

O sensor vai realizar três medições, tanto de temperatura como humidade relativa, durante o intervalo de comunicação o que significa que a maior parte do tempo vai estar adormecido, portanto o consumo no modo adormecido vai ser um fator importante para seleccionar o sensor a utilizar na unidade. Assim, o sensor SHTC3 será excluído, uma vez que a corrente consumida pelo sensor no modo adormecido é seis vezes superior à corrente consumida pelos restantes sensores no mesmo modo.

Comparando os dois sensores da TI é possível observar que a diferença, das principais características, é a montagem e o preço. O HDC2080 [71] possui a janela,

que permite medir a humidade relativa, na parte de cima do encapsulamento enquanto que o HDC2010 [72] possui a mesma janela na parte de baixo do encapsulamento. Assim a montagem dos sensores na placa de circuito impresso vai ser diferente, como é possível observar na figura 4.4.

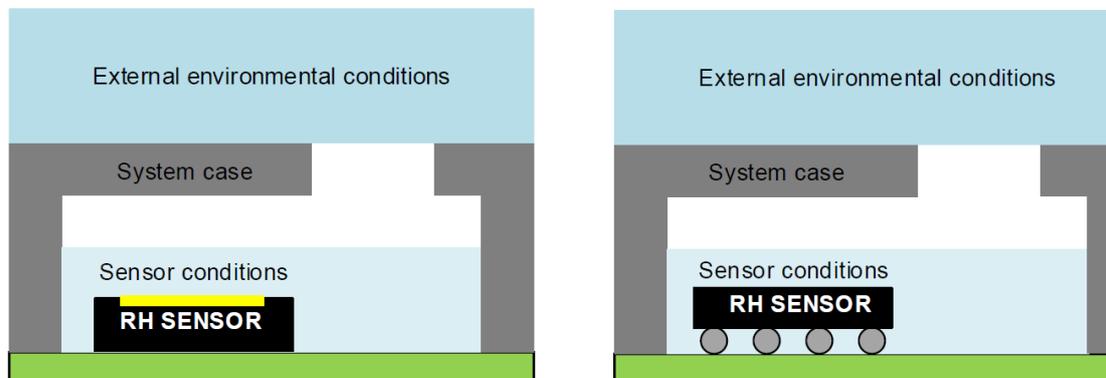


Figura 4.4 - Representação da montagem do sensor HDC2080 à esquerda e do sensor HDC2010 à direita. Na imagem da esquerda é possível observar a janela representada a amarelo [73].

Apesar do sensor HDC2010 ser mais barato, optou-se por escolher o sensor HDC2080, uma vez que a montagem do sensor HDC2010 é propícia a acumular partículas entre a placa de circuito impresso e a janela do sensor o que pode interferir com a medição da humidade.

Após a escolha do sensor, colocou-se a questão de utilizar um filtro protetor para proteger a janela do sensor de partículas, no entanto após a leitura do guia de montagem de sensores de humidade da TI [73] e da análise das dimensões da janela do sensor, concluiu-se que a melhor opção era não utilizar um filtro protetor, uma vez que as dimensões da janela são muito reduzidas e a colocação do sensor numa posição estratégica dentro da caixa, como se pode observar na figura 4.5, reduz a probabilidade de contaminação da janela.

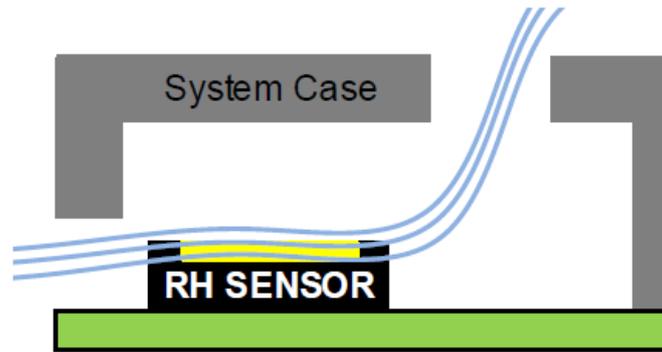


Figura 4.5 - Representação do esquema de montagem do sensor na placa de circuito impresso tendo em conta a posição relativa do sensor com as aberturas na caixa [73].

É importante referir que são colocadas duas aberturas com diâmetro reduzido na caixa para promover a circulação de ar e, conseqüentemente reduzir o tempo de resposta a uma alteração das variáveis a medir. As aberturas têm de ser feitas de modo a que o ar em circulação alcance o sensor, portanto uma das aberturas vai ser na parte superior da tampa e a outra abertura idealmente seria na parte lateral da tampa. No entanto a parte lateral da tampa não pode ser perfurada porque contém um material isolador, logo a solução encontrada foi a realização de um buraco na placa ao lado do sensor, como se pode observar nas figuras 4.1 e 4.2, e a perfuração da caixa a uma altura inferior à placa. O sensor deve ser colocado na placa de circuito impresso distante de fontes de calor para a medida da temperatura não ser influenciada pelas mesmas.

4.1.4 Bateria e Regulador de Tensão

4.1.4.1 Consumo Total

Para selecionar uma bateria é necessário estimar o consumo total diário do sistema e o consumo total para dez anos, uma vez que é o valor referência de longevidade para dispositivos IoT. O consumo desta unidade vai ser dividido em duas partes: o consumo relativo ao sensor HDC2080 e o consumo relativo ao módulo CC2650MODA.

O sensor, que está no modo adormecido, vai “acordar” três vezes durante cada período de comunicação para realizar uma medição. Os valores dos consumos do sensor e da duração das medições de temperatura e humidade relativa, bem como o valor da duração que o sensor leva para transitar do modo adormecido para o modo ativo podem ser consultados na *datasheet* [71] do próprio sensor.

Durante as medições o CC2650MODA está no modo IDLE, uma vez que permite ter o controlador de sensores ativo e permite comunicações através do protocolo de comunicação I2C. Os valores transmitidos pelo sensor são guardados na memória *flash* que pode ser utilizada no modo IDLE. A cada dez minutos (tempo de comunicação mínimo aceitável para realizar as medições de consumos e, portanto, o de maior consumo energético), o CC2650MODA vai comunicar com a unidade concentradora de dados transmitindo a média das medições realizadas, tanto para temperatura como para a humidade, sob a forma de mensagem. Para realizar a média dos valores e, conseqüentemente, a comunicação através de BLE o módulo vai transitar do modo IDLE para o modo ativo. Todos os valores de consumos e durações relativos ao módulo CC2650MODA podem ser consultados na sua *datasheet* [70].

No documento “Measuring Bluetooth Low Energy Power consumption” [74] é apresentado, para um módulo CC2650 com um perfil Periférico, o consumo relativo: a um evento de *advertising*, com um intervalo de *advertising* de cem milissegundos; e a uma ligação, com o intervalo de ligação definido como um segundo. No evento de *advertising* há um consumo de $72,67\text{ mA}$ durante $4,10 \times 10^{-3}$ segundos, enquanto que na ligação, entre o dispositivo periférico e um dispositivo central, há um consumo de $29,43\text{ mA}$ durante $2,44 \times 10^{-3}$ segundos. No mesmo documento é demonstrado que durante um evento de *advertising* e de ligação o consumo no modo Standby é desprezável. O BLE, na UTH, vai ser programado para estar no modo *Standby* e, a cada período de comunicação que neste caso concreto é dez minutos, passa para o modo *Advertising* durante dez segundos, com um intervalo, entre eventos de *advertising*, de dois segundos. Considerando que existe uma ligação apenas no final do dos dez segundos, vão existir cinco eventos de *advertising* e um evento de ligação. Portanto, em cada processo de comunicação há um consumo, por parte do dispositivo com perfil periférico, de $72,67\text{ mA}$ durante $2,05 \times 10^{-2}$ segundos devido a eventos de *advertising* e $29,43\text{ mA}$ durante $2,44 \times 10^{-3}$ segundos devido à ligação

Na tabela 4.2 são apresentados todos os consumos do sensor HDC2080 e do módulo de comunicação CC2650MODA. É também apresentada a estimativa do consumo total diário assim como a estimativa do consumo para dez anos.

Tabela 4.2 - Apresentação da estimativa dos consumos diários do sensor HDC2080 e do módulo CC2650MODA e dos consumos diário e durante 10 anos da Unidade

Consumo Diário Sensor HDC 2080			
Parâmetro	Corrente (A)	Duração (h)	Consumo (Ah)
Medição RH	650×10^{-6}	$7,9 \times 10^{-5}$	$5,14 \times 10^{-8}$
Medição T ^o	550×10^{-6}	$7,32 \times 10^{-5}$	$4,03 \times 10^{-8}$
Modo Adormecido	5×10^{-8}	23,99	$1,20 \times 10^{-6}$
Start up	80×10^{-6}	$3,6 \times 10^{-4}$	$2,88 \times 10^{-8}$
Consumo Diário Módulo CC2650MODA			
Parâmetro	Corrente (A)	Duração (h)	Consumo (Ah)
Medição RH	582×10^{-6}	$7,9 \times 10^{-5}$	$4,60 \times 10^{-8}$
Medição T ^o	582×10^{-6}	$7,32 \times 10^{-5}$	$4,26 \times 10^{-8}$
Modo Adormecido	10×10^{-8}	23,99	$2,40 \times 10^{-6}$
Transição IDLE-Active	550×10^{-6}	$5,6 \times 10^{-7}$	$3,08 \times 10^{-10}$
Comunicação	0,029	$9,76 \times 10^{-5}$	$2,87 \times 10^{-6}$
Advertising	0,072	$8,2 \times 10^{-4}$	$5,93 \times 10^{-5}$
Consumo Total Diário			$6,60 \times 10^{-5}$
Consumo 10 anos			0,24

4.1.4.2 Bateria e Regulador de Tensão

A bateria a incorporar na unidade é responsável por alimentar todo o sistema e é um dos elementos mais caros do sistema. Para garantir o melhor desempenho possível de todo o sistema é necessário garantir que tanto o módulo de comunicação como o sensor são alimentados de forma correta pela bateria, logo as características mais importantes a estudar das baterias são a capacidade nominal e a curva de descarga.

No que diz respeito à curva de descarga é necessário garantir, pela observação da curva, que a bateria disponibiliza uma tensão nos terminais dos elementos a alimentar que seja suficiente para garantir o funcionamento dos mesmos. Todas as baterias que são apresentadas na tabela 4.3 garantem esse funcionamento. Tanto o sensor como o módulo de comunicação vão oscilar entre o modo adormecido e o modo ativo, logo a corrente vai variar. A consequência da variação da corrente é a variação da tensão e, portanto, para evitar picos de tensão e garantir o melhor desempenho

possível do sistema vai ser utilizado um regulador de tensão, o TPS78233DDC [75] da TI.

Tabela 4.3 - Lista de baterias com várias características das mesmas

Bateria	Fabricante	Tensão Nominal (V)	Capacidade Nominal (Ah)	Preço /1000 unidades (€)
LS17500	Saft	3,6	1,2	4,67
LS14250	Saft	3,6	3,6	7,43
TL5101	Tadiran	3,6	0,95	5,70
SL550	Tadiran	3,6	0,8	9,56

Observando as baterias apresentadas na tabela e tendo em conta a estimativa do consumo realizado na subsecção anterior pode-se concluir que a bateria mais indicada a utilizar é a bateria LS14250 [76]. A diferença entre a capacidade nominal e o consumo estimado para dez anos pode parecer exagerada, no entanto é necessário ter em conta que este consumo é apenas uma estimativa e durante este período a bateria vai sofrer degradação e, conseqüentemente, a sua capacidade nominal vai diminuir.

