



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES E DE
COMPUTADORES

Monitorização de equipamentos semafóricos através de uma rede IoT

FILIPE COSTA CORDEIRO

LICENCIADO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELECTRÓNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTADOR: PROF. NUNO ANTÓNIO FRAGA JULIANO COTA

JÚRI:

PRESIDENTE: PROF. DOUTOR ANTÓNIO JOÃO NUNES SERRADOR

VOGAIS: PROF. DOUTOR NUNO MIGUEL MACHADO CRUZ

PROF. NUNO ANTÓNIO FRAGA JULIANO COTA

Dezembro, 2019

Resumo

O objectivo desta dissertação, é o desenvolvimento de um dispositivo, com a capacidade de adquirir informação sobre os parâmetros ambientais e a energia, de armários SLAT (Sistemas Luminosos Automáticos de Trânsito). Esta captura de informação irá ser feita através de sensores colocados nos armários SLAT. Este sistema irá transmitir a informação capturada através de uma rede IoT. Para realizar estes objectivos terá de se fazer um estudo sobre redes de comunicação IoT, que sejam capazes de transferir a informação adquirida à entidade detentora da infraestrutura. Esta rede terá de possibilitar a comunicação de sensores de baixa potência a grandes distâncias.

Ao longo desta dissertação foi estudado o LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT com o intuito de determinar qual tecnologia IoT é a mais apropriada, tendo em conta os objectivos desta dissertação.

Nesta dissertação foi feito um levantamento dos requisitos do dispositivo e dos sensores que o compõem. Sendo que após este levantamento foi feito um estudo de mercado dos sensores disponíveis, finalizando este com uma comparação entre os sensores para determinar quais eram os que iam de encontro com os objectivos desta dissertação. Com os sensores escolhidos foi feito um estudo de soluções de alimentação possíveis para este protótipo tendo em conta as condições previstas de utilização. Com este estudo feito, apresentou-se a aplicação de teste e o ambiente escolhido para a desenvolver.

Com o dispositivo desenvolvido, foram feitos testes para obter e estudar resultados em ambientes reais. Inicialmente realizou-se uns testes preliminares com o intuito de ter um ponto de comparação quando se passar para os testes num ambiente mais realista. Nestes testes foram feitos um levantamento de várias condições, tal como a construção do armário e se existe linha de vista com a *gateway*.

Finalmente foi feito o planeamento da rede, este é composto pela determinação dos requisitos e o que os influencia, cálculo da cobertura tendo em base a utilização de uma ferramenta de planeamento rádio, o *link budget* e cálculo da capacidade. Este planeamento foi finalizado com um exemplo teórico das localizações das *gateways* e um resultado de uma simulação da cobertura de Lisboa.

PALAVRAS-CHAVE: LPWAN; LoRaWAN; TTN; Redes Móveis; Arduino;

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos	1
1.3	Estrutura do Documento	1
2	Tecnologias de comunicação IoT	3
2.1	LoRaWAN	3
2.2	<i>Sigfox</i>	17
2.3	<i>Narrowband Internet of Things</i>	19
2.4	Comparação	23
3	Sistema Desenvolvido	25
3.1	Requisitos	25
3.2	Alimentação	31
3.3	Controlador	33
3.4	Aplicação de teste	34
4	Requisitos de Cobertura Rádio	37
4.1	Testes preliminares	37
4.2	Testes em armários SLAT	42
4.3	Conclusões retiradas	48
5	Planeamento de rede	49
5.1	Requisitos	49
5.2	Capacidade	51
5.3	<i>Link Budget</i>	52
6	Conclusão	55
6.1	Trabalho Desenvolvido	55
6.2	Conclusões Finais	56
6.3	Trabalho Futuro	57
	Bibliografia	58

Lista de Figuras

2.1	Stack LoRaWAN com OSI.	3
2.2	Sinal <i>upchirp</i> visualizado como uma sinusoidal.	4
2.3	Evolução do ritmo binário com o SF.	6
2.4	Formato de trama PHY.	7
2.5	Evolução do TOA com o SF.	9
2.6	Rede LoRa (adaptado de [8]).	10
2.7	Trama de Classe A.	11
2.8	Classe A com as janelas representadas.	11
2.9	Trama de Classe B.	11
2.10	Classe B com as janelas representadas.	11
2.11	Trama de Classe C.	12
2.12	Classe C com as janelas representadas.	12
2.13	Trama LoRaWAN.	12
2.14	Formato do <i>MAC Payload</i>	13
2.15	Rede TTN (figura adaptada).	14
2.16	Rede <i>Sigfox</i> [11].	17
2.17	Trama <i>uplink Sigfox</i>	19
2.18	Trama <i>downlink Sigfox</i>	19
2.19	Rede NB-IoT[14].	20
2.20	Modos de operação [14].	22
3.1	Armário 1.	25
3.2	Diagrama de blocos.	26
3.3	Sensor BME280.	29
3.4	Sensor porta aberta.	30
3.5	Sensor ADXL335.	31
3.6	Prototipo na <i>breadboard</i>	34
3.7	Exemplo de fluxo de <i>Node-Red</i>	35
3.8	Painel criado.	36
4.1	Mapa do ISEL (figura adaptada) [21].	38
4.2	Armário com porta fechada.	38
4.3	Nó no topo de armário.	39
4.4	Nó na parte de cima do armário.	39
4.5	Nó no meio do armário.	39

4.6	Histograma do RSSI dentro do armário.	41
4.7	Histograma do SNR dentro do armário.	41
4.8	Localizações dos armários e <i>gateway</i>	42
4.9	Linha de vista de armário 1 e <i>gateway</i>	42
4.10	Armário 1.	43
4.11	Linha de vista de armário 2 e <i>gateway</i>	43
4.12	Armário 2.	43
4.13	Linha de vista de armário 3 e <i>gateway</i>	44
4.14	Linha de vista de armário 4 e <i>gateway</i>	44
4.15	Armário 4.	45
4.16	Linha de vista de armário 5 e <i>gateway</i>	45
4.17	Armário 5.	46
4.18	Armário 5.	46
4.19	Histograma do RSSI dentro do armário.	47
4.20	Histograma do SNR dentro do armário.	48
5.1	Propagação centrada em armários.	50
5.2	Distribuição de armários em Lisboa.	50
5.3	Distribuição das <i>gateways</i> em Lisboa.	54
5.4	Cobertura em Lisboa.	54

Lista de Tabelas

2.1	Variação do SF com tamanho de chip e SNR limite [4].	6
2.2	Tabela de frequências [5].	6
2.3	<i>Duty Cycles</i> máximos na Europa [6].	8
2.4	Tipos de mensagem MAC.	12
2.5	Limitações <i>Sigfox</i>	18
2.6	Características NB-IoT [16].	23
3.1	Comparação de vários sensores de temperatura e humidade.	28
3.2	Fases de carregamento.	32
3.3	Parâmetros dos Micro-controladores.	33
4.1	Valores obtidos para o RSSI (<i>Received Signal Strength Indication</i>).	40
4.2	Valores obtidos para o SNR.	40
4.3	Resultados do segundo teste.	47
5.1	Nº máximo de nós com o aumento do SF.	51
5.2	Número de mensagens com o SF.	51
5.3	Dados da <i>Gateway</i> e Nó.	52
5.4	Cálculos de Limitação da ligação.	52
5.5	Altura do Nó e da <i>Gateway</i>	53

Lista de Equações

2.1	<i>Chirp</i> linear ao longo do tempo	4
2.2	Velocidade da variação da frequência num <i>chirp</i>	4
2.3	Ritmo binário no LoRa	5
2.4	Ritmo de <i>chips</i>	5
2.5	Sensibilidade do receptor	5
2.6	Período de símbolo	5
2.7	Ritmo de símbolo	5
2.8	Ritmo binário com FEC equacionado	7
2.9	Tempo de preâmbulo	8
2.10	Número de símbolos no <i>header</i> e o <i>payload</i>	8
2.11	Tempo de transmissão do <i>payload</i>	8
2.12	<i>Time on Air</i>	8
3.1	Cálculo da capacidade de um dispositivo	32
3.2	Cálculo do período de carregamento de uma capacidade	32

Lista de Siglas e Acrónimos

ABP	Activation by Personalization
ACK	Acknowledgement
ADR	Adaptive Data Rate
AppKey	Application Key
AppSkey	Application Session Key
BW	Bandwidth
CIoT	Cellular Internet of Things
CP	Cyclic Prefix
CR	Coding Rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
DBPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying
DMRS	Demodulation Reference Signal
DRX	Discontinuous Reception
eDRX	Extended Discontinuous Reception
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
eNB	Evolved NodeB
EPS	Evolved Packet System
FCnt	Frame Counter
FCS	Frame Check Sequence
FCtrl	Frame Control
FEC	Forward Error Correction
FHDR	Frame Header
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FOpts	Frame Options
Fport	Frame Port
FRMPayload	Frame Payload
FSK	Frequency Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
HMAC	Hash Message Authentication Code
HTTPS	Hyper Text Transfer Protocol Secure
I2C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
LNF	Log Normal Fading
LoRa	Long Range
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
LTN	Low Troughput Network

M2M	Machine to Machine
MAC	Media Access Control
MHDR	MAC Header
MIB	Master Information Block
MIC	Message Integrity Code
MME	Mobility Management Entity
Mtype	Message Type
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
NF	Noise Figure
NPBCH	Narrowband Physical Broadcast Channel
NPDCCH	Narrowband Physical Downlink Control Channel
NPDSCH	Narrowband Physical Downlink Shared Channel
NPSS	Narrowband Primary Synchronization Signal
NPRACH	Narrowband Physical Random Access Channel
NPUSCH	Narrowband Physical Uplink Shared Channel
NRF	Narrowband Reference Signal
NSSS	Narrowband Secondary Synchronization Signal
NwkSKey	Network Session Key
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSSS	Orthogonal Sequence Spread Spectrum
OTAA	Over The Air Activation
PGW	Packet Data Network Gateway
PHY	Physical
PSM	Power Saving Mode
R_b	Ritmo Binário
R_c	Ritmo de Chip
R_s	Ritmo de Símbolo
RFU	Reserved for Future Usage
RSSI	Received Signal Strength Indication
SCEF	Service Capability Exposure Function
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SF	Spreading Factor
SGW	Serving Gateway
SLAT	Sistemas Luminosos Automáticos de Trânsito
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
SS	Signal Strength
TAU	Tracking Update Area
ToA	Time on Air
TTN	The Things Network
UCI	Uplink Control Information
UNB	Ultra Narrow Band

VPN..... **Virtual Private Network**

1 Introdução

Este capítulo enquadra a motivação para a dissertação, apresenta os objectivos e a estrutura do documento.

1.1 Enquadramento

Com a evolução dos sistemas de comunicação contemporâneos a necessidade de mais serviços, mais exigentes e mais variados emergiram naturalmente. Com o crescimento exponencial destas tecnologias, os equipamentos tiveram de acompanhar o aumento das exigências que os consumidores impõem, fazendo assim com que haja um crescimento exponencial do número de objectos em cada rede.

Um destes sistemas é o sistema que controla o trânsito rodoviário. Este sistema é composto por vários armários que contêm diversos equipamentos activos e passivos, estes equipamentos são vitais para a circulação rodoviária. Devido aos equipamentos contidos nestes armários, serem de altamente importantes, a sua condição tem de ser constantemente monitorizada para que no caso de avaria seja possível uma reparação, rápida e eficaz.

1.2 Objectivos

Com esta necessidade em mente, o objectivo deste projecto é o desenvolvimento e criação de um equipamento, que seja capaz de monitorizar armários SLAT através de uma rede IoT (*Internet of Things*) na cidade de Lisboa. Este equipamento tem de ser eficiente, de baixo custo e de fácil instalação nos vários armários SLAT.

Para cumprir este objectivo, será preciso fazer estudo de mercado sobre os vários sensores disponíveis, tal como fazer testes em armários SLAT em Lisboa. Será também preciso realizar o planeamento da rede, para dar uma ideia do que será preciso para concretizar os objectivos desta dissertação na sua totalidade.

1.3 Estrutura do Documento

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

Neste primeiro capítulo expõem-se o enquadramento, os objectivos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo fornece um estudo detalhado das tecnologias de comunicação IoT, que possibilitam o cumprimento dos objectivos desta dissertação, estas são o LoRaWAN, SIG-FOX e NB-IoT.

No terceiro capítulo é explorado o dispositivo, neste capítulo são explorados os requisitos que cada componente e sensor, que compõem este dispositivo têm de ter, faz-se um estudo de mercado a cada um destes, e explica-se as suas vantagens e desvantagens. Este capítulo é concluído com a apresentação da aplicação de testes criada para monitorizar remotamente os armários SLAT.

No quarto capítulo faz-se o levantamento dos requisitos da cobertura rádio com a execução de dois testes em armários SLAT, com os testes feitos apresenta-se os resultados, e retira-se conclusões e precauções a ter na instalação do nosso protótipo e no planeamento da rede.

No quinto capítulo é feito o planeamento da rede, inicialmente é realizado o levantamento dos requisitos da rede, seguido de uma simulação da rede na ferramenta *Radio Mobile*, depois é considerada a influência da capacidade na rede. E finalmente é feito o *link budget*, que finaliza com uma comparação entre os diferentes métodos e uma apresentação de uma possibilidade da colocação das *gateways* em Lisboa.

No sexto capítulo é apresentada a conclusão da dissertação com as conclusões principais e é exposto o trabalho futuro que pode ser feito.

2 Tecnologias de comunicação IoT

O objectivo deste projecto, é o desenvolvimento de um sistema, com a capacidade de adquirir informação sobre os parâmetros ambientais e a energia. Este sistema irá concretizar esta captura através de sensores colocados nos armários SLAT. Para realizar este objectivo terá-se de fazer um estudo sobre redes de comunicação IoT, que sejam capazes de transferir a informação adquirida à entidade detentora da infraestrutura. Esta rede terá de possibilitar a comunicação de sensores de baixa potência de emissão a grandes distâncias.

Nos dias de hoje existem bastantes tecnologias de comunicação IoT que permitem a criação de uma rede de sensores com as características desejadas. Neste capítulo irão ser estudadas três tecnologias de comunicação IoT, o LoRaWAN, o *Sigfox* e o NB-IoT, concluindo com uma breve comparação entre estas redes.

2.1 LoRaWAN

O LoRaWAN é uma tecnologia sem fios, de baixa potência, longo alcance e baixo débito binário. Esta tem o intuito principal de trabalhar em redes IoT e M2M (*Machine to Machine*). Esta tecnologia pode ser dividida em duas partes, a camada física que é chamada de LoRa (*Long Range*) e a camada de acesso ou MAC (*Media Access Control*) que é chamada de LoRaWAN (ver Figura 2.1). A modulação LoRa foi inicialmente proposta pela *Semtech*, enquanto o LoRaWAN foi desenvolvido pela *LoRa Alliance* [1] [2].

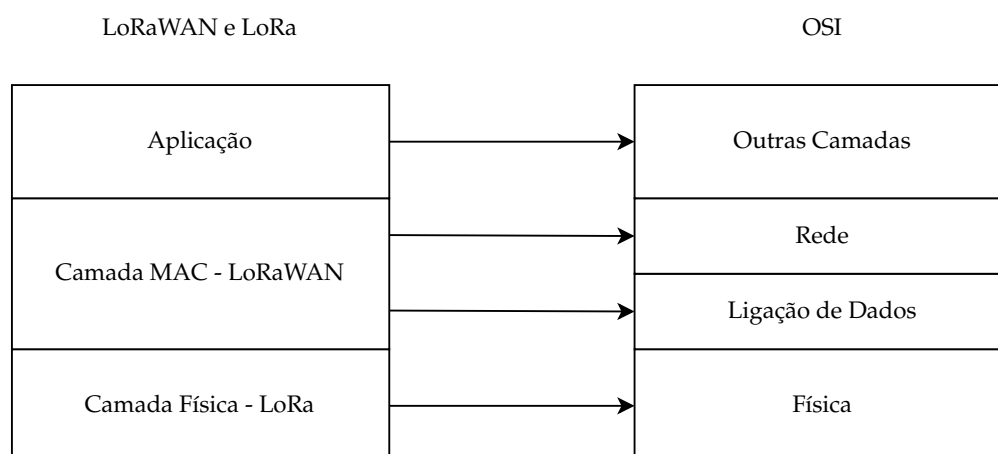


FIGURA 2.1: Stack LoRaWAN com OSI.

2.1.1 LoRa

O LoRa utiliza uma modulação de espalhamento na frequência derivada da modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*). O CSS utiliza *chirps* para codificar a sua informação, um *chirp* é um sinal no qual a frequência varia exponencialmente ou linearmente ao longo do tempo. Se a frequência aumentar continuamente é um *up-chirp*, figura 2.2, se diminuir é um *down-chirp*, a variação da frequência de um *chirp* linear ao longo do tempo segue a fórmula 2.1, onde f_0 é a frequência inicial, t o tempo e k é a variável que descreve a velocidade da variação da frequência, sendo esta dada pela equação 2.2.

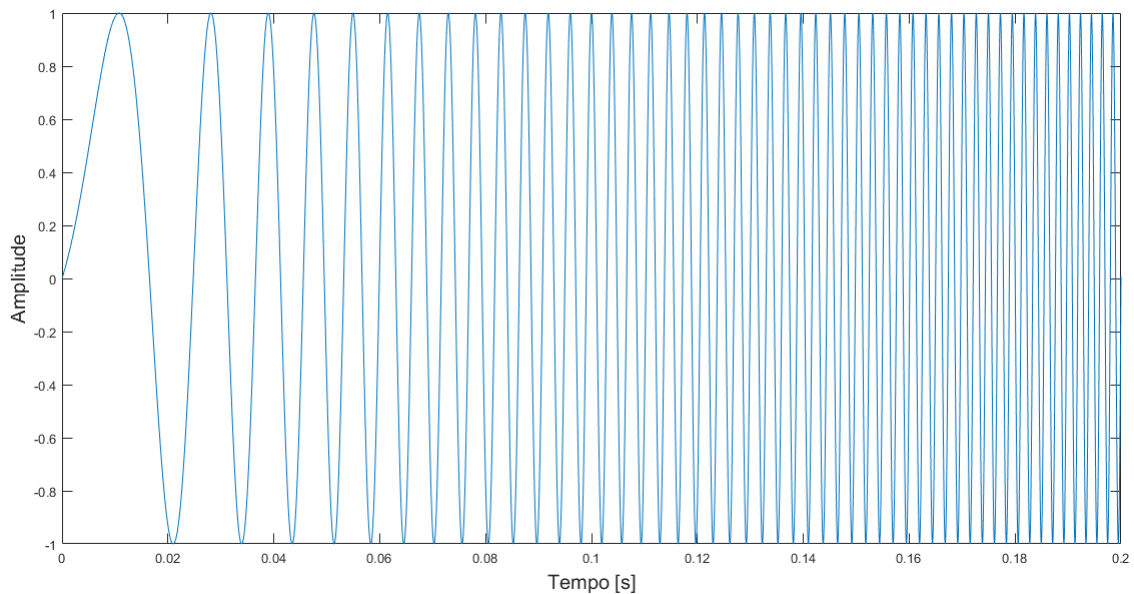


FIGURA 2.2: Sinal *upchirp* visualizado como uma sinusoidal.