4.2 Custo de Produção

No domínio académico, muitas vezes, quando se desenvolve um produto procura-se que este seja constituído pelas últimas tecnologias disponíveis no mercado sem estudar as necessidades do mercado ou ter em conta a estimativa do preço final do produto. No entanto, em engenharia, quando se está a desenvolver um novo produto todos os fatores, como as tecnologias a utilizar, a procura do mercado e o custo final do produto são explorados, estudados e ajustados, para desenvolver o melhor produto possível. Uma empresa pode desenvolver um produto com as tecnologias mais avançadas, mas se não houver procura desse produto no mercado ou não for viável do ponto de vista económico, não vão existir vendas.

Todos os componentes da unidade de temperatura e humidade relativa selecionados apresentavam o melhor equilíbrio entre as melhores tecnologias e o preço mais acessível (preços retirados das principais distribuidoras de eletrónica para mil unidades de um certo produto), entre as várias opções estudadas, de modo a tornar o produto competitivo no mercado. No entanto, uma empresa que pretende realizar um produto em quantidades industriais tem, sempre, parceiros industriais, o que permite

negociar os preços dos componentes do seu produto e, assim, reduzir o custo de produção. Portanto na tabela que se segue, tabela 4.4, vai ser apresentada uma estimativa do custo de produção da unidade de temperatura e humidade relativa.

Tabela 4.4 - Apresentação da estimativa do custo de produção da Unidade de temperatura de humidade relativa e dos respetivos componentes da mesma

Componente	Preço Indicativo
Caixa Protetora	6,70 €
Módulo de Comunicação	5,43 €
Bateria	4,67 €
Regulador de Tensão	0,30 €
Sensor	1,17 €
Restantes Componentes	1,11 €
Placa de circuito impresso e montagem	4,11 €
Preço Final	23,49 €

4.3 Fase de Testes

4.3.1 Primeira Fase de Testes

Na primeira fase de testes foi utilizado o Kit de Desenvolvimento LAUNCHXL-CC2650 [77] e uma placa de circuito impresso com o sensor HDC2080 montado, como se pode observar na figura 4.6. Para programar o sistema foram utilizados os *softwares* de programação Code Composer Studio (CCS) e o Sensor Controller Studio (SCS).

O SCS, que é um *software* disponibilizado pela TI, gratuitamente, permite programar o controlador de sensores do microcontrolador de modo a que o sensor HDC2080 realize medidas de temperatura e humidade relativa e fique o resto do tempo no modo adormecido. Este *software* permite ainda gerar ficheiros com o algoritmo programado para integrar no CCS. O CSS permite criar um projeto com uma aplicação BLE para ser compilado no LAUNCHXL-CC2650. A aplicação BLE tem de ser configurada para com o perfil GAP periférico e, é necessário criar um serviço com duas características: uma característica que permita à unidade concentradora de dados

configurar o intervalo de comunicação e outra característica que permita ler o valor da temperatura e da humidade relativa.

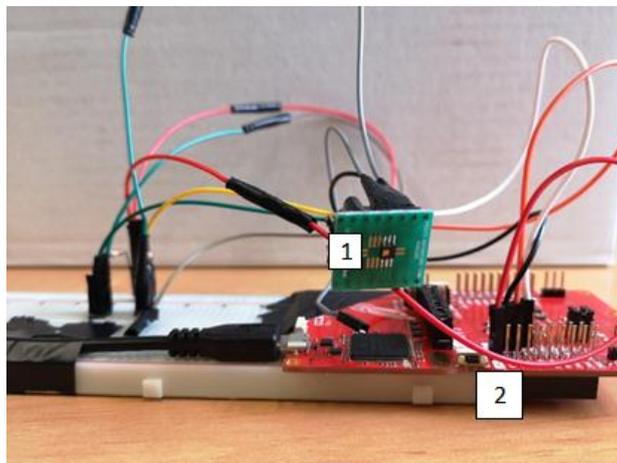


Figura 4.6 - Protótipo com o sensor montado na placa e o kit de desenvolvimento Launchxl – CC2650. Legenda: 1 – Sensor montado na placa; 2 – Kit de desenvolvimento

Os ficheiros gerados no SCS vão ser importados para o projeto, uma vez que têm o algoritmo para realizar as medições de temperatura e humidade relativa. Após importar esses ficheiros, vai ser criada uma *task* que vai alocar memória para guardar os valores das medições realizadas e atualizar o valor da característica da temperatura e da humidade relativa com a média dos valores guardados para posteriormente serem comunicados à unidade concentradora de dados. A UCD que vai comunicar com a unidade de temperatura e humidade a cada intervalo de comunicação definido pela mesma ao configurar a característica com essa função, caso não seja configurado o valor referência do intervalo de comunicação é dez minutos. Houve o cuidado de respeitar e programar a unidade de acordo com o ciclo de funcionamento apresentado na secção 4.1.1. É importante referir que antes de ser compilado o projeto com a aplicação BLE deve ser complicado o projeto que contém a *stack* do BLE e está disponível no *website* da TI.

Concluída a programação da unidade, realizou-se um teste com uma frequência de comunicação de um minuto. É de notar que esta frequência é aceitável apenas em condições de testes, uma vez que não é uma frequência aceitável pela unidade. Através do PuTTY, um programa que permite visualizar as mensagens enviadas para o terminal da porta de ligação USB do computador à unidade, é possível monitorizar a atividade da unidade através de mensagens colocadas ao longo do código. Na figura que se segue, figura 4.7, é possível observar uma imagem do PuTTY com as mensagens que permitem monitorizar a atividade da unidade.

```

COM6 - PuTTY
#000005 [ 0.019 ] INFO: (project_zero.c:760) GAP is started. Our address: 0x98072D9A8287
#000006 [ 0.019 ] INFO: (project_zero.c:766) Advertising
#000007 [ 6.031 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 6, Sending msg to app.
#000008 [ 6.031 ] INFO: (project_zero.c:779) Connected. Peer address: 0x5D532B773F5A
#000009 [ 8.571 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 4, Sending msg to app.
#000010 [ 8.572 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 2, Sending msg to app.
#000011 [ 9.573 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 4, Sending msg to app.
#000012 [ 9.573 ] INFO: (project_zero.c:688) Disconnected
#000013 [ 9.573 ] INFO: (project_zero.c:689) Standby
#000014 [ 9.573 ] INFO: (project_zero.c:691) Começou a task de medicao
#000015 [ 28.572 ] INFO: (measure_task.c:282) Humidade Relativa (valor em hexadecimal): 0xadb2
#000016 [ 28.572 ] INFO: (measure_task.c:283) Temperatura (valor em hexadecimal): 0x5e94
#000017 [ 48.572 ] INFO: (measure_task.c:282) Humidade Relativa (valor em hexadecimal): 0xad89
#000018 [ 48.572 ] INFO: (measure_task.c:283) Temperatura (valor em hexadecimal): 0x5e95
#000019 [ 68.572 ] INFO: (measure_task.c:282) Humidade Relativa (valor em hexadecimal): 0xad68
#000020 [ 68.572 ] INFO: (measure_task.c:283) Temperatura (valor em hexadecimal): 0x5ea0
#000021 [ 68.572 ] INFO: (measure_task.c:300) media Humidade Relativa: 67
#000022 [ 68.572 ] INFO: (measure_task.c:301) media Temperatura: 20
#000023 [ 69.573 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 2, Sending msg to app.
#000024 [ 69.573 ] INFO: (project_zero.c:702) Advertising
#000025 [ 73.584 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 6, Sending msg to app.
#000026 [ 73.584 ] INFO: (project_zero.c:779) Connected. Peer address: 0x5D532B773F5A
#000027 [ 75.998 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 4, Sending msg to app.
#000028 [ 75.999 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 2, Sending msg to app.
#000029 [ 79.574 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 4, Sending msg to app.
#000030 [ 79.574 ] INFO: (project_zero.c:688) Disconnected
#000031 [ 79.574 ] INFO: (project_zero.c:689) Standby
#000032 [ 88.572 ] INFO: (measure_task.c:282) Humidade Relativa (valor em hexadecimal): 0xad61
#000033 [ 88.572 ] INFO: (measure_task.c:283) Temperatura (valor em hexadecimal): 0x5e9d
#000034 [ 108.572 ] INFO: (measure_task.c:282) Humidade Relativa (valor em hexadecimal): 0xad40
#000035 [ 108.572 ] INFO: (measure_task.c:283) Temperatura (valor em hexadecimal): 0x5ea6
#000036 [ 128.572 ] INFO: (measure_task.c:282) Humidade Relativa (valor em hexadecimal): 0xad25
#000037 [ 128.572 ] INFO: (measure_task.c:283) Temperatura (valor em hexadecimal): 0x5ea3
#000038 [ 128.572 ] INFO: (measure_task.c:300) media Humidade Relativa: 67
#000039 [ 128.572 ] INFO: (measure_task.c:301) media Temperatura: 20
#000040 [ 129.574 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 2, Sending msg to app.
#000041 [ 129.574 ] INFO: (project_zero.c:702) Advertising
#000042 [ 137.598 ] INFO: (project_zero.c:1096) (CB) GAP State change: 6, Sending msg to app.
#000043 [ 137.598 ] INFO: (project_zero.c:779) Connected. Peer address: 0x73BED8C4E3A9
#000044 [ 139.574 ] INFO: (project_zero.c:688) Disconnected
#000045 [ 139.574 ] INFO: (project_zero.c:689) Standby

```

Figura 4.7 - Imagem onde é possível observar a atividade da unidade

Na figura é possível observar que a unidade fica no modo *advertising* até existir uma ligação pela primeira vez. Após terminar a primeira ligação o *bluetooth* transita para o modo *standby* durante sessenta segundos e, durante esse intervalo são realizadas três medições tanto de temperatura como de humidade, sendo atualizado o valor da característica com o valor da média da temperatura e a média da humidade após a realização das três medidas. Terminado o intervalo no modo *standby*, o *bluetooth* transita novamente para o modo *advertising* permanecendo dez segundos neste modo, independentemente de estabelecer uma ligação ou não durante esse período. Passados dez segundos o *bluetooth* transita novamente para o modo *standby* mas desta vez, e nas seguintes, permanece apenas cinquenta segundos uma vez que, o período de comunicação é sessenta segundos e já esteve dez segundos no modo *advertising*. Durante este intervalo realiza novamente três medições de temperatura e humidade, atualizando a respetiva característica. Passados os sessenta segundos o Bluetooth volta a transitar para o modo *advertising* e este ciclo repete-se até que o período de comunicação seja alterado. Com a realização do teste descrito comprovou-se o bom funcionamento do protótipo da unidade

4.3.2 Segunda fase de Testes

Terminada a primeira fase de testes, realizou-se uma segunda fase de testes que consistiu em implementar o código na UTH. Para implementar o código na UTH é necessário um cabo de ligação que permite conectar a interface *Jtag* da placa da UTH à interface *Jtag* do kit de desenvolvimento, uma vez que este possui um *debugger* que permite implementar o código na UTH através da ligação *Jtag*. Para estabelecer a ligação é necessário primeiro remover os *jumper*s que conectam a interface *Jtag* ao módulo CC2650 do kit de desenvolvimento [78]. Na figura que se segue está representada a ligação entre o kit de desenvolvimento e a UTH. É importante referir que o cabo de ligação não deve ser muito comprido (maior que 10 *cm*) para precaver falhas de comunicação devido à perda de sinal ao longo do cabo.