Um *chirp* linear segue a fórmula 2.1, esta descreve a variação da frequência ao longo do tempo, sendo f_0 a frequência inicial, t o tempo e k a variável que descreve a velocidade da variação da frequência, sendo esta calculada pela equação 2.2.

$$f(t) = f_0 + kt \quad (2.1)$$

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T} \quad (2.2)$$

A tecnologia LoRa funciona utilizando *chirps*, esta parte os *chirps* a certos momentos no tempo e na frequência, assim codificando-os num símbolo específico. Isto leva a um ganho de processamento, devido ao facto que as frequências limite e o tempo de variação são conhecidos, o que faz com que a complexidade do receptor diminua [3].

O ritmo binário, R_b , no LoRa pode ser definido pela equação 2.3, nesta equação pode-se verificar que o ritmo binário varia com o factor de espalhamento, *Spreading Factor* (SF), e com o *Bandwidth* (BW).

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2.3)$$

Existem cinco parâmetros que um utilizador pode modificar para adaptar a sua ligação ao ambiente de propagação, a potência de emissão, BW, SF, *Coding Rate* (CR) e a frequência de emissão.

O BW representa o espectro de frequências que são transmitidas, no LoRa o ritmo de *chips*, R_c , é igual ao BW. O R_c é o número de chips enviados por segundo, sendo o *chip* o valor de um símbolo.

O BW no LoRa tem três opções 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz [4]. Com o aumento do BW existe um aumento do R_b , e uma diminuição da sensibilidade do receptor devido a uma diminuição do SNR (*Signal to Noise Ratio*), equação 2.5.

$$R_c = R_b * 2^{SF} \quad (2.4)$$

$$S = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR \quad (2.5)$$

O SF é o número de *bits* por símbolo, no LoRa estes valores pode ir de 6 a 12 (sendo o 6 não permitido pelo LoRaWAN). Utilizando o SF consegue-se expressar o tempo de símbolo, equação 2.6, que por sua vez dá o ritmo de símbolo, R_s , que pode ser expressado pela equação 2.7.

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.6)$$

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2.7)$$

Como se pode ver na tabela 2.1 para cada SF existe um SNR mínimo definido pela norma (este limite é teórico). Com o aumento do SF o R_b diminui, a sensibilidade do receptor aumenta e o alcance aumenta, ao R_b diminuir o tempo de emissão ou ToA (*Time on Air*) aumenta.

SF	Valor máximo de um chip	SNR limite [dB]
7	128	-7.5
8	256	-10
9	512	-12.5
10	1024	-15
11	2048	-17.5
12	4096	-20

TABELA 2.1: Variação do SF com tamanho de chip e SNR limite [4].

Com a figura 2.3, conclui-se que com o aumento do SF o ritmo binário correspondente diminui, mas para maiores larguras de banda consegue-se sustentar um maior ritmo binário para um maior SF.

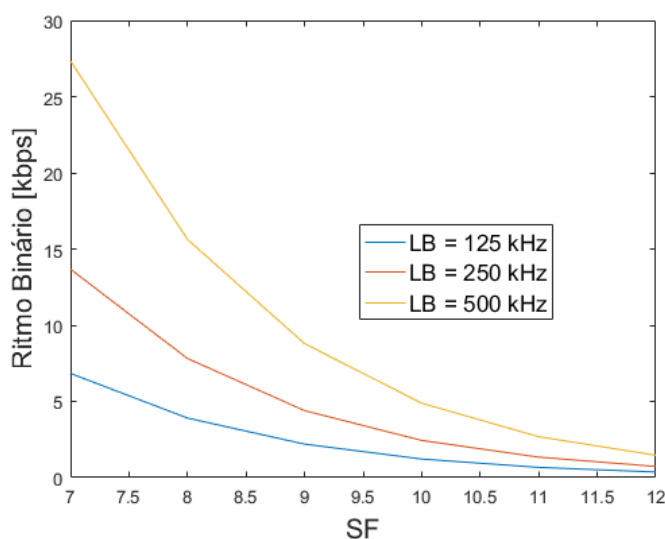


FIGURA 2.3: Evolução do ritmo binário com o SF.

O LoRa possibilita a modificação da frequência de emissão. Esta pode ser modificada para estar na banda dos 150 MHz, na dos 433 MHz ou dos 850 MHz a 1 GHz. Na Europa pode-se transmitir dos 863 MHz aos 870 MHz, estando cada canal separado por 0.3 MHz. Na tabela 2.2 pode-se observar as frequências obrigatórias segundo as especificações LoRAWAN [5].

Frequência [MHz]	SF e BW[kHz]
868.1	SF7-SF12 (BW=125)
868.3	SF7-SF12 (BW=125) e SF7 (BW250)
868.5	SF7-SF12 (BW=125)

TABELA 2.2: Tabela de frequências [5].

O LoRa para ser mais robusto à interferência, utiliza a técnica FEC (*Forward Error Correction*) para recuperar os bits perdidos devido à interferência. O CR no FEC descreve a proporção

de bits que transmitem informação. No LoRa o CR varia de 1 a 4, só se o deve ter em conta quando se introduz o FEC, e só se deve introduzir o FEC quando é expectável interferência na ligação, onde o aumento do ToA é compensado pela recuperação dos bits.

Com a introdução do FEC o R_b é redefinido, como se vê na equação 2.8.

$$R_b = SF * \frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}} \frac{BW}{}} \quad (2.8)$$

A potência de emissão no LoRa ao ser modificada afecta o consumo energético e o alcance do sinal. Este factor, no operador TTN, na Europa está limitado a 14 dBm na banda dos 868 MHz [6].

2.1.2 Trama Física

A trama física ou PHY (*Physical*) é composta por várias secções, figura 2.4, cada uma destas tem a uma função específica.

A primeira secção é o preâmbulo, este começa com uma sequência constante de *upchirps*, os últimos dois codificam o valor de um *byte* que é usado para diferenciar redes LoRa. Acaba-se o preâmbulo com dois e um quarto *downchirps*. O tamanho desta secção é entre 10.25 e 6559.25 símbolos.

A segunda secção é o *header*, este é opcional, sendo utilizado para dar informações sobre o *payload* (tamanho e outras informações), FEC e informar sobre a presença de um CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de 16 bits que é opcional. A presença desta secção especifica o tipo de pacote (explícito ou implícito).

Preâmbulo	Header	CRC	Payload	Payload CRC
	(só modo explícito)			

FIGURA 2.4: Formato de trama PHY.

A terceira secção é o *payload*, neste campo é onde se encontra os dados da trama.

A quarta secção é o CRC do *payload*, esta secção é opcional.

2.1.3 ToA

ToA é o tempo total de transmissão de uma trama LoRa, para o calcular começa-se por calcular o tempo de símbolo, equação 2.6. O tempo de símbolo é usado para calcular o tempo de preâmbulo, equação 2.9, o $n_{preamble}$ corresponde ao número de símbolos no preâmbulo.

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25)T_{sym} \quad (2.9)$$

Para calcular o tempo que o *payload* demora a transmitir tem de se calcular o número de símbolos que formam o *header* e o *payload*.

A equação 2.10 expressa o número de símbolos que formam o *header* e o *payload*. Nesta o PL é o número de bytes no *payload*, SF é o factor de espalhamento, o H é um identificador de *header*, quando este é igual a 0 existe *header*, o DE é igual a 1 quando a optimização para débito baixos está ligada e CR é o débito de codificação que varia de 1 a 4.

$$n_{payloadheader} = 8 + \max(\text{ceil}(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)})(CR + 4), 0) \quad (2.10)$$

Tendo o resultado da equação 2.10, pode-se calcular o tempo de transmissão do *payload* pela equação 2.11.

$$T_{payload} = n_{payloadheader} * T_{sym} \quad (2.11)$$

Com as equações 2.11 e 2.9 obtém-se a equação 2.12 que expressa o ToA.

$$T_{pacote} = T_{payload} + T_{preamble} \quad (2.12)$$

O *duty cycle* é a fracção de tempo que um emissor está a transmitir numa frequência. Quando existem múltiplos canais a serem utilizados pelo mesmo emissor, as fracções por canal são somadas (só é verdade se for na mesma banda) [7].

Na Europa existem regulações específicas do *duty-cycle* para as frequências que o LoRa opera, estas podem ser vistas na tabela 2.3.

Frequências [MHz]	Percentagens de <i>duty cycle</i>
863 - 868.6	1%
868.7 - 869.2	0.1%
869.4 - 869.65	10%
869.7 - 870	1%

TABELA 2.3: *Duty Cycles* máximos na Europa [6].

Com estas equações conclui-se que com o aumento do BW existe uma diminuição do ToA, com o aumento do CR tem-se um aumento do ToA e que com o aumento do ToA existe um aumento do *duty cycle* e do consumo energético.

Com a figura 2.5, consegue-se concluir que com o aumento do SF existe um aumento do tempo de emissão, este aumento é atenuado se aumentarmos a largura de banda, esta conclusão é apoiada pela Figura 2.3.

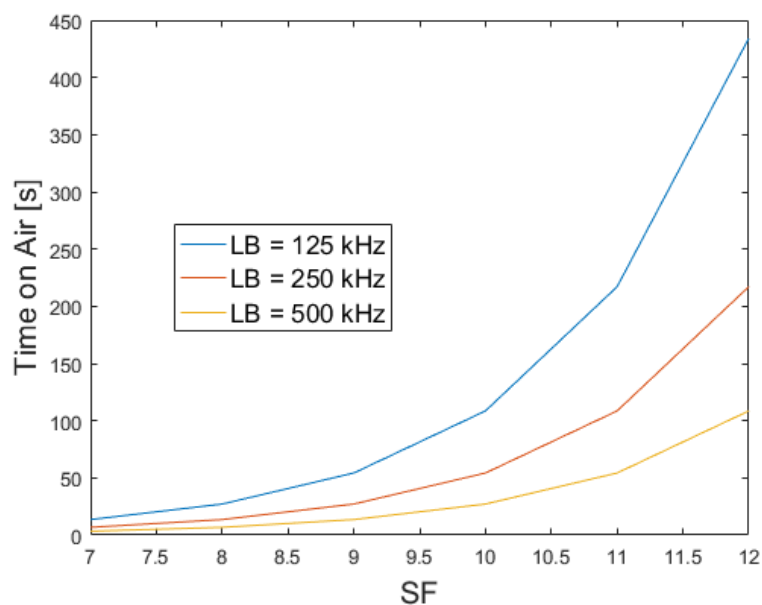


FIGURA 2.5: Evolução do TOA com o SF.