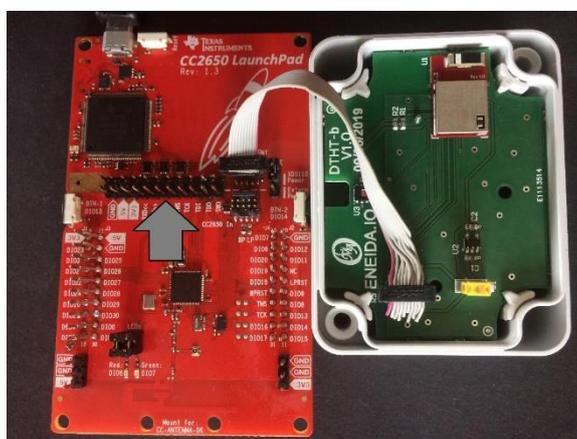


Figura 4.8 – Representação da ligação necessária para implementar o código na UTH. A seta cinzenta indica os pinos onde é necessário remover os *jumper*s. Nesta imagem os *jumper*s já foram removidos

O kit de desenvolvimento possui um módulo CC2650 7 x 7 QFN, já a placa desenvolvida no âmbito deste projeto possui um módulo CC2650MODA 5 x 5 QFN o que significa que o número de entradas e saídas de cada módulo vai ser diferente. Assim é necessário realizar alterações no código elaborado para implementar no módulo CC2650 do kit de desenvolvimento, de acordo com o tutorial [78].

Concluídas todas as alterações necessárias no código foi realizado um teste de ligação, através do ficheiro *target configuration* do projeto. O teste de ligação é uma funcionalidade do CCS, que permite verificar se a ligação *Jtag* está correta para posteriormente implementar o código na unidade. Na figura 4.9 é possível observar o teste realizado.

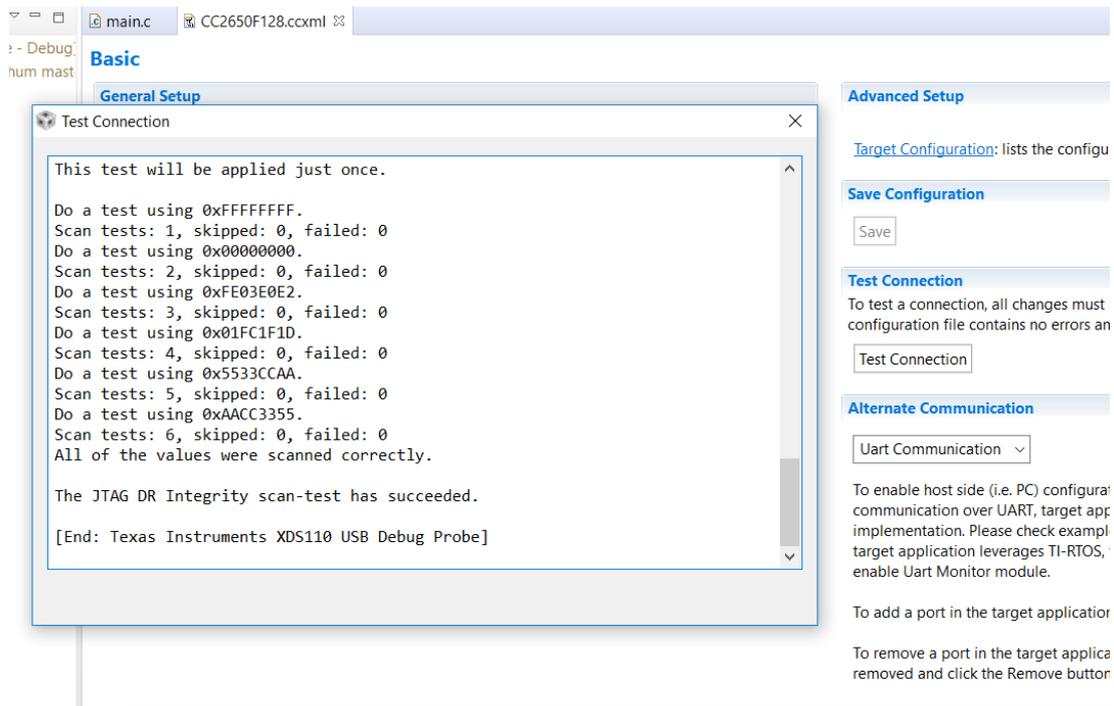


Figura 4.9 – Resultado do teste de ligação.

Concluído o teste de ligação foi implementado o código na UTH. Para testar a funcionalidade da unidade, programou-se um Raspberry Pi 3 [79] para se ligar à UTH através de BLE a cada dez minutos, guardando o valor da temperatura, da humidade relativa, a data e hora em que comunicou com a unidade num ficheiro de texto. Após um dia de comunicação, o resultado é apresentado nas seguintes figuras.

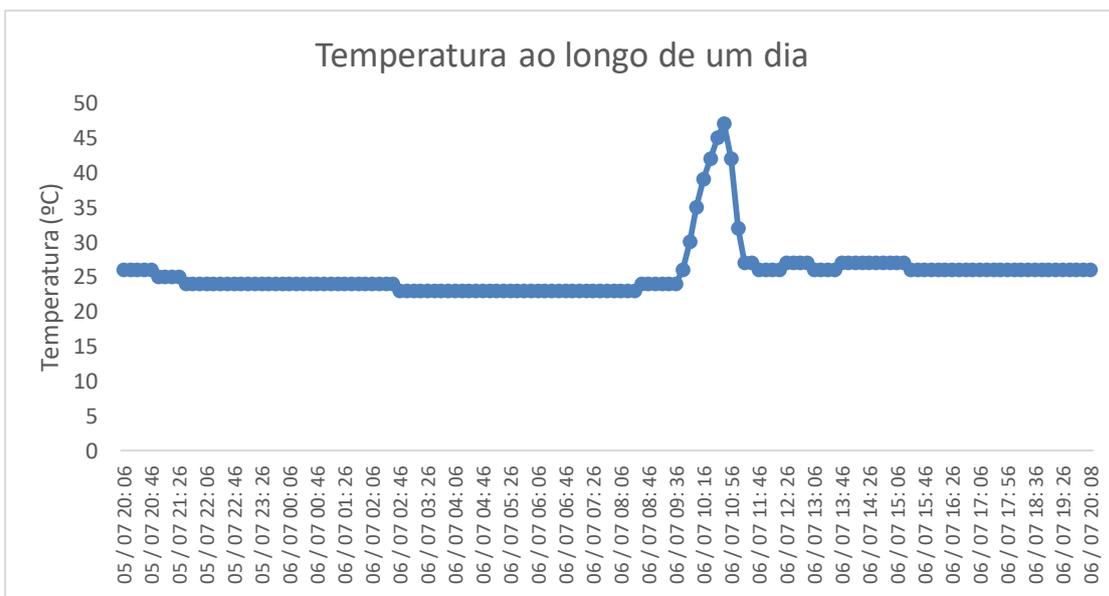


Figura 4.10 – Gráfico de temperatura ao longo de um dia.

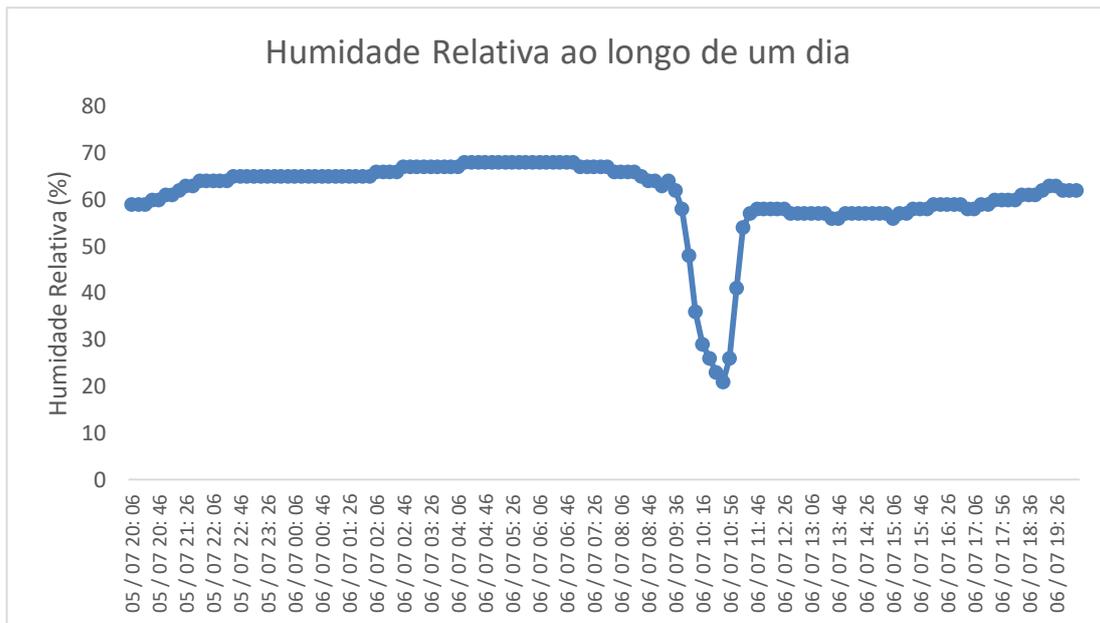


Figura 4.11 - Gráfico da humidade relativa ao longo de um dia.

Ao observar as figuras 4.10 e 4.11 destaca-se um aumento repentino de temperatura e um decréscimo elevado na humidade. Para a realização do teste, a UTH foi colocada no peitoril de uma janela no interior de uma sala de estar, como é possível observar na figura 4.12.

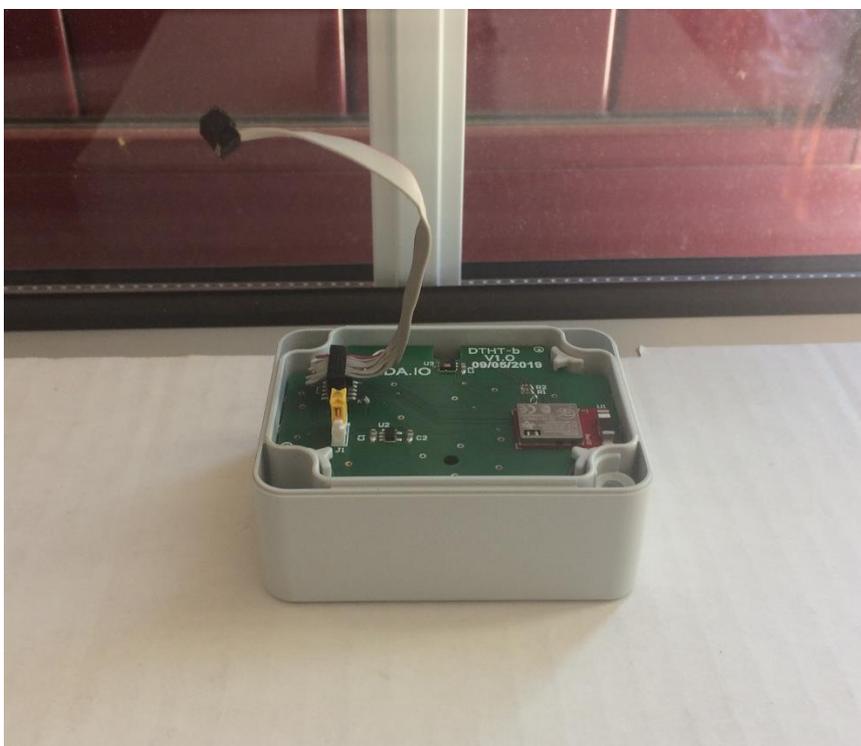


Figura 4.12 - Imagem representativa da posição da unidade durante o teste realizado. É importante referir que o cabo não foi retirado porque é frágil e, numa fase de testes, não é aconselhado retirar o cabo uma vez que há a necessidade de o utilizar várias vezes.

Às nove horas e trinta e seis minutos do dia cinco foi aberta a portada e o sol ficou em contacto direto com a janela, aquecendo a janela que por sua vez fez com que a temperatura nas zonas próximas do sensor aumentasse e a humidade diminuísse. Este processo estava a adulterar os valores reais de temperatura e humidade no interior da sala e, por esta razão a portada foi novamente fechada e os valores voltaram ao normal.