2.1.4 MAC ou LoRaWAN

LoRaWAN é um protocolo MAC criado para utilizar o LoRa, este foi principalmente criado para ser utilizado por redes de sensores, onde estes enviam dados a débitos baixos e intervalos longos entre mensagens.

Nesta secção explorar-se-à a arquitectura da rede, o conceito de classes, o formato das tramas e as características específicas desta rede.

Uma rede LoRaWAN é composta por sensores, *gateways* e servidores, figura 2.6.

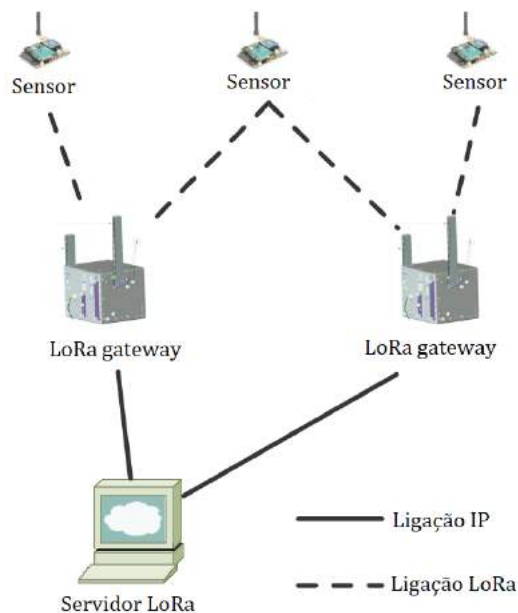


FIGURA 2.6: Rede LoRa (adaptado de [8]).

Os sensores têm a função de capturar informação relevante e a enviar aos *gateways*. Estes sensores não estão associados com um *gateway* específico. Os *gateways* têm a função de reencaminhar os pacotes enviados pelos sensores para um servidor. Os servidores LoRa são responsáveis por verificar, se de os sensores a que estes estão associados foram enviados pacotes duplicados, e eliminá-los, também têm a função de gerar os pacotes *downlink* [5].

2.1.5 Classes

No LoRaWAN existe o conceito de classes, cada classe aumenta as aplicações que esta tecnologia pode suportar, estas existem principalmente porque uma das maiores preocupações em LoRaWAN é o consumo energético. Com a criação de classes, o utilizador pode dependendo das suas necessidade escolher qual das classes é que é melhor para si. Existem três classes, A, B e C [9].

Na classe A, figura 2.7 e 2.8, as tramas são divididas entre transmissões *uplink* e *downlink*. Cada janela *uplink* é seguida de duas janelas *downlink*, a janela *uplink* é agendada pelo sensor quando este precisa.

A classe A é assíncrona, o que significa que os sensores não tem de esperar por um tempo específico para comunicar com o *gateway*, mas este precisa de uma transmissão *uplink* para comunicar, também permite comunicações bidireccionais. De todas as classes LoRaWAN esta é a mais eficiente em questão ao consumo energético. Esta classe é a única que tem de ser suportada em todos os sensores.

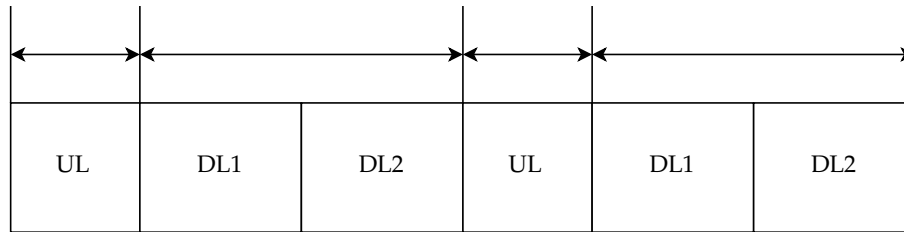


FIGURA 2.7: Trama de Classe A.

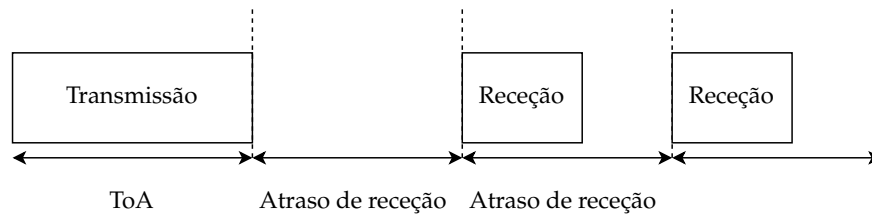


FIGURA 2.8: Classe A com as janelas representadas.

A classe B, figura 2.9 e 2.10, usa janelas extras de *downlink* em que a sua duração é definida pelo *gateway*. Esta classe adiciona uma janela de recepção sincronizada com o servidor, com o propósito de ter um sensor disponível para recepção de informação a tempos previsíveis. Esta classe é possibilitada pelo o *gateway* enviar uma mensagem periodicamente com o intuito de sincronizar todos os sensores na rede.

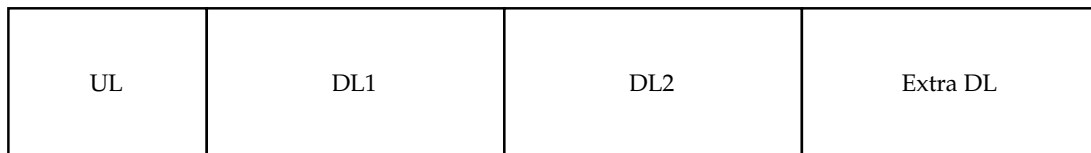


FIGURA 2.9: Trama de Classe B.



FIGURA 2.10: Classe B com as janelas representadas.

Na classe C, figura 2.11 e 2.12, os sensores podem estar sempre a receber, menos quando estão a transmitir, por isso esta classe é ideal para aplicações que não se preocupem com o consumo energético. Nesta classe não existe latência na comunicação *downlink*, excepto quando o sensor transmite.

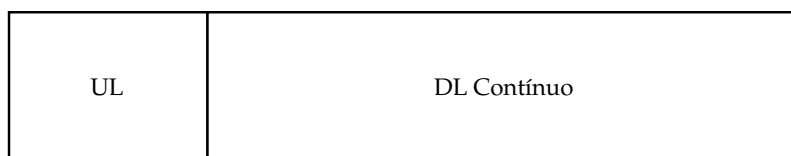


FIGURA 2.11: Trama de Classe C.

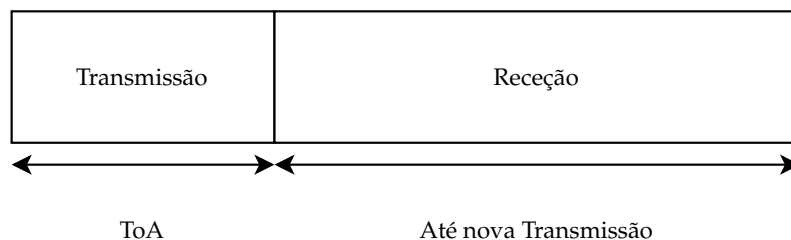


FIGURA 2.12: Classe C com as janelas representadas.

2.1.6 Trama MAC ou LoRaWAN

A trama LoRaWAN, figura 2.13, vai incluída no campo *payload* da trama física, figura 2.4, esta é formada por três campos que vão ser descritos a seguir.

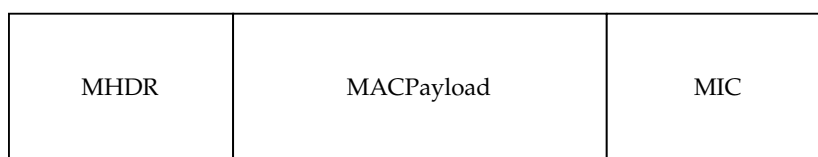


FIGURA 2.13: Trama LoRaWAN.

O MHDR (*Mac Header*) tem a função de especificar o tipo de mensagem (*MType* que diferencia o tipo de mensagem MAC que está a ser enviado, estes tipos podem ser vistos na tabela 2.4)) e de indicar a versão do formato da trama em que esta foi codificada.

MType	Descrição
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	RFU
111	Proprietary

TABELA 2.4: Tipos de mensagem MAC.

Como se pode ver na tabela 2.4 existem vários tipos de mensagens MAC, as mensagens *Join Request* e *Join Accept* são usadas para estabelecer uma ligação entre o *gateway* e o sensor, as mensagens *Confirmed Data* são utilizadas para dizer se a mensagem precisa de ser confirmada pelo receptor, a mensagem RFU (*Reserved for Future Usage*) é um tipo reservado para o futuro e finalmente a mensagem *Proprietary* é utilizada para funções que não existam nesta lista.

O *MAC Payload* contém vários campos dentro de si (como pode ser visto na figura 2.14):

- FHDR (*Frame Header*) contém o DevAddr (endereço curto do receptor), o FCtrl (*Frame Control*), o FCnt (*Frame Counter*) que é o contador de trama e o FOpts (*Frame Options*) que é utilizado para transportar os comandos MAC;
- FPort (*Frame Port*) é um campo opcional, se o campo *payload* não estiver vazio este campo tem de estar presente, se FPort for 0, o FRMPayload (*Frame Payload*) contém somente comandos MAC;
- FRMPayload se a trama contém dados, este campo tem de estar encriptado antes do MIC ser calculado, este campo funciona em conjunto com o FPort.

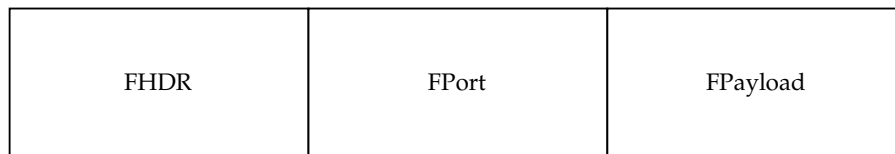


FIGURA 2.14: Formato do *MAC Payload*.

O MIC (*Message Integrity Code*) é utilizado para autenticar mensagens LoRaWAN, este pode ser calculado seguindo todos os campos na mensagem na equação 2.13.

$$msg = MHDR|FHDR|FPORT|FRMPayload \quad (2.13)$$

2.1.7 *The Things Network*

A TTN (*The Things Network*) é um projecto criado com o objectivo de facilitar a criação de uma rede LoRaWAN. Um dos propósitos deste projecto é facilitar a criação de uma rede que se expande com a vontade dos utilizadores, fornecendo um conjunto de ferramentas que possibilita a criação de uma aplicação de baixo custo, de alta segurança para uma rede global e aberta.

A arquitectura da rede TTN, figura 2.15, difere muito pouco da rede LoRaWAN. Esta rede começa com um sensor LoRaWAN activado por ABP (*Activation by Personalization*) ou OTAA (*Over the Air Activation*), seguido por um *gateway* que recebe mensagens LoRaWAN e encaminha-as para o *router* utilizando os métodos de segurança da TTN. O *router* tem a função de receber as mensagens e encontrar um *broker*, o *broker* que tem as funções de identificar o objecto, remover duplicados e encaminhar a trama para o *handler* onde a aplicação

está registrada. O *handler* tem a função de remover a encriptação dos dados, e publicar a mensagem na aplicação. Existe também o servidor de descoberta que mantém uma lista dos componentes registados na rede e um servidor de rede que mantém uma lista do estado destes componentes, estes dois servidores funcionam em conjunto [10].

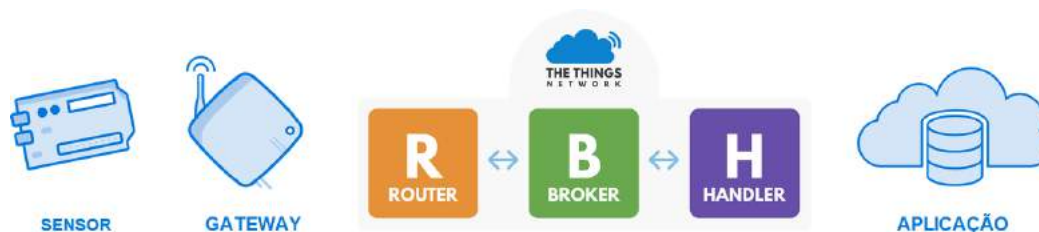


FIGURA 2.15: Rede TTN (figura adaptada).

O LoRaWAN especifica identificadores para sensores, aplicações e *gateways*. Os sensores tem um identificador único de 64 bits (DevEUI), este é criado por quem fabricou o sensor, quando se juntam à rede os sensores recebem um identificador não único e dinâmico de 32 bits (DevAddr), neste 7 bits são impostos pela rede TTN usando o NwkSKey (*Network Session Key*), os bits restantes são atribuídos dependendo do tipo de activação.

Nas aplicações o identificador chama-se AppEUI, tem 64 bits e é único, quando se cria uma aplicação o servidor TTN coloca um valor que vem de um dos endereços livres da TTN *foundation*.

As *gateways* vêm com um identificador de fábrica, este não tem de ser utilizado por esta especificamente, isto significa que, se for o dono de duas *gateways*, os identificadores delas podem trocar-se entre si desde que estejam registados na mesma conta TTN. Isto quer dizer que dentro da rede as *gateways* podem estar identificadas como outras.

Sendo este um protocolo rádio, qualquer pessoa pode capturar e guardar as mensagens enviadas, este facto traz um número de preocupações, principalmente em que questão da privacidade e segurança na rede.

Pelas razões previamente mencionadas o protocolo LoRaWAN especifica três chaves privadas cada uma com 128 bits.

A chave NwkSKey é utilizada entre comunicações do sensor e o servidor, esta verifica a validade das mensagens, na TTN esta chave é usada para criar o *DevAddr* (endereço não único do sensor) e relacionar a chave com um DevEUI e AppEUI.

A chave AppSKey (*Application Session Key*) é utilizada para encriptar e desencriptar os dados de uma trama, esta é encriptada entre o sensor e o servidor TTN.

A chave AppKey (*Application Key*) só é gerada quando se utiliza sensores activados por OTAA, esta chave é utilizada para descobrir a AppSKEY e a NwkSKey. Na TTN pode-se ter uma chave por sensor ou uma para todos os sensores que se controle.

As chaves NwkSKey e AppSKey são únicas por sensor, se utilizar-se OTAA são geradas a cada activação, se utilizar-se ABP esta chave mantém-se até o utilizador as mudar.

2.1.8 OTAA

O OTAA é o método mais seguro e preferido para um sensor se ligar à rede TTN.

O OTAA segue os seguintes passos:

1. O sensor envia o pedido *join-request*, com o DevEUI, AppEUI, AppKey e um Dev-Nonce.
2. Qualquer *gateway* que receba envia o pedido para a rede.
3. O servidor da rede recebe o pedido e verifica se o servidor está associado com o AppEUI, se sim responde com a mensagem *join-accept*.
4. A resposta leva o NetID, DevAddr, o AppNonce e informação de como a rede está configurada, tal como os DLSettings, RxDelay e opcionalmente o CFList. Só o *gateway* com o sinal mais forte é que envia esta resposta.
5. O sensor guarda o NetID, o DevAddr e as configurações da rede, após utiliza o AppNonce para gerar as chaves de sessão (NwkSKey e AppSKey).

As vantagens do OTAA são, as chaves de sessão são só geradas quando são precisas assim não podendo ser comprometidas, se o sensor se juntar a uma rede nova só tem de gerar novas chaves, e não de ser reprogramado, e finalmente certos parâmetros de rede podem só ser especificados quando o sensor se junta, assim estando melhores adaptados para as condições presentes da rede.

As desvantagens são que o sensor tem de ter pré-programado o DevEUI, Appkey e o AppEUI correspondente, também obriga o sensor ter a capacidade de ter memória para guardar a chaves geradas.

2.1.9 ABP

Na activação do sensor por ABP não é preciso o DevEUI, AppEUI ou AppKey, em vez disso utiliza-se as chaves NwkSKey e AppSKey, estas são programadas no sensor e este é pré-registado na rede.

As vantagens do ABP são que utilizando este método de activação o sensor não necessita da capacidade de poder fazer o pedido *join* e de decidir se este é necessário.

As desvantagens são que cada chave por sensor tem de ser únicas, se o sensor for comprometido a algum momento as chaves perdem o seu valor (se um utilizador tiver a usar as

mesmas chaves por vários sensores, todas elas estão comprometidas), a rede não pode decidir quando o sensor se junta e finalmente se o sensor for comprometido, juntar a uma nova rede ou as chaves expirarem este tem de ser reprogramado.

2.1.10 Contadores de tramas

Mesmo não sendo possível ler o conteúdo das mensagens, nem as modificar devido às chaves de sessão, é possível reenviar mensagens assim sobrecarregando a rede LoRa. Este problema é resolvido com a introdução de contadores de tramas.

Quando um sensor é activado, os contadores de tramas FCntUp e FCntDown são postos a 0, cada vez que houver uma mensagem *uplink* o FCntUp incrementa, se for *downlink* então o FCntDown incrementa, se qualquer um deles receber uma mensagem com um contador inferior ao esperado essa mensagem é ignorada.

A desvantagem desta medida é que para objectos activados por ABP, se desligar-se e ligar-se os contadores vão para 0 e todas as mensagens até se igualizar-em são ignoradas pela rede. Isto é devido ao facto que a activação por ABP não faz o pedido *join*, assim se desligar-se e ligar-se, o contador continua no valor antigo na rede, mas o sensor envia com o contador a 0.

2.1.11 Adaptive Data Rate

Adaptive Data Rate ou ADR é um mecanismo utilizado para otimizar débitos, TOA e consumo energético na rede LoRa. Esta técnica só deve ser utilizada no caso em que os nós estão sempre na mesma localização, assim fornecendo um canal rádio estável.

Para determinar qual o melhor SF a utilizar, o ADR precisa de ter medidas do canal rádio, para isso quando este é activado as seguintes 20 mensagens *uplink* são guardadas e utilizadas para calcular uma margem. De cada medida retira-se o SNR e utiliza-se o maior na equação 2.14, nesta equação a margem é normalmente 5 dB.

$$SNR_{margem} = SNR_{max} - SNR_{Req} - Margem \quad (2.14)$$

Com o SNR_{margem} calculado calcula-se o NStep que é $NStep = \frac{SNR_{margem}}{3}$, após este valor ser arredondado, decide-se o que fazer em base do resultado.

Se for 0 não existe mudança, se for maior que 0 e não tivermos no SF12 aumenta-se o SF por 1, se tivermos no SF12 diminui-se a potência de transmissão e diminui-se o resultado de NStep por 1 e verifica-se se pode diminuir a potência de transmissão mais se não o processo acaba, se sim repete-se até não se poder fazer mais mudanças.

Se tivermos um NStep menor que 0, verifica-se se a potencia de transmissão está no máximo se não sai-se do processo, se sim aumenta-se a potência por 3 dB e incrementa-se ao NStep por 1 e repete-se o processo.