Capítulo 5

Unidade Concentradora de Dados

5.1 Tecnologia de comunicação

No capítulo 3 são apresentadas tecnologias de comunicação de longo alcance que podem ser incorporadas na UCD. Entre as tecnologias exploradas, atualmente, a tecnologia que mais se enquadra nos requisitos para a comunicação externa é o GPRS devido à ampla cobertura geográfica e ao custo reduzido dos módulos que incorporam esta tecnologia. No entanto, é necessário lembrar que tecnologias 5G deverão entrar em exploração no mercado das redes públicas de telecomunicações a partir 2020 e, as operadoras de redes móveis não vão manter as infraestruturas de todas as gerações de comunicações de redes móveis. Assim sendo, é possível e, até já há vários países europeus a dar indicações, que os serviços com tecnologias 2G vão ser terminados assim que tecnologias 5G sejam comercializadas. No que diz respeito às tecnologias LPWAN, o grande problema é a cobertura geográfica. Todas as localidades com energia elétrica possuem vários PT, logo a tecnologia a utilizar para a comunicação externa tem de possuir uma boa cobertura geográfica para não existirem falhas de comunicação. Apesar de ser uma tecnologia LPWAN, a NB-IoT é uma tecnologia que possui um baixo custo de implementação e uma boa cobertura geográfica [80], principalmente na Europa, uma vez que é compatível com as infraestruturas de LTE. Por exemplo, em Portugal, a Altice anunciou o propósito de cobertura de todo o território nacional com NB-IoT até 2019 [81]. Porém, apesar da NB-IoT parecer a tecnologia mais apetecível de utilizar, o preço dos módulos com esta tecnologia são muito caros quando comparados com os módulos das outras tecnologias LPWAN [46]. A tecnologia LTE é uma opção a ter em conta, uma vez que a grande desvantagem desta tecnologia, o consumo energético elevado, não é um problema visto que a unidade concentradora de

dados está ligada ao quadro elétrico do PT. Assim sendo a escolha, para um futuro próximo, recai para a tecnologia LTE, uma vez que é uma tecnologia que vai estar disponível nos mercados nos próximos anos, possui uma boa cobertura geográfica a nível mundial e os módulos com esta tecnologia têm um preço acessível. No entanto é importante referir que o mercado espera com grande expectativa as tecnologias 5G, facto que pode provocar uma grande revolução no mercado das tecnologias de comunicação de longo alcance.

Apesar de toda a discussão sobre as tecnologias de comunicação que a UCD deve ou não incorporar é importante referir que a tecnologia de comunicação de longo alcance não é o elemento mais importante da UCD, uma vez que esta tecnologia é apenas um meio para transmitir os relatórios e alarmes produzidos pelo elemento de maior importância: o algoritmo a implementar. A tecnologia de comunicação remota deverá ser seleccionada em cada caso de aplicação, uma vez que depende da região geográfica e da ocasião em que irão ser instalados estes sistemas visto que o mercado das tecnologias de comunicação não é estático.

Assim foi realizada uma prova de conceito em que uma unidade de temperatura de humidade comunica, em períodos de dez minutos, através de BLE com um Raspberry pi 3, que realiza as funções da UCD. Uma vez que o Raspberry comunica apenas com uma unidade sensorial, não vai realizar nenhum tratamento de dados, enviando diretamente, com a mesma frequência de comunicação entre a UTH e o Raspberry, os valores de temperatura e humidade recebidos para a plataforma. Devido ao facto de ser apenas uma prova de conceito, procurou-se uma plataforma, já existente, onde fosse possível visualizar os dados enviados pelo Raspberry, sendo a plataforma Microsoft Azure a mais indicada para o pretendido. A plataforma Microsoft Azure possui uma aplicação, o Azure IoT Central [82], que é um serviço na forma de produto permitindo a ligação de múltiplos dispositivos, de forma segura, através de wi-fi. Esta aplicação, que pode ser utilizada de forma gratuita durante sete dias, permite ao utilizador personalizar a sua aplicação de forma a receber os dados de um ou mais dispositivos e visualizar os mesmos sob a forma de gráficos. O esquema do sistema é apresentado na figura que se segue.

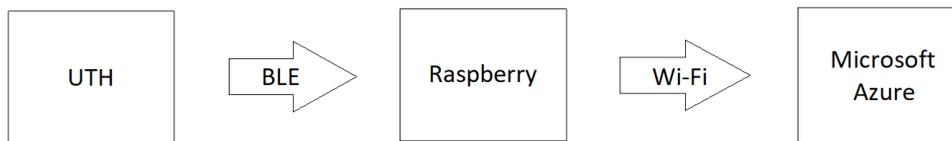


Figura 5.1 - Esquema do sistema utilizado para realizar a prova de conceito no que diz respeito à comunicação do sistema

A prova de conceito realizou-se durante 1 hora sendo que na plataforma é possível visualizar os gráficos relativos a vários períodos de tempo. Na figura que se segue, figura 5.2, é possível visualizar os gráficos de temperatura e humidade relativamente ao período compreendido entre as 22:15 horas do dia 6 de junho e as 23:16 horas do mesmo dia.

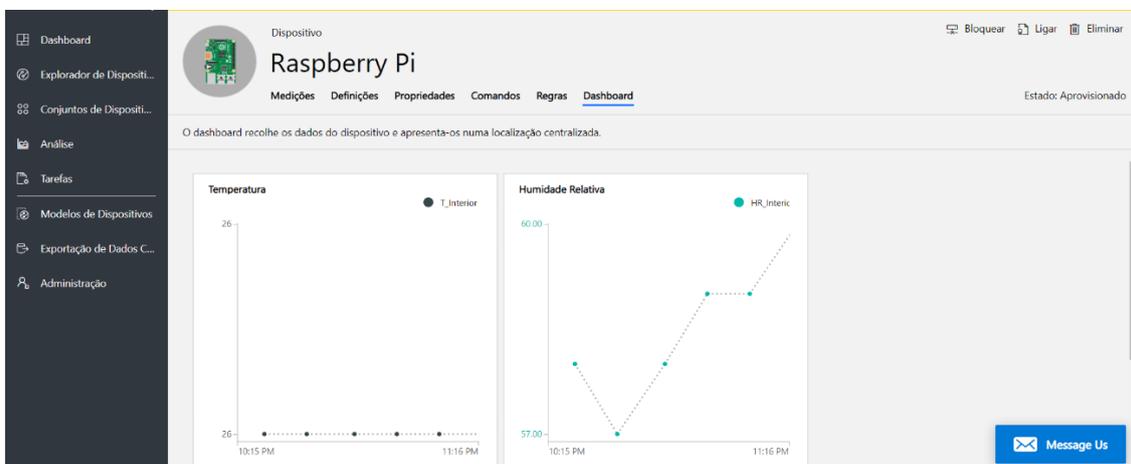


Figura 5.2 – Gráficos apresentados na aplicação IoT Central da plataforma Microsoft Azure

5.2 Algoritmo de fusão e análise de dados

5.2.1 Fusão Sensorial

A UCD desempenha a função de *gateway* garantindo a comunicação com as unidades dentro do PT através de BLE e com uma plataforma através de uma tecnologia de comunicação de longo alcance. No entanto, a função principal desta unidade é realizar a fusão sensorial e análise dos dados extraíndo o máximo de informação possível dos dados obtidos pelas unidades sensoriais de modo a enviar, para uma plataforma online, apenas relatórios informativos sobre o estado do transformador e, alarmes sempre que assim for necessário. Esta abordagem tem como principal objetivo

reduzir a quantidade de dados enviados para os servidores.

Na tabela que se segue, tabela 5.1, são enumeradas as variáveis que são medidas com as unidades sensoriais.

Tabela 5.1 - Lista de variáveis medidas pelas várias unidades sensoriais distribuídas pelo Posto de Transformação

Variáveis medidas
Temperatura Ambiente fora do PT (°C)
Humidade Relativa fora do PT (%)
Temperatura Ambiente dentro do PT (°C)
Humidade Relativa dentro do PT (%)
Temperatura da tampa do transformador (°C)
Corrente em cada circuito de saída do Transformador (A)
Tensão em cada fase do Transformador (V)
Número de descargas parciais no interior do Transformador
Número de descargas parciais nas buchas do Transformador
Deteção da frequência e amplitude de vibração do núcleo do Transformador

Com estas variáveis é possível obter outras variáveis e, conseqüentemente extrair várias informações e realizar várias análises sobre o modo de funcionamento do transformador. É importante realçar que a UCD tem limitações no que diz respeito ao poder de processamento e memória que um servidor não tem, logo os métodos utilizados devem ser simples do ponto de vista computacional.

Uma variável que é essencial obter é a temperatura do óleo no topo do transformador (TOT), uma vez que esta variável permite depois calcular a temperatura do ponto quente (HST), que corresponde à temperatura mais elevada nos enrolamentos do transformador. A TOT é calculada, de acordo com [83], pela seguinte fórmula:

$$TOT_i = TC_i + \Delta T_{cond,i} \quad (1)$$

Sendo TC a temperatura na parte superior da tampa do TD e ΔT_{cond} a variação de temperatura devido à condução. O índice i representa o intervalo de tempo. A variação de temperatura devido à condução térmica é dada por:

$$\Delta T_{cond,i} = \frac{l}{k_{aço} \cdot A_{cond}} \cdot (P_0 + P_k \cdot K_i^2)^x \quad (2)$$

Sendo l a espessura das paredes do tanque expressa em m , $k_{aço}$ a condutividade térmica do aço expressa em $\frac{W}{m \cdot K}$, A_{cond} a área de superfície de condução térmica expressa em m^2 , P_0 as perdas em vazio expresso em W , P_k as perdas em curto circuito expresso em W , K o fator de carga expresso em percentagem e x o expoente do óleo. A espessura das paredes do tanque, área de superfície de condução térmica e as perdas são valores constantes e, normalmente, referenciados nos catálogos dos transformadores. A condutividade térmica do aço é um valor bem referenciado. O expoente do óleo é um parâmetro empírico que pode ser obtido com dados conhecidos e, no caso de não existirem dados da TOT, pode-se considerar que a TOT é igual à TC para obter este parâmetro [83]. O fator de carga pode ser obtido, segundo [84], pela seguinte fórmula:

$$K_i = \frac{(I_{f1i} + I_{f2i} + I_{f3i}) \cdot 2\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)}{1000 \cdot S} \quad (3)$$

Sendo I_{fi} a corrente de cada fase do transformador expressa em A , S a potência nominal do transformador expressa em kVA , U a tensão nominal do transformador expressa em V e $\cos(\varphi)$ o fator de potência que é calculado pela unidade de tensões e correntes.

Segundo a norma IEC60076, a HST pode ser calculada através da seguinte fórmula [85]:

$$HST = TOT + HF \cdot gr \cdot K^y \quad (4)$$

Sendo TOT a temperatura do óleo no topo do transformador, HF o fator *hot-spot*, gr o gradiente de temperatura entre os enrolamentos e o óleo, K o fator de carga e y o expoente do enrolamento.

No entanto, em [85] é calculado o erro percentual entre o cálculo da HST através da equação (4) e valores medidos através de sensores de fibra ótica, sendo o valor igual a 9,13 %. No mesmo artigo é ainda demonstrado que usando o método da mesma norma para calcular a percentagem do tempo de vida que o papel isolador perde (em inglês *Loss of Life* (LOL)), o erro percentual entre o valor calculado pelo método e o valor obtido através dos valores de HST medidos é de 49.89 %. Assim sendo, é necessário arranjar outro método para calcular a HST.

No artigo [86] é explorado algoritmo genético para calcular a HST para um Transformador de Distribuição de uma fase e com potência nominal de 25 kVA . O objetivo é encontrar uma solução que contemple apenas uma equação diferencial. O

modelo do programa tem como variáveis a carga à saída do transformador (L), a temperatura ambiente no interior do PT (TAI) e a própria HST. O programa começa com uma população de soluções na forma:

$$H\dot{S}T(i) = f(HST(i), L(i), TAI(i)) \quad (5)$$

denominada primeira geração. Cada solução vai ser analisada através de um teste que avalia a solução e, caso a solução seja admissível passa para a próxima geração. Para simplificar o programa e, considerando que uma variação na HST vai depender da diferença entre a HST e a TAI é realizada a seguinte simplificação:

$$\begin{cases} T_D = HST - TAI \\ H\dot{S}T = f(TD, L) \end{cases} \quad (6)$$

Após terminar, o programa selecionou as dez equações mais admissíveis. Das dez foram selecionadas as quatro que na opinião dos autores se ajustavam melhor ao modelo que se pretendia, como é possível observar na figura 5.3. Foram realizados vários testes, com dados de temperatura e carga diferentes, para as quatro soluções selecionadas pelos autores. As soluções durante os testes foram comparadas com o modelo descrito no anexo G da norma IEEE C57.91 e ajustadas através do método dos mínimos quadrados para obter os parâmetros α_1 , α_2 e α_3 .

ID	Structure for T_{HS}
a	α_1
b	$\alpha_1 L$
c	$\alpha_1 L + \alpha_2$
d	$\alpha_1 L + \alpha_2 T_D$
e	$\alpha_1 L + \alpha_2 + \alpha_3 T_D$
f	$\alpha_1 + \alpha_2 L^2 + \alpha_3 T_D$
g	$\alpha_1 L^2 + \alpha_2 + \alpha_3 T_D^2$
h	$\alpha_1 L + \alpha_2 L^3 + \alpha_3 T_D$
i	$\alpha_1 L + \alpha_2 L^4 + \alpha_3 T_D$

Figura 5.3 – Os modelos que o programa genético selecionou. A negrito encontram-se as quatro soluções que possivelmente descrevem melhor a HST [86].

Após a realização dos testes, o modelo que teve melhores resultados foi o modelo *f* com os seguintes parâmetros:

$$H\dot{S}T = 0,178 + 0,000939L^2 - 0,0149T_D \quad (7)$$

Assim pode-se considerar o modelo f uma equação admissível para calcular a HST ajustando apenas os parâmetros α_1 , α_2 e α_3 de acordo com os dados do transformador a ser monitorizado.

A deterioração ou envelhecimento do papel isolador depende da temperatura, da humidade e o oxigénio dentro do transformador [87]. No entanto, os sistemas de preservação do óleo minimizam a contribuição da humidade e do oxigénio para a deterioração do papel isolador podendo, portanto, considerar-se que deterioração do papel depende apenas da temperatura. A distribuição da temperatura no interior do transformador não é uniforme, logo, para cálculos de envelhecimento do papel isolador vai-se considerar apenas o ponto do transformador onde a temperatura é mais elevada, a temperatura do ponto quente (HST) e, conseqüentemente, onde ocorre maior deterioração ou envelhecimento. Assim, vai ser apresentado um método, denominado *Loss of Life* (LOL), para calcular a percentagem de tempo de vida que o papel isolador perde devido à operação do transformador em condições anormais.

A norma IEEE C57.91, apresenta um método para calcular o LOL [5], um parâmetro que nos indica a percentagem de tempo de vida que o papel isolador perdeu num certo intervalo de tempo de funcionamento. Este parâmetro depende apenas da HST, local onde ocorre maior deterioração ou envelhecimento do papel isolador, e é calculado da seguinte forma:

$$LOL (\%) = \frac{\sum_{n=1}^N V_n \cdot t_n}{TPI} \times 100 \quad (8)$$

Sendo V_n o fator de envelhecimento, t_n é o intervalo de tempo, expresso em horas, em que se calculou a HST, N é o número total de intervalos durante o período considerado e TPI o tempo de vida do papel isolador em horas, que segundo a mesma norma é 180000 horas para um TD [87]. O fator de envelhecimento é calculado através da equação 9 para papel isolador sem aditivos para melhoria de comportamento térmico e através da equação (10) para papel isolador aditivado.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_n = 2^{\frac{HST-98}{6}} \\ V_n = e^{\frac{15000}{110+273} + \frac{15000}{HST+273}} \end{array} \right. \quad (9)$$

$$(10)$$

Uma informação de interesse é saber quanto tempo e quando o transformador operou em sobrecarga. Para tal, é necessário estimar qual a capacidade de carga do transformador para, posteriormente, comparar com a carga calculada através das

medições de tensão e corrente de cada circuito. Em [83], é apresentado um método, que depende apenas da temperatura interior e exterior do PT, para estimar a capacidade de carga (LC) através da seguinte fórmula:

$$LC = a + b \cdot TAE + c \cdot TAI \quad (11)$$

Sendo TAE e TAI a temperatura ambiente exterior e interior do PT respetivamente e a, b e c parâmetros empíricos. Os parâmetros empíricos podem ser obtidos resolvendo a equação 6 em ordem ao fator de carga (K) [83]:

$$K^y = \frac{HST - TOT}{HF \cdot gr} \quad (12)$$

Considerando: o fator *hot-spot* (HF) 1,1, partindo do pressuposto que o TD tem uma impedância de curto-circuito inferior a 8% [88]; o expoente dos enrolamentos (y) 1,6 [88]; o gradiente de temperatura entre os enrolamentos e o óleo (gr) é um parâmetro de fábrica; e a HST igual a 98 °C. Esta equação permite reproduzir a LC para qualquer condição de operação do transformador. Resolvendo a equação em ordem ao fator de carga é então possível reproduzir a capacidade de carga e, assim, através do ajuste da equação 11 à equação 12 é possível obter os parâmetros empíricos.

No anexo III é apresentado um programa em *Python* onde é possível observar uma classe com o conjunto de métodos que permite implementar a fusão sensorial descrita nesta secção.

5.2.2 Análise de Dados

Terminada a fusão sensorial é necessário analisar todos os dados para extrair o máximo de informação possível. No que diz respeito à LOL, deve-se comparar o valor obtido para 24 h com o valor referência que é 0,0133% [87], considerando que a temperatura HST, durante o mesmo período de funcionamento, é 98°C para papel isolador aditivado e 110°C para papel isolador sem aditivos para melhoria do comportamento térmico [88].

Relativamente aos dados de temperatura é necessário analisar a relação entre temperaturas e também analisar quando certas temperaturas ultrapassam limites previamente definidos. Uma primeira análise que deve ser efetuada é a comparação entre a TAE, a TAI e a TOT. Esta comparação permite verificar se a convecção natural do calor está a ser realizada corretamente e, para isso a TOT deverá ser superior à TAI

que por sua vez deverá ser superior à TAE. No caso desta relação não se verificar a UCD deverá enviar um alarme para o servidor a sinalizar um problema na convecção natural de calor. A TOT e a HST vão ter um limite máximo de temperatura que é definido de acordo com [88], sendo 115°C e 140°C respetivamente. Sempre que estas temperaturas ultrapassem esses limites deve ser enviado um aviso para a plataforma a sinalizar tal evento e a UCD deve guardar o intervalo de tempo em que uma ou outra temperatura ultrapassaram o limite estabelecido. Os circuitos de saída em baixa tensão estão ligados a uma fase específica do TD. Assim, as correntes medidas de cada circuito vão ser associadas por fase, isto é, somadas para se obter a corrente de cada fase, valores que teoricamente não deveriam variar de fase para fase. Após obter estes valores é necessário analisar a variação de tensão e corrente entre as três fases do TD.

A equação (11) permite obter a capacidade de carga do transformador dependendo apenas dos valores da TAI e TAE, isto é, permite saber qual deveria ser a carga máxima a que o transformador deveria ser sujeito tendo em conta a TAI e TAE. A carga é a potência que o transformador disponibiliza nos circuitos de saída em baixa tensão para ser utilizada pelos consumidores finais. A capacidade de carga pode ser comparada com a carga real a que o transformador foi sujeito e, assim, saber quando o transformador operou em sobrecarga. Para saber a carga real a que o transformador foi sujeito deve-se multiplicar a tensão pela corrente para cada circuito de saída em baixa tensão e somar todos os valores obtidos. No que diz respeito à carga, deve ainda ser analisada a relação entre a carga e a TOT, uma vez que o aumento da carga pode ser a justificação para o aumento da TOT.

No que diz respeito às descargas parciais tanto no interior do TD como nas buchas é necessário realizar vários testes e estabelecer um número de descargas parciais aceitáveis durante o dia. Logo, se esse valor limite for ultrapassado é enviado um alarme para a plataforma a indicar o local (no interior do TD ou nas buchas) onde o limite de descargas parciais aceitáveis foi ultrapassado. Deve ser também analisada a relação entre o número de descargas parciais na buchas e a humidade relativa no interior do PT, uma vez que humidade relativa elevada torna a probabilidade de ocorrer uma descarga parcial mais elevada.

O zumbido do TD deve-se à vibração do núcleo do transformador, mais concretamente à contração e extensão das lâminas do núcleo quando são magnetizadas [89]. A frequência de vibração de um núcleo será de 100 Hz, o dobro da frequência da tensão elétrica. A deteção de zumbido é realizada entre 80 e 500 Hz; no entanto, para o diagnóstico do transformador o que é mais relevante é a amplitude do

zumbido, isto é, o “barulho” que este vai produzir. Deve ser realizado um teste em laboratório e analisar qual a amplitude mínima que vai provocar zumbido audível numa sala equiparável a um PT e deve ser esse o limite aceitável para a amplitude do zumbido. No caso da amplitude medida superar o limite aceitável deve ser enviado um aviso a sinalizar amplitude anormal que provoca zumbido audível.

No Anexo IV é apresentado um programa em *Python* onde é possível observar uma classe com um conjunto de métodos que permitem implementar a análise de dados descrita nesta secção.

Para além de todos os alarmes referidos, a UCD vai enviar, uma vez por dia, um relatório para uma plataforma online com todas as informações essenciais sobre as condições de operação do transformador. O relatório vai conter os dados de TAE, TAI, TOT para ser possível visualizar, na plataforma, um gráfico com a relação entre as várias temperaturas e, também é referido o tempo em que a TOT e/ou a HST permaneceram acima do valor limite máximo, sempre que este acontecimento se verificar. No relatório consta também a percentagem de tempo de vida que o papel isolador perdeu com um comentário a referir se foi acima ou não do valor referência, o número de descargas parciais que ocorreram dentro do TD e nas buchas, a variação de tensão e corrente entre cada fase do transformador e a amplitude e frequência de vibração do núcleo do transformador no caso de o zumbido ser audível. No que diz respeito à carga, deve constar no relatório o tempo em que o transformador operou em sobrecarga e devem ser enviados os dados da carga real e da TOT para ser disponibilizado, na plataforma, um gráfico onde é possível observar a relação entre as duas variáveis. No caso de serem verificadas descargas parciais nas buchas devem ainda ser enviados os valores de humidade relativa no interior do PT para disponibilizar na plataforma um gráfico onde é possível observar a relação entre as descargas parciais nas buchas e a humidade relativa. No anexo V é apresentado um programa em *Python* que corresponde ao protótipo da aplicação. Neste programa é possível observar os *inputs*, que vão ser as variáveis medidas, o programa principal e o relatório a ser enviado ao fim de 24 horas.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho pretende implementar a gestão de ativos em PT que estão dispersos numa vasta área geográfica e são tratados como “abandonados”, isto é, sem vigilância. A gestão de ativos permite prolongar a vida útil dos ativos dentro do PT, permitindo assim à empresa responsável reduzir os custos com estas infraestruturas, uma vez que o período de reposição dos ativos vai aumentar.