2.2 Sigfox

O Sigfox é uma tecnologia com o propósito de suportar baixos débitos binários a longas distâncias. Com estas características em mente, foi feito um estudo desta tecnologia com o intuito de a comparar com a tecnologia LoRa [11].

2.2.1 Características

O Sigfox traz certas características predominantes que o fazem sobressair em relação a outros protocolos.

Suporta 333 canais, cada um com 100 Hz de largura de banda e é utilizado FHSS (*Frequency-hopping Spread Spectrum*) em 3 destes 333 [12].

Uma rede Sigfox pode ter até 1 milhão de objectos por estação base, todos este objectos formam uma rede de topologia de estrela.

Todos os dados são tratados pela *cloud* que se liga às aplicações, todos os pacotes chegam às aplicações por IP (*Internet Protocol*). A *cloud* é o único destino obrigatório do pacote, após a recepção autentica e verifica se existem duplicados e envia ao cliente.

2.2.2 Rede Sigfox

A rede Sigfox segue a arquitectura típica das redes LTN (*Low Troughput Network*), na figura 2.16 consegue-se ver uma rede Sigfox constituída por objectos (sensores) que transmitem um sinal rádio que é transferido para a rede Sigfox, este chega aos *gateways* (estação base) que estão todos ligados directamente com à *cloud*, esta envia a informação recebida para os receptores da informação (servidores, aplicações, etc...).

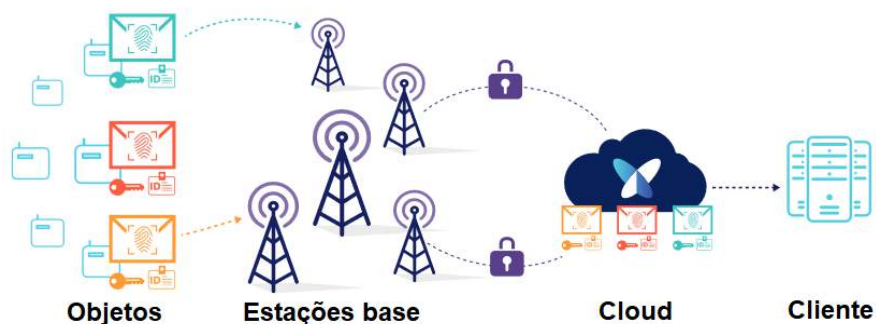


FIGURA 2.16: Rede Sigfox [11].

2.2.3 Camada física

A camada física cria e impõe a modulação nos sinais usando DBPSK (*Differential Binary Phase-Shift Keying*) no *uplink* e GFSK (*Gaussian frequency Shift Keying*) no *downlink*.

O *Sigfox* utiliza o UNB (*Ultra Narrow Band*), o que significa que na Europa na banda dos 868 MHz, tem-se uma transmissão com uma largura de banda de 100 Hz em *uplink* e de 600 Hz em *downlink*. É de notar que para haver mais robustez no *uplink* (visto que esta transmissão é tipicamente a mais fraca e portanto mais susceptível a ruído) é utilizado OSSS (*Orthogonal Sequence Spread Spectrum*), este método introduz imunidade a vários tipos de ruído e à interferência de multi-caminho, também introduz um certo nível de segurança na transmissão visto que só o recipiente que sabe o código é que pode decodificar a informação.

O *Sigfox* vem com certas limitações no que toca a canais *uplink* e *downlink* tal como se pode ver na tabela 2.5.

	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>
Tamanho da trama	12	8
Ritmo Binário (bps)	100	600
Mensagens por dia	140	4
Sensibilidade (dBm)	<14	<27

TABELA 2.5: Limitações *Sigfox*.

No *Sigfox* a comunicação bidireccional é das características principais, esta vem com certas condições, por exemplo, não existe o modo de recepção passiva, o que significa que a estação base não pode enviar mensagens ao sensor a qualquer momento, tem de esperar até a janela de recepção estiver activa (esta só abre quando a janela de transmissão acabar), esta janela mantém-se aberta por um período de 25 segundos que permite a recepção de um mensagem de 4 bytes.

2.2.4 Camada MAC

Esta camada adiciona campos para identificação e autenticação do objecto HMAC (*hash-based message authentication code*) e um campo para correcção de erros CRC. Cada elemento da rede *Sigfox* tem um identificador único, este é usado na autenticação do objecto e no encaminhamento de mensagens.

A comunicação na rede *Sigfox* utiliza o método *fire and forget*, o que significa que o receptor não envia um ACK de resposta, assim pondo a responsabilidade de uma transmissão fiável maioritariamente do lado do transmissor, neste método a mensagem é enviada três vezes em três frequências diferentes pelo emissor.

As tramas MAC diferem de *uplink* para *downlink*. Como se pode ver na figura 2.17, as tramas *uplink* começam com um preâmbulo de símbolos predefinidos com a função de sincronizar

a transmissão, a seguir tem-se o campo sincronizador de trama que contém o tipo de trama a ser transmitida, depois tem-se o campo identificador de receptor, após começa o campo dados, seguido do campo autenticação que contém o HMAC e finalmente o campo FCS (*Frame Check Sequence*) que é utilizado para a detecção de erros.

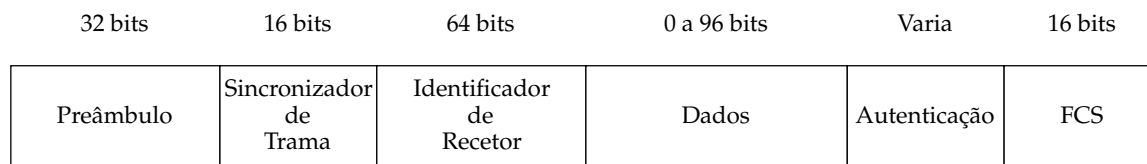


FIGURA 2.17: Trama *uplink Sigfox*

Como se pode ver na figura 2.18 as tramas MAC *downlink* em *Sigfox* começam com um preâmbulo, após este existe o campo sincronizador de trama, seguido do campo *Flags*, neste campo os dois primeiros bits indicam o número de bytes adicionados para ter uma mensagem completa, o terceiro bit indica se é necessária uma resposta e o ultimo bit é sempre 0, após este tem-se o campo autenticação, o campo códigos de erros e o campo dados.

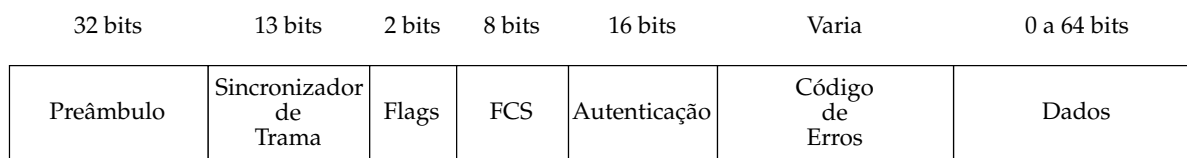


FIGURA 2.18: Trama *downlink Sigfox*.

2.2.5 Segurança

O tópico de segurança é muito importante num mundo cada vez mais digital, o *Sigfox* introduz segurança na sua rede ao assinar cada mensagem enviada com uma chave secreta, esta assinatura é única para cada mensagem.

O *Sigfox* envia cada mensagem três vezes em frequências diferentes, a assinatura secreta contém o número de sequência assim evitando réplicas, este envio assegura uma maior qualidade de serviço. Um passo extra de segurança é que um objecto só pode receber durante o período em que ouve, assim fazendo com que para enviar mensagens não autorizadas, tem de se previamente saber os períodos em que um objecto está a ouvir.

Fora da ligação entre o objecto e *gateway*, as comunicações estão asseguradas pelo próprio *Sigfox*, que impõem uma ligação por VPN (*Virtual Private Network*) das estações base à *cloud*, as plataformas *online* só podem ser acedidas por HTTPS (*Hyper Text Transfer Protocol Secure*).

2.3 *Narrowband Internet of Things*

O NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) é uma tecnologia de acesso rádio, tendo sido criada para competir num mercado de redes de acesso de baixa potência e largura de banda, tem a

característica de estar integrada no norma LTE (*Long Term Evolution*) [13].

Esta tecnologia foi criada com o intuito de minimizar a sinalização, ter segurança em todas as partes do sistema, aumento do tempo de vida dos objectos da rede e de conseguir a entrega de dados IP e não IP.

2.3.1 Rede NB-IoT

Para enviar dados para uma aplicação duas melhorias tiveram de ser feitas para o ClIoT (*Cellular Internet of Things*) na EPS (*Evolved Packet System*).

A primeira melhoria é a optimização do plano de controlo do ClIoT na EPS, com esta optimização os dados *uplink* são transferidos do eNB (*Evolved NodeB*) para o MME (*Mobility Management Entity*), deste ponto os dados podem ser transferidos para o SGW (*Serving Gateway*) e após para o PGW (*Packet Data Network Gateway*) ou para o SCEF (*Service Capability Exposure Function*) (esta rota só é possível para dados que não sejam IP), em *downlink* os dados vão pelo mesmo caminho só que no sentido contrário, esta optimização é melhor para transmissões de tramas pequenas e infrequentes.

O caminho tomado pelos dados nesta solução está exemplificado na figura 2.19 como o caminho vermelho.