Este trabalho vem na linha do trabalho [44], mas agora especialmente centrado na gestão do ativo principal de um PT: o transformador de distribuição. Assim, complementando trabalhos anteriores centrados em outros órgãos e na segurança do PT, o objetivo aqui foi de criar condições para a gestão da exploração dos TD na perspetiva global de gestão de ativos, envolvendo a operação, sobretudo o controlo da carga disponibilizada, a manutenção preditiva e, a longo prazo, o planeamento dos investimentos. Nesta linha, foram realizadas as unidades que faltavam à data do início dos trabalhos para completar um sistema global de monitorização e diagnóstico de PT: uma unidade de monitorização de temperatura e humidade ambiente e uma unidade integradora de informação que, no local, se encontra dotada de capacidade de diagnóstico relativo às condições de funcionamento do PT. Foram realizados protótipos de demonstração, como anteriormente descrito, que permitiram avaliar o sistema em termos de prova de conceito.

A realização da principal unidade no âmbito de trabalho, a UCD, para diagnóstico e *gateway* de comunicação foi extensivamente arquitetada e discutida, mas, por falta de condições de acesso aos equipamentos num PT para a realização de testes realistas, não foi possível obter dados reais e, conseqüentemente, os respetivos resultados

analíticos. Assim, foram apenas testadas as funcionalidades de comunicação. Não estando sujeita a estas condicionantes de ordem prática, a prototipagem da UTH foi levada praticamente ao nível de produto acabado.

O trabalho irá ter continuidade em quadro empresarial (Eneida, Efacec e EDP) no sentido de validar o modelo de decisão de diagnóstico programado

Referências

- [1] “Industrial revolutions: the 4 main revolutions in the industrial world.” [Online]. Available: <https://www.sentryo.net/the-4-industrial-revolutions/>. [Accessed: 11-Jul-2019].
- [2] “Digitalization - Gartner IT Glossary.” [Online]. Available: <https://www.gartner.com/it-glossary/digitalization>. [Accessed: 08-Feb-2019].
- [3] “How digital transformation is shaping industries | CIO.” [Online]. Available: <https://www.cio.com/article/3305780/digital-transformation/how-digital-transformation-is-shaping-industries.html>. [Accessed: 08-Feb-2019].
- [4] A. Rojko, “Industry 4.0 Concept: Background and Overview,” vol. 11, no. 5, pp. 77–90, 2017.
- [5] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, and C. Zhang, “Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination,” *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 158–168, 2016.
- [6] M. Rüßmann *et al.*, “Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing,” *Bost. Consult.*, no. April, pp. 1–5, 2015.
- [7] “Guia - Distribuição de energia Elétrica-BT (002) (003).” [Online]. Available: <http://online.pubhtml5.com/giem/yxga/#p=6>. [Accessed: 10-Oct-2018].
- [8] “Guia - Distribuição de energia Elétrica-BT (002) (003).” [Online]. Available: <http://online.pubhtml5.com/giem/yxga/#p=12>. [Accessed: 10-Oct-2018].
- [9] “Portal ERSE - Subestações e postos de transformação.” [Online]. Available: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/RN-D-Subestacoes.aspx>. [Accessed: 09-Oct-2018].
- [10] J. R. C. Faria, “A Smart Multi-sensor for the Diagnosis of Distribution Transformers.”
- [11] F. Almada-Lobo, “Journal of Innovation Management,” *J. Innov. Manag.*, vol. 3, no. 4, pp. 16–21, 2016.
- [12] “5 Reasons Your Enterprise Asset Management (EAM) Should Be Part of Your ERP.” [Online]. Available: <https://www.to-increase.com/manufacturing/blog/5-reasons-enterprise-asset-management-eam-should-be-part-erp>. [Accessed: 20-Mar-2019].
- [13] C. J. Costa, E. Ferreira, F. Bento, and M. Aparicio, “Enterprise resource planning adoption and satisfaction determinants,” *Comput. Human Behav.*, vol. 63, pp. 659–671, 2016.
- [14] “Industry 4.0 Is your ERP system ready for the digital era?”
- [15] M. Al-mashari and H. Al-mosheleh, “Enterprise Resource Planning of Business Process Systems,” *UK Acad. Inf. Syst. Conf. Proc. 2015*, no. Paper 2, 2015.
- [16] “MES in Industry 4.0: ZNT.” [Online]. Available: <https://www.znt-richter.com/en/industrie-4.0/MES-in-Industry-4.0>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [17] M. Naedele, H. M. Chen, R. Kazman, Y. Cai, L. Xiao, and C. V. A. Silva, “Manufacturing execution systems: A vision for managing software development,” *J. Syst. Softw.*, vol. 101, pp. 59–68, 2015.
- [18] ISO, “Asset management — Overview, principles and terminology,” *Int. Organ. Stand.*, vol. 2014, p. 25, 2014.
- [19] R. D. Recommended, *An Introduction to Asset Management A simple but informative introduction to the management of physical assets Asset Management*.
- [20] “O Potencial da Industrial Internet of Things (IIoT) | Flow.” [Online]. Available: <http://flowtech.pt/pt/blog/vantagens-industrial-internet-of-things/>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [21] M. Weyrich and C. Ebert, “Reference architectures for the internet of things,” *IEEE*

- Softw.*, vol. 33, no. 1, pp. 112–116, 2016.
- [22] I. I. Consortium, “The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture,” *Ind. Internet Consort.*, vol. 1.80, no. November, pp. 1–7, 2017.
- [23] “Construction of three phase transformer - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=H2hYUu8IPY0&t=6s>. [Accessed: 21-Dec-2018].
- [24] “Construction of Siemens’s Oil Distribution Transformer - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ky5pfSZdLEQ>. [Accessed: 21-Dec-2018].
- [25] “MV/LV Oil transformers Archives - Gbe Spa.” [Online]. Available: <https://www.gbeonline.com/en/prodotti/oil-filled-transformers/>. [Accessed: 20-Dec-2018].
- [26] “Entenda o ciclo de vida de ativos industriais e melhore sua gestão.” [Online]. Available: <https://dynamox.net/ciclo-de-vida-de-ativos-industriais/>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [27] G. C. Jaiswal, M. S. Ballal, D. R. Tutakne, and P. Vishnu, “Intelligent condition monitoring system for distribution transformer and health status diagnosis,” *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. Power, Instrumentation, Control Comput. PICC 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [28] X. Zhang and E. Gockenbach, “Asset-Management of Transformers Based on Condition Monitoring and,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, pp. 26–40.
- [29] I. P. & Energy, “The path of the smart grid,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, 2010.
- [30] G. A. Putrus, P. Suwanapingkarl, D. Johnston, E. C. Bentley, and M. Narayana, “Impact of electric vehicles on power distribution networks,” *5th IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC '09*, pp. 827–831, 2009.
- [31] A. Janjic, V. Milenkovic, D. Ristic, N. Radulovic, and D. Milenovic, “Realization of smart MV/LV substation through the concept of micro RTU,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP711, 2016.
- [32] R. R. Pawar, P. A. Wagh, and S. B. Deosarkar, “Distribution transformer monitoring system using Internet of Things (IoT),” *ICCIDS 2017 - Int. Conf. Comput. Intell. Data Sci. Proc.*, vol. 2018–Janua, pp. 1–4, 2018.
- [33] C. Su, Y. Pu, H. Ching, and J. Kuo, “Energy Internet Based Distribution Transformer Loss-of-Life Evaluation,” *2018 Int. Conf. Smart Grid Clean Energy Technol.*, pp. 65–71, 2018.
- [34] T. T. Ku, C. S. Chen, C. H. Lin, and W. C. Shyu, “Design of an intelligent transformer management system,” *2014 IEEE PES T&D Conf. Expo.*, pp. 1–5, 2014.
- [35] A. Prudenzi, A. Fioravanti, and M. Regoli, “Making electric distribution of industrial customers smarter with IoT,” *SPEEDAM 2018 - Proc. Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 556–561, 2018.
- [36] K. Banumathi, M. Grace, G. Kalakaveya, and S. Shobana, “Monitoring of Transformer via Internet of Things Using GSM Technology,” vol. 4, no. 4, pp. 647–651, 2018.
- [37] “TXpert digital distribution transformer.” [Online]. Available: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A7298&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [38] “INHEMETER CO., LTD.” [Online]. Available: <http://www.inhemeter.com/index.php?ac=article&at=read&did=957>. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [39] “Distribution Transformer Monitoring System I hIOTron®.” [Online]. Available: <https://www.hiotron.com/dtms/>. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [40] “Products.” [Online]. Available: <https://grid2020.com/products#DTM>. [Accessed: 18-Mar-2019].

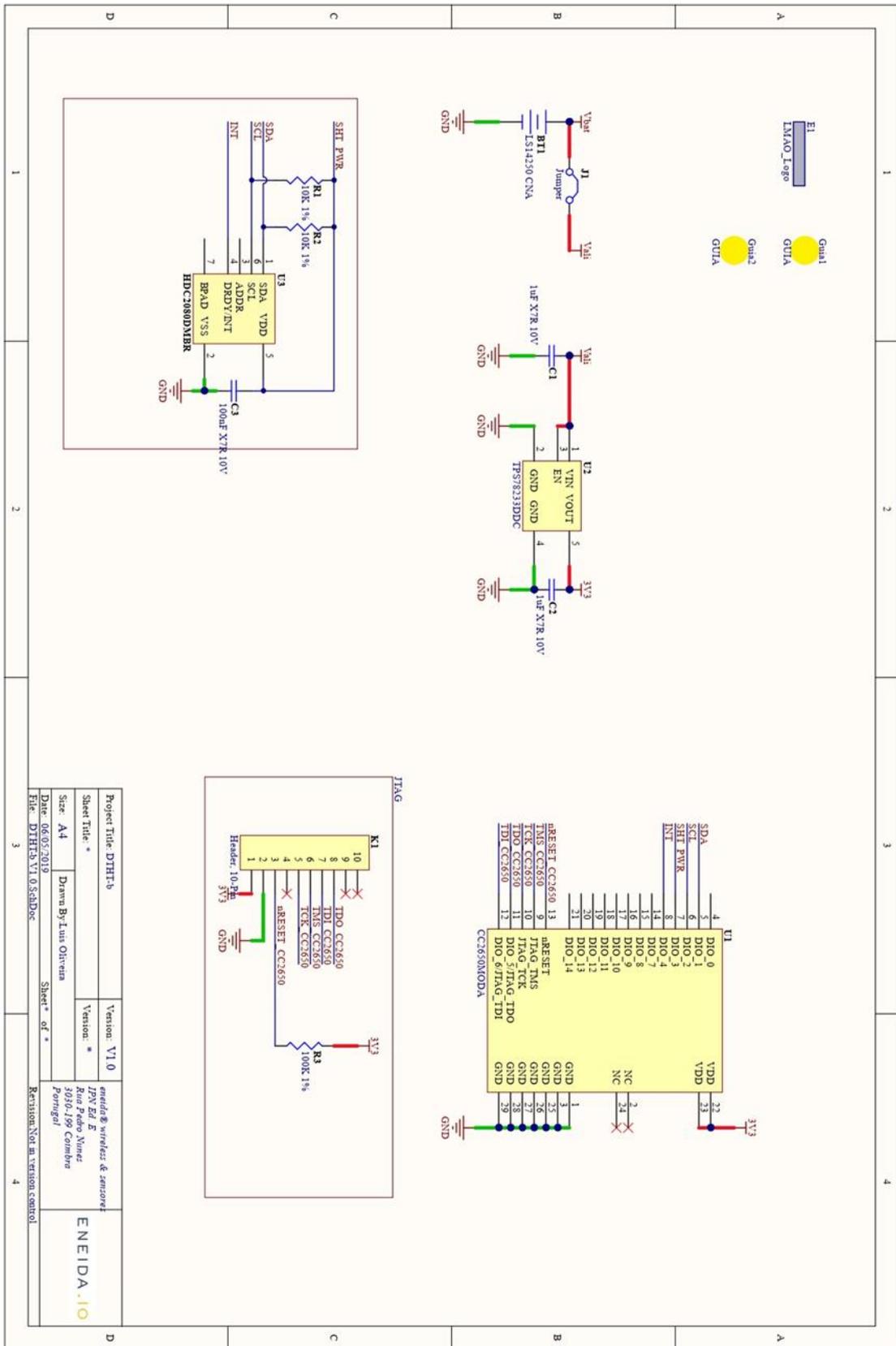
- [41] J. Johansson, H. Sporre, L. Selberg, and O. Hansson, "Monitoring systems for secondary substations - a comparative study," *CIREN - Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 350–354, 2017.
- [42] "Intelligent Transformer Substations for Future-Proof Power Distribution The Modular 3-Level Concept of Siemens Totally Integrated Power."
- [43] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, 2016.
- [44] F. Cardoso, M. Cordeiro, N. Rocha, L. Oliveira, and S. Faria, "Using Wireless Sensors in the Remote Condition Monitoring of Secondary Distribution Substations," *CIREN Work.*, no. 0292, pp. 11–12, 2014.
- [45] "DeepGrid® ONE - ENEIDA.IO." [Online]. Available: <https://eneida.io/deepgrid-one/>. [Accessed: 20-Mar-2019].
- [46] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, 2018.
- [47] "Building IoT gateways to the cloud." [Online]. Available: <https://www.microcontrollertips.com/building-iot-gateways-to-the-cloud/>. [Accessed: 05-Nov-2018].
- [48] "Introdução ao LPWAN (Low Power Wide Area Network) - Embarcados." [Online]. Available: <https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-lpwan/>. [Accessed: 05-Nov-2018].
- [49] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology," *Sensors (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, pp. 11734–11753, 2012.
- [50] "Overview — BLE-Stack User's Guide for Bluetooth 4.2 3.01.00.05 documentation." [Online]. Available: http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink_cc2640r2_sdk_1_40_00_45/docs/blestack/ble_user_guide/html/ble-stack-3.x/overview.html. [Accessed: 15-Apr-2019].
- [51] T. L. Lim, M. Y. Kow, A. Mahdzir, and N. Abu Bakar, "Bluetooth 5," *Proc. Int. Conf. Innov. Manag.*, no. 2125, pp. 61–77, 2016.
- [52] J. P. Bardyn, T. Melly, O. Seller, and N. Sornin, "IoT: The era of LPWAN is starting now," *Eur. Solid-State Circuits Conf.*, vol. 2016–Octob, pp. 25–30, 2016.
- [53] M. Anteur, V. Deslandes, N. Thomas, and A. L. Beylot, "Ultra narrow band technique for low power wide area communications," *2015 IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM 2015*, 2015.
- [54] K. E. Nolan, W. Guibene, and M. Y. Kelly, "An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things," *2016 Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. IWCMC 2016*, pp. 439–444, 2016.
- [55] "Uma visão técnica da Rede Sigfox e seus princípios - Embarcados." [Online]. Available: <https://www.embarcados.com.br/uma-visao-tecnica-da-rede-sigfox/>. [Accessed: 06-Nov-2018].
- [56] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-peiro, B. Martinez, J. Melià-seguí, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," no. September, pp. 34–40, 2017.
- [57] J. Cichonski, J. M. Franklin, and M. Bartock, "DRAFT NIST Special Publication 800-187 Guide to LTE Security."
- [58] "Meet the LPWAN clan: The Internet of Things' low power contenders • The Register." [Online]. Available: https://www.theregister.co.uk/2018/08/15/lpwan_runners_and_riders/. [Accessed: 07-Nov-2018].
- [59] R. Ratasuk, B. Vejlgaard, N. Mangalvedhe, and A. Ghosh, "NB-IoT system for M2M communication," *2016 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. Work. WCNCW 2016*, no. Wd5g, pp. 428–432, 2016.
- [60] "GSM - About Us." [Online]. Available: <https://www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/gsm>. [Accessed: 28-Oct-2018].
- [61] A. K. Salkintzis, C. Fors, and R. Pazhyannur, "WIAN-GPRS integration for next-

- generation mobile data networks,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 5, pp. 112–124, 2002.
- [62] A. Gerber, Z. M. Mao, and O. Spatscheck, “A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks Categories and Subject Descriptors,” *MobiSys '12 Proc. 10th Int. Conf. Mob. Syst. Appl. Serv.*, pp. 225–238, 2012.
- [63] T. Dalgleish *et al.*, “5G Standardization Trends at 3GPP,” *J. Exp. Psychol. Gen.*, vol. 136, no. 1, pp. 23–42, 2007.
- [64] “Get ready for 5G | Nokia Networks.” [Online]. Available: <https://networks.nokia.com/5g/get-ready>. [Accessed: 09-Nov-2018].
- [65] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. H. Aghvami, and V. C. M. Leung, “Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 138–145, 2017.
- [66] “Intel’s 5G Vision for Wireless Technology.” [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/wireless-network/5g-vision-document.html>. [Accessed: 26-Nov-2018].
- [67] I. S. Al-Qasrawi, “Proposed Technologies for Solving Future 5G Heterogeneous Networks Challenges,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 142, no. 10, pp. 0975-8887, 2016.
- [68] “CC-DEBUGGER | Debugger and Programmer for RF System-on-Chips | TI store.” [Online]. Available: <https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=CC-DEBUGGER>. [Accessed: 09-Jul-2019].
- [69] D. Lima, “Integração Sensorial para o Diagnóstico de Transformadores de Distribuição (MT / BT) de Energia Elétrica,” 2018.
- [70] “CC2650MODA SimpleLink™ Bluetooth® low energy Wireless MCU Module | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/CC2650MODA>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [71] “HDC2080 Low Power Humidity and Temperature Digital Sensor | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/HDC2080/description>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [72] “HDC2010 Low Power Digital Humidity and Temperature Sensor | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/HDC2010/samplebuy>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [73] B. Kasemsadeh and C. Iascone, “Optimizing Placement and Routing for Humidity Sensors,” no. September 2016, pp. 1–25, 2017.
- [74] C. Lee, J. Lindh, and M. Hernes, “Measuring Bluetooth® Low Energy Power Consumption,” *Texas Instruments*, no. 2017, pp. 1–24, 2015.
- [75] “TPS78233DDCT | 150-mA, ultra-low quiescent current (500 nA) low-dropout linear regulator | TI store.” [Online]. Available: <https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=TPS78233DDCT>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [76] “LS, LSH | Saft Batteries | We energize the world.” [Online]. Available: <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/ls-lsh?text=&tech=80&market=&sort=newest&submit=Search>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [77] “LAUNCHXL-CC2650 SimpleLink™ CC2650 wireless MCU LaunchPad™ Development Kit | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/launchxl-cc2650>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [78] N. Siegel, “Using TI Certified Bluetooth ® low energy Module (CC2650MODA) as Single-Chip Wireless MCU,” no. June, pp. 1–8, 2017.
- [79] “Buy a Raspberry Pi 3 Model B – Raspberry Pi.” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [Accessed: 06-Jul-2019].
- [80] “Deployment Map | Internet of Things.” [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/deployment-map/>. [Accessed: 17-Apr-2019].

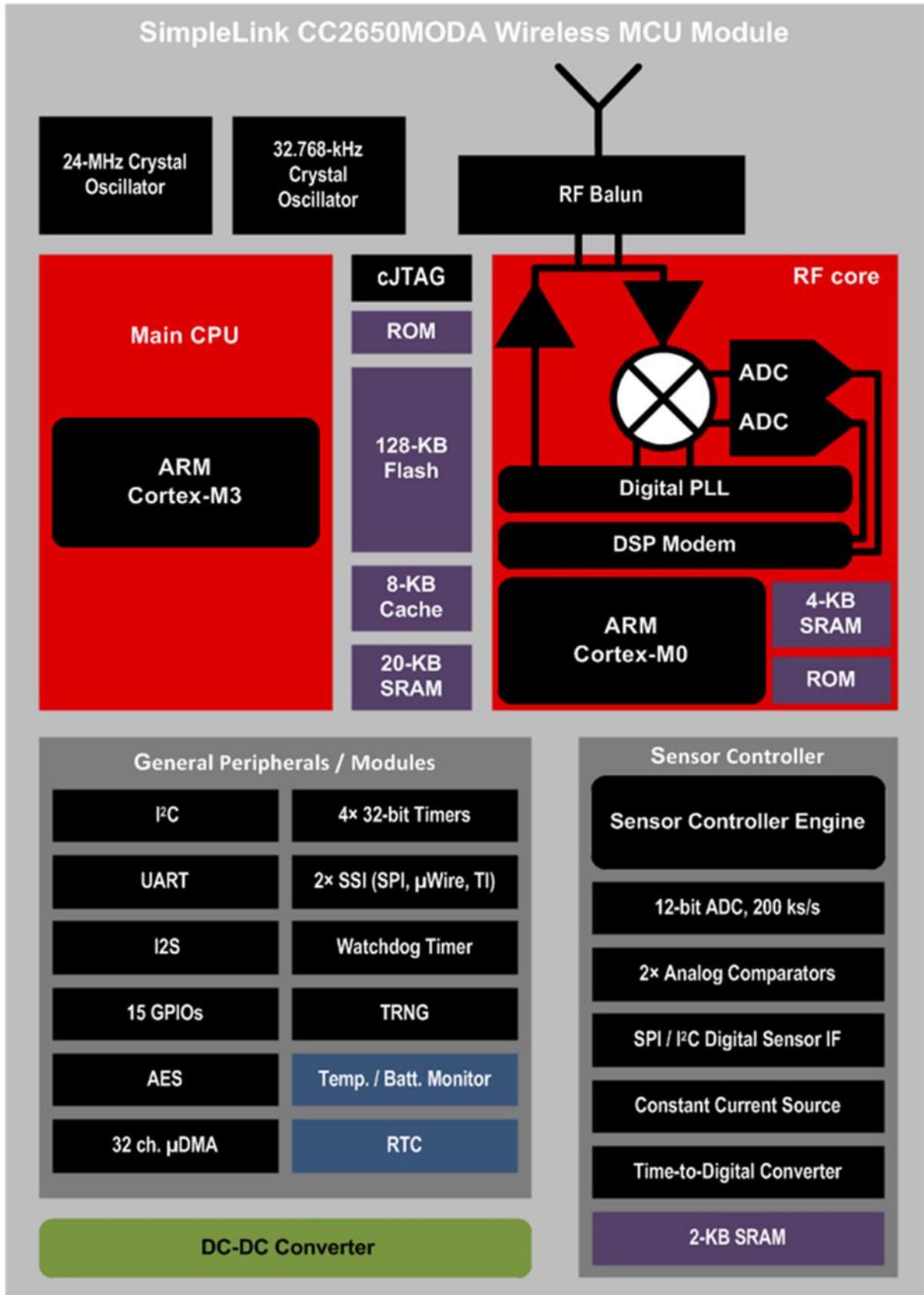
- [81] "NarrowBand-IoT- | Altice Portugal." [Online]. Available: <https://www.telecom.pt/pt-pt/media/noticias/paginas/2018/novembro/narrowband-iot-.aspx>. [Accessed: 17-Apr-2019].
- [82] "IoT Central | Microsoft Azure." [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/pt-pt/services/iot-central/>. [Accessed: 06-Jul-2019].
- [83] M. Djamali, S. Tenbohlen, E. Junge, and M. Konermann, "Real-Time Evaluation of the Dynamic Loading Capability of Indoor Distribution Transformers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 3, pp. 1134–1142, 2018.
- [84] V. A. Jimenez, A. Will, J. Gotay, and S. Rodríguez, "Adjustment of Model Parameters to Estimate Distribution Transformers Remaining Lifespan," *Smart Grid Renew. Energy*, vol. 09, no. 09, pp. 151–170, 2018.
- [85] A. Y. Arabul and I. Senol, "Development of a hot-spot temperature calculation method for the loss of life estimation of an ONAN distribution transformer," *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 3, pp. 1651–1659, 2018.
- [86] A. Seier, P. D. H. Hines, and J. Frolik, "Data-driven thermal modeling of residential service transformers," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1019–1025, 2015.
- [87] Transformers Committee, *IEEE Guide for Loading Mineral- Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators IEEE Power & Energy Society*, vol. 2011, no. March. 2012.
- [88] M. Kisan, S. Sangathan, J. Nehru, and S. G. Pitroda, "<IS 2026-7.2009. Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers.pdf>," 2009.
- [89] "Transformer Noise," *Nature*, vol. 149, no. 3791, pp. 738–738, 2008.