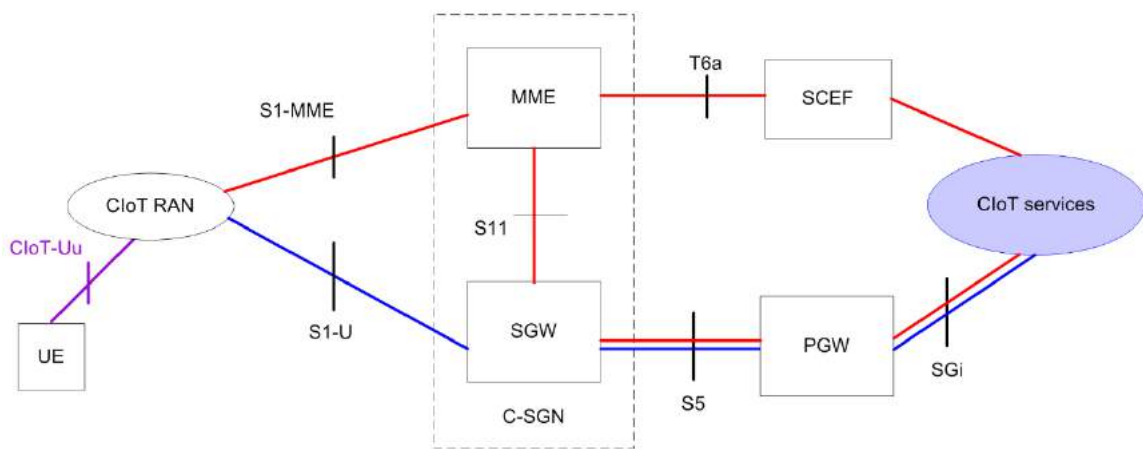


FIGURA 2.19: Rede NB-IoT[14].

A segunda melhoria é a optimização do plano do utilizador, nesta melhoria os dados são transferidos via o SGW e PGW para o servidor, assim facilitando uma sequência de tramas a ser enviadas, este caminho possibilita os dois tipos de dados a ser enviados (IP e não IP), este caminho está representado na figura 2.19 a azul.

De todos os elementos da rede apresentada na figura 2.19, o elemento novo ou seja que não está na rede LTE, é o SCEF, este tem a função de entregar dados não IP sobre o plano de controlo e fornecer uma interface abstracta para os serviços da rede.

2.3.2 Transmissão em *downlink*

Na transmissão *downlink* aplica-se OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), utilizando um espaçamento entre portadoras de 15 kHz, tendo cada símbolo 12 portadoras faz com que cada símbolo tenha um banda de 180 kHz.

A transmissão em *downlink* no NB-IoT é feita com a utilização de três canais e três sinais:

- NPBCH (*Narrowband Physical Broadcast Channel*) que transporta a informação MIB (*Master Information Block*);
- NPDCCH (*Narrowband Physical Downlink Control Channel*) que controla a transferência de dados entre o utilizador e o eNB;
- NPDSCH (*Narrowband Physical Downlink Shared Channel*) transporta a informação de sinais e dados que não são transportados pelo NPBCH;
- NRS (*Narrowband Reference Signal*) é um sinal que é transmitido em todas as tramas que podem ser usadas para *broadcast*;
- NPSS (*Narrowband Primary Synchronization Signal*) sinal que é utilizado para estimar a frequência no utilizador;
- NSSS (*Narrowband Secondary Synchronization Signal*) é um sinal que tem a mesma função que o primário mas em tramas diferentes.

2.3.3 Transmissão em *uplink*

Na transmissão *uplink* do NB-IoT a modulação aplicada é o SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*), com 3.75 kHz ou 15 kHz entre portadoras, é o eNB que decide qual destes a usar.

A transmissão em *uplink* no NB-IoT é feita com a utilização de dois canais e um sinal:

- NPUSCH (*Narrowband Physical Uplink Shared Channel*) é o canal pelo qual todos os dados são enviados, este tem dois formatos, o primeiro transfere dados, o segundo formato transfere UCI (*UL Control Information*);
- NPRACH (*Narrowband Physical Random Access Channel*) neste canal é transmitido um preâmbulo que pode indicar que o objeto quer ter acesso, este preâmbulo consiste num prefixo cíclico ou CP (*Cyclic Prefix*), seguido de cinco símbolos, o preâmbulo vem em dois formatos que diferem somente no tamanho do CP;
- DMRS (*Demodulation Reference Signal*) este sinal é multiplexado com os dados para ser só transmitido quando é transmitido dados.

2.3.4 Modos de operação

O NB-IoT foi criado para ter as características de rápida adopção e integração em redes LTE com modificações simples dependendo do caso, para multiplicar os casos de utilização do NB-IoT foram criado três modos de operação, figura 2.20 [14]:

- *Stand alone operation* este modo é utilizado em situações onde serviços que já não sejam usados e que ocupam bandas que não foram reutilizadas são ocupadas por portadoras NB-IoT.
- *Guard band operation* neste modo o NB-IoT situa-se em portadoras que se encontram na banda de guarda do LTE, o NB-IoT posiciona-se de modo a não retirar recursos ao LTE e minimizando a interferência.
- *In-band operation* neste modo o NB-IoT está posicionado dentro da banda de um serviço activo, este modo é o mais eficiente em relação ao custo, porque as operadoras não precisam de fazer mudanças ao nível de *hardware*.

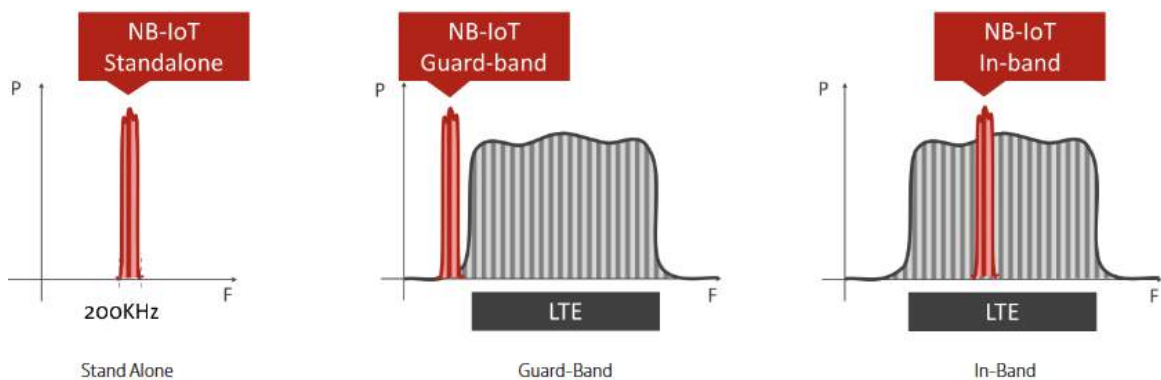


FIGURA 2.20: Modos de operação [14].

2.3.5 Tempo de vida

A tecnologia NB-IoT fornece duas maneiras para estender o tempo de vida dos objectos, o eDRX (*extended Discontinuous Reception*) e o PSM (*Power Saving Mode*) [15].

O eDRX é uma extensão do DRX (*Discontinuous Reception*) do LTE, o DRX funciona desligando por períodos pequenos o receptor do objecto, assim poupando bateria, o eDRX estende máximo destes períodos de 20.48 segundos aos 175 minutos no NB-IoT.

O modo PSM é um modo criado para ajudar os objectos NB-IoT a aumentar o seu tempo de vida, quando este modo começa o objecto fornece dois períodos (T3324 e T3412), o tempo PSM é a diferença entre estes dois. A rede pode aceitar estes períodos ou fornecer uns dela, se o objecto transmitir antes do período PSM acabar não é preciso passar pelo o processo de registar o objecto na rede, o período do PSM é limitado pelo TAU (*Tracking Area Update*). O modo PSM pode durar até 413 dias.

2.3.6 Características

As características principais do NB-IoT estão resumidas na tabela 2.6:

Cobertura	35 km
Frequência	700-900 MHz 1700-1900 MHz
Largura de banda	180 kHz
Atraso	<10s em <i>uplink</i>
Ritmo binário	250 kbps

TABELA 2.6: Características NB-IoT [16].

2.4 Comparação

Com o levantamento feito a comparação entre redes fica simples, nesta secção vai-se começar por comparar o LoRaWAN e *Sigfox*, após compara-se o LoRaWAN com o NB-IoT e conclui-se com as razões pela qual se escolheu o LoRaWAN.

2.4.1 LoRaWAN e *Sigfox*

A rede *Sigfox* não é uma opção para a maior parte dos casos visto que a rede em si não está disponível em todas as localizações, a rede LoRaWAN tem a vantagem de ser completamente feita pelo utilizador, portanto se um utilizador não tiver cobertura pode simplesmente criar um *gateway* na sua localização, assim estendendo a cobertura, mesmo que esta facilidade necessite de um maior esforço e conhecimento por parte do utilizador.

Comparando directamente vê-se que o *Sigfox* tem um cobertura teórica maior que o LoRaWAN, dependendo da localização tem menor potência de emissão, mas na questão do tamanho da mensagem o *Sigfox* é muito menor (12 bytes para 242 do LoRaWAN), o ritmo binário LoRaWAN é melhor visto que não limita o número de mensagens por dia.

2.4.2 LoRaWAN e NB-IoT

As diferenças principais entre NB-IoT e LoRaWAN, são que o LoRaWAN usa uma parte do espectro não licenciada, o que na Europa significa um *duty-cycle* de 1%, o que limita a quantidade e frequência da transmissão de mensagens. O LoRaWAN pode ser usado por utilizadores que não sejam clientes de operadoras, enquanto o NB-IoT traz débito maiores, estações base com mais potência de emissão e funções mais complexas e menor latência.

Concluindo a rede LoRaWAN é a melhor se o utilizador tiver os conhecimentos necessários, se a aplicação pretendida precisar de bidirecionalidade, mobilidade ou de objectos com grande tempo de vida, e se o cliente tiver preocupações em questões monetárias visto que funciona numa parte do espectro não licenciada.

3 Sistema Desenvolvido

O objectivo deste projecto é a criação de um equipamento ou dispositivo, que possibilite a monitorização dos parâmetros ambientais, técnicos e de segurança de um armário SLAT. Para esta monitorização foi utilizado sensores que notifiquem um processador destes parâmetros.