Anexos

Anexo I: Esquema da placa da Unidade de temperatura e humidade



Anexo II: Diagrama de bloques do módulo CC2650MODA



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

Anexo III: Classe *Fusão Sensorial*

```
import math

class fusao_sensorial:

#####

#CONSTANTES
def __init__(self):
    self.l= #espessura das paredes: unidades m
    self.k_termica= #condutividade termica aço: unidades (w/m*K)
    self.a_cond= #area de superficie de condução termica: unidades (m^2)
    self.p0= #perdas em vazio: unidades (w)
    self.pk= #perdas em curto circuito: unidades (W)
    self.x= #expoente do oleo
    self.S= #potencia nominal: unidades (kVA)
    self.U= #tensao nominal: unidades (V)
    self.tdv_enrolamento=180000 #tempode vida dedos enrolamentos de um td: unidades (horas)
    self.a= # primeiro coeficiente da LC
    self.b= #segundo coeficiente da LC
    self.c= #terceiro coeficiente da LC
    self.alpha1=0.178 #primeiro coeficiente da hst
    self.alpha2= 0.000939#segundo coeficiente da hst
    self.alpha3=-0.0149 #terceiro coeficiente da hst

#####

#METODOS
    #fator de carga
    def k(self,i1, i2, i3,power_factor):
        k=((i1+i2+i3)*2*(math.sqrt(3))*self.U*(math.cos(power_factor)))/(1000*self.S)
        return k
    #temperatura no topo de oleo
    def tot(self,tc, k):
        tot=tc+((self.l/(self.k_termica*self.a_cond))*(((self.p0+self.pk)*(k**2))**self.x))
        return tot
    #temperatura do ponto quente
    def hst(self,L, TAI):
        aa =-self.alpha3*L/2
        bb =(1-(self.alpha1*L)-(self.alpha2*(L**2)/3)-(self.alpha3*L*TAI/2))
        cc =((-self.alpha1*L*TAI)+((-self.alpha2*(L**3)*TAI)/3)+((-self.alpha3*L*(TAI**2))/2))

        hst=-bb+math.sqrt((bb**2)-4*aa*cc)/(2*aa)
        return hst

    #fator de envelhecimento
    @staticmethod
    def vn(hst, t_ref):
        if(t_ref==98):
            vn=2**((hst-98)/6)
        else:
            vn=math.exp((15000/283)+(15000/(hst+273)))
        return hst

    #loss of life
    def lol(self,V_tn):
        lol=V_tn*100/self.tdv_enrolamento
        return lol

    #Load Capability
    def lc( self,TAE, TAI):
        lc=self.a+(self.b*TAE)+(self.c*TAI)
        return lc

#####
```

Anexo IV: Classe *Análise de Dados*

```
import math

class analise_dados:

#####

#CONSTANTES

    def __init__(self):
        self.lim_tot= 115 #temperatura limite tot
        self.lim_hst= 140 #temperatura limite hst
        self.ref_lol=0.0133 #valor referencia de lol por dia
        self.lim_pd_buchas= #limite de PD nas buchas
        self.lim_pd_td= #limite de PD no transformador
        self.lim_amp= #limite de amplitude de zumbido

#####

#METODOS

    def analise_lol(self, lol):
        if(lol>self.ref_lol):
            sms_lol="LOL ultrapassou o valor referencia diario (0.0133%)"
        else:
            sms_lol="LOL nao ultrapassou o valor referencia diario (0.0133%)"
        return sms_lol

    def analise_tot(self, tot):
        if(tot>self.lim_tot):
            alarme_tot=True
        else:
            alarme_tot=False

        return alarme_tot

    def analise_hst(self, hst):
        if(hst>self.lim_hst):
            alarme_hst=True
        else:
            alarme_hst=False

        return alarme_hst

    def analise_pd_buchas(self, pd_buchas):
        if(pd_buchas>self.lim_pd_buchas):
            alarme_pd_buchas=True
        else:
            alarme_pd_buchas=False

        return alarme_pd_buchas

    def analise_pd_td(self, pd_td):
        if(pd_td>self.lim_pd_td):
            alarme_pd_td=True
        else:
            alarme_pd_td=False

        return alarme_pd_td
```

```

def analise_amp(self, amp):
    if(amp>self.lim_amp):
        alarme_amp=True
    else:
        alarme_amp=False

    return alarme_amp

@staticmethod
def analise_temp(tot, tai, tae):
    if(tot<tai or tai<tae):
        alarme_temperatura=True
    else:
        alarme_temperatura=False

    return alarme_temperatura

@staticmethod
def analise_carga(lc, carga):
    if(carga>lc):
        alarme_carga=True
    else:
        alarme_carga=False

    return alarme_carga

@staticmethod
def desvio(x1, x2, x3):
    desvio_medio=(abs(x1-x2)+abs(x2-x3)+abs(x3-x1))/3

    return desvio_medio

```

#####

Anexo V: Programa principal (main)

```
import math
import fusao_sensorial
import analise_dados
import time

fusao=fusao_sensorial.fusao_sensorial()
analise=analise_dados.analise_dados()

#frequencia de fusao e análise
#valor em horas
freq_algorithm= 1

#listas
TAI_list=[]
TAE_list=[]
HI_list=[]
V_tn_list=[] #vn *tn
TOT_list=[]
PD_buchas_list=[]
PD_td_list=[]
amp_hum_list=[]
freq_hum_list=[]
CARGA_REAL_list=[]
Desvio_corrente_list=[]
Desvio_tensao_list=[]
total_pd_buchas=0
total_pd_td=0
time_above_tot=0
time_above_hst=0
time_overload=0
V_tn_total=0

#contador para verificar quando passa um dia
counter=0

while True:

    counter=counter+1;

    #####
    #inputs

    # os inputs vao corresponder aos valores das variaveis ao fim do intervalo de frequencia do algoritmo.
    # se nesse intervalo de tempo forem comunicadas mais que uma medida dessa variavel, deve ser realizada uma média
    TAI= #temperatura ambiente interior (°C)
    TAE= #temperatura ambiente exterior (°C)
    HI= #Humidade interior (%)
    HE= #Humidade exterior (%)
    TC= #temperatura d atampa (°C)
    #corrente e tensao de cada circuito
    #o numero de circuitos variar
    i1=
    i2=
    i3=
    i4=
    i5=
    i6=
    i7=
    i8=
    i9=
    t1=
    t2=
    t3=
    pd_buchas= #nr descarags nas buchas
    pd_td= #nr descargas dentro do transformador
    freq_hum= #frequencia do zumbido (Hz)
    amp_hum= #amplitude do zumbido (dB)
    power_factor= #fator de potencia
```

```

#####

#guardar o nr de descargas
PD_buchas_list.append(pd_buchas)
PD_td_list.append(pd_td)

#corrente por fase
i_fase1= i1+i2+i3
i_fase2=i4+i5+i6
i_fase3=i7+i8+i9

#tensao por fase
t_fase1= t1
t_fase2= t2
t_fase3= t3

#carga a que o td esta sujeito
carga_real=i_fase1*t_fase1+i_fase2*t_fase2+i_fase3*t_fase3

#fusao senrial
k=fusao.k(i_fase1,i_fase2,i_fase3,power_factor)
tot=fusao.tot(TC, k)
hst=fusao.hst(carga_real, TAI)
lc=fusao.lc(TAE,TAI)

#calcular apenas ao fim de 24 h
vn=fusao.vn(hst, 98)
v_tn=vn*freq_algorithm
V_tn_list.append(v_tn)
if(counter==(24/freq_algorithm)):
    for ele in range(0, len(V_tn_list)):
        V_tn_total = V_tn_total + V_tn_list[ele]
        lol=fusao.lol(V_tn_total)
        sms_lol=analise.analise_lol(lol)

#analise dos dados
#analisar limite tot
if(analise.analise_tot(tot)):
    #send alarme
    time_above_tot=time_above_tot+freq_algorithm

#analisar limite hst
if(analise.analise_hst(hst)):
    #send alarme
    time_above_hst=time_above_hst+freq_algorithm

#somar o nr de descargas nas buchas e comparar com o limite
for ele1 in range(0, len(PD_buchas_list)):
    total_pd_buchas = total_pd_buchas + PD_buchas_list[ele1]

if(analise.analise_pd_buchas(total_pd_buchas)):
    #send alarme
    flag_pd_buchas=True

#somar o nr de descargas no td e comparar cok o limite
for ele2 in range(0, len(PD_td_list)):
    total_pd_td = total_pd_td + PD_td_list[ele2]

if(analise.analise_pd_td(total_pd_td)):
    #send alarme

#verificare comparar a amplitude do zumbido com o valor referencia
if(analise.analise_amp(amp_hum)):
    #send alarme
    flag_zumbido=True

# analisar o estado de convecção
if(analise.analise_temp(tot, TAI,TAE)):
    #send alarme

#analisar se o td esta a trabalhar em sobrecarga
if(analise.analise_carga(lc, carga_real)):
    #send alarme
    time_overload=time_overload+freq_algorithm

#analisar o desvio
#corrente
desvio_corrente=analise.desvio(i_fase1, i_fase2,i_fase3)

#tensao
desvio_tensao=analise.desvio(t_fase1, t_fase2, t_fase3)

```

```

#adicionar valores as listas para mais tarde enviar
TAI_list.append(TAI)
TAE_list.append(TAE)
TOT_list.append(tot)
HI_list.append(HI)
CARGA_REAL_list.append(carga_real)
Desvio_tensao_list.append(desvio_tensao)
Desvio_corrente_list.append(desvio_corrente)
freq_hum_list.append(freq_hum)
amp_hum_list.append(amp_hum)

if(counter==(24/freq_algorithm)):
    print("send relatorio")
    #nao e preciso utilizar contagem do tempo uma vez que sabendo a frequencia
    #do algoritmo e partindo do principio que sabemos a hora a que ele começa
    #Conseguimos saber a hora correspondente a cada valor
    #send TAI_list,TAE_list,TOT_list
    #if (time_above_tot>0): -> send "tot acima do valor referencia durante" + time_above_tot + "minutos"
    #if (time_above_hst>0): -> send "hst acima do valor referencia durante" + time_above_hst + "minutos"
    #if (time_overload>0): -> send "carga acima do valor referencia durante" + time_overload + "minutos"
    #send lol+ sms lol
    #send media dos desvios de corrente e tensao
    #send nr total de Descargas no interior e no exterior do td
    #if (flag_zumbido==True): send o valor médio da freq e da amplitude
    #if (flag_pd_buvas==True): send HI_list
    #listas
    TAI_list=[]
    TAE_list=[]
    HI_list=[]
    V_tn_list=[] #vn *tn
    TOT_list=[]
    PD_buchas_list=[]
    PD_td_list=[]
    amp_hum_list=[]
    freq_hum_list=[]
    CARGA_REAL_list=[]
    Desvio_corrente_list=[]
    Desvio_tensao_list=[]
    counter=0
    total_pd_buchas=0
    total_pd_td=0
    time_above_tot=0
    time_above_hst=0
    time_overload=0
    V_tn_total=0

time.sleep(freq_algorithm*3600)

```