Neste capítulo irá-se explorar os requisitos que o nosso dispositivo precisa, a arquitectura, os sensores que o compõem, a alimentação deste, o controlador escolhido e as suas capacidades.

3.1 Requisitos

No processo inicial do projecto foram propostas várias situações que justificam a utilização de certos sensores. A escolha destes sensores pode ser justificada com três factores:

- Custo, visto que idealmente estes equipamentos de monitorização irão estar numa multitude de armários, o custo tem de ser baixo para ajudar na proliferação;
- Consumo, estando o equipamento a funcionar com a alimentação do armário, o seu consumo tem de ser baixo para não interferir com o funcionamento geral;
- Complexidade, porque tem de ser um equipamento que não precise de configuração, em que a única preocupação na instalação deve ser a localização no armário.



FIGURA 3.1: Armário 1.

Vendo o diagrama de blocos exposto na figura 3.2, consegue-se ver sete entradas e duas saídas:

- Temperatura e humidade, esta tem de ser controlada porque num armário fechado que contem múltiplos elementos electrónicos, temperaturas e humidade elevadas podem corromper o funcionamento normal;
- Sonar, veio a propósito de ser uma alternativa ao sensor de porta aberta;
- Porta aberta, tem a função de detectar se algo ou alguém abriu a porta do armário, este evento tem de ser monitorizado para justificar as mudanças bruscas que os outros sensores vão sentir e para detectar se a porta foi aberta por um técnico;
- Estado da alimentação, existe para monitorizar a alimentação proveniente do armário;
- Fonte de energia alternativa, existe para se houver uma falha na alimentação dar a energia necessária para enviar mais uma mensagem a avisar deste evento;
- Aceleração, este foi colocado com o intuito de detectar eventos em que o armário muda de lugar, por exemplo em caso de embate ou no caso de uma cheia.

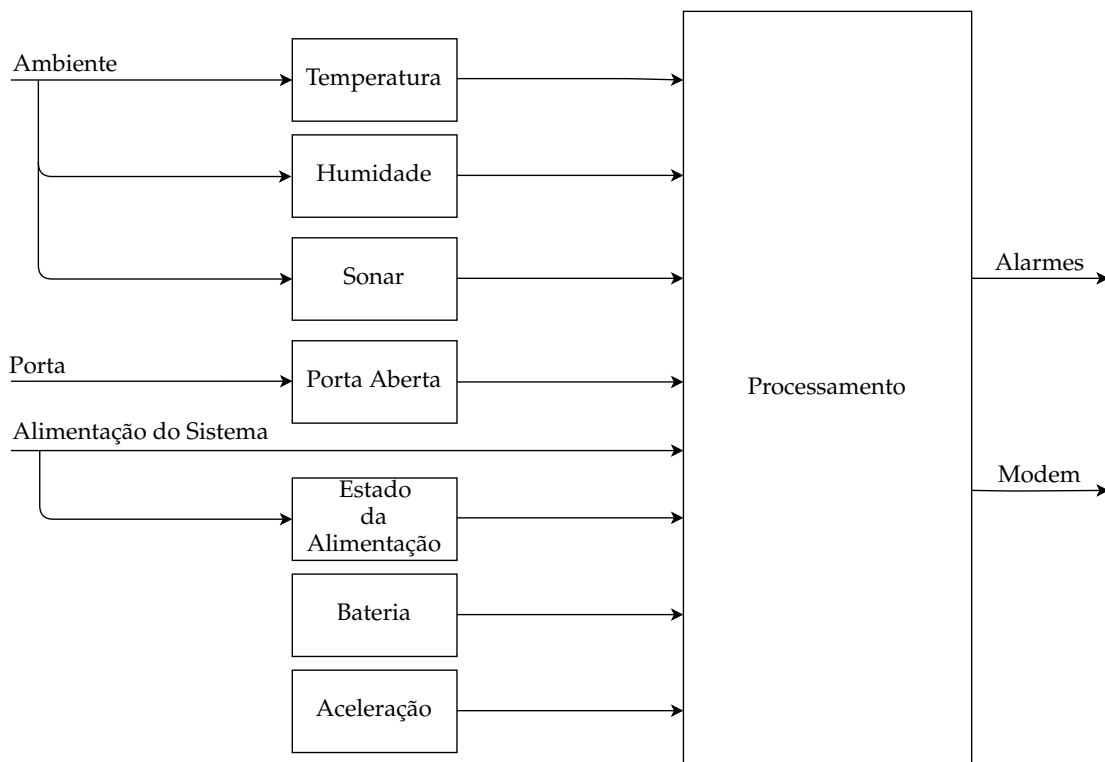


FIGURA 3.2: Diagrama de blocos.

3.1.1 Temperatura e humidade

A temperatura é definida como uma quantidade que expressa quanto calor está contido num corpo. Esta quantidade tem importância desde a física à biologia.

Sensores de temperatura podem ser divididos em seis tipos:

- Termopar, que usa a diferença de potencial criada entre dois metais diferentes para aferir a temperatura ambiente. Este tipo de sensores tem a vantagem de ter uma grande gama de medida, mas a diferença de potencial criada tem ruído alto e baixa amplitude, o que faz com que as mediadas obtidas tenham pouca resolução;
- Sensores termo resistivos, são compostos por materiais em que a sua resistividade varia com a temperatura facilmente, tem a vantagem de ser estável e preciso;
- Termístores, são normalmente usados para aplicações que necessitem de resposta rápida e precisa, estes sensores são vulneráveis a danos físicos e contaminação química;
- Infravermelho, estes sensores detectam a radiação infravermelha emitida, são úteis para medir temperaturas a uma certa distância, como a estabilidade e precisão não são boas, tem de se ter uma calibração constante;
- Estado sólido, este tipo de sensores funciona utilizando as propriedades dos semicondutores, as vantagens deste tipo de sensores é o tempo de resposta e a área ocupada pelo sensor, mas os limites de operação pequenos e a necessidade de calibração fazem este tipo de sensores indesejáveis;

A humidade é uma das quantidade mais medidas, esta tem grande importância em aplicações comerciais e industrias. Humidade é definida como a percentagem de vapor de água num gás. Sensores de humidade podem ser divididos em seis tipos:

- Sensor óptico, este funciona com a interacção colorimétrica dos materiais na superfície do núcleo da fibra, medindo assim o índice de refração que varia com a humidade;
- Sensor gravimétrico, que utiliza ondas de som para atravessar o gás que causa uma variação na velocidade da onda, com estas variações pode-se calcular a humidade;
- Sensor capacitivo, este detecta a humidade ao medir as mudanças na constante dielétrica de uma camada higroscópica;
- Sensores resistivos detectam humidade pela medição da condutividade do material que constitui o sensor, existem três tipos cerâmico, polímero e electrólitos;
- Sensores piezoresistivos, utiliza uma camada absorvente que dobra com as mudanças da humidade;
- Magnetolástico, um material deste tipo muda as suas dimensões quando exposto a um campo magnético, sabendo estas dimensões cobre-se este material com uma que mude rapidamente com a humidade, fazendo a diferença entre estas dimensões pode-se saber a humidade ambiente.

Num armário fechado que contém múltiplos elementos electrónicos, a temperatura ambiente e a humidade são factores que têm de ser altamente controlados, de maneira a prolongar o tempo de vida dos elementos em causa. Com isto em mente fez-se uma procura de sensores, que consigam ir de encontro com os três requisitos previamente mencionados,

esta pesquisa pode ser vista na tabela 3.1, esta foi construída com o intuito de comparar as diferentes capacidades de vários sensores.

	Temperatura	Humidade	Consumo	Precisão	Limites	Custo
DHT11	+	+	--	-	--	-
BME280	+	+	++	++	+++	--
TMP36	+	--	+	--	++	+
HDC2080	+	+	-	++	+++	+
MCP9700	+	--	+	--	++	+++

TABELA 3.1: Comparação de vários sensores de temperatura e humidade.

Com tabela 3.1, pode-se concluir que o sensor mais adequado para a aplicação é o BME280, mesmo tendo o maior custo é o que em todas as outras categorias é o melhor. Nesta tabela é possível ver que mesmo que o HDC2080 seja em todas as categorias melhor que BME280, a flexibilidade deste e o seu baixo custo levam a com este seja escolhido.

O sensor BME280, figura 3.3, é composto por duas interfaces, *Serial Peripheral Interface* (SPI) que é utilizado para enviar dados entre micro-controladores e periféricos, e *Inter Integrated Circuit* (I2C) que é um protocolos que permite múltiplos circuitos integrados digitais ou *chips* escravos comunicar com um ou mais *chips* mestre [17].

Este sensor é composto por 9 pinos:

- VCC é a alimentação, esta pode ir desde os 1.7 aos 3.6 V. Existem dois pinos VCC, um deles é interno e fornece energia aos componente internos e digitais, a outra alimentação fornece energia à interface digital;
- GND, que é a terra;
- SCK, que é o relógio SPI;
- SCL, que é o relógio série I2C;
- SDA, que é um pino de dados bidireccional I2C;
- SDI, que é a entrada série SPI;
- SDO, que é a saída série SPI;
- CS, pinos que selecciona o *chip* pertence à interface SPI;

Este sensor é capaz de medir humidade, pressão e temperatura, cada uma destas medidas pode ser activada ou desactivada pelo o desejo do utilizador.

Este sensor tem três modos de funcionamento, modo de sono em que não existe medição mas todos os registo são acessíveis e é consumida a mínima potência, modo forçado em que é feita uma medição e guardada os resultados dela e depois volta-se para o modo de sono, e finalmente o modo normal em que se está perpetuamente a fazer medidas.



FIGURA 3.3: Sensor BME280.

3.1.2 Sensor porta aberta

O sensor de porta aberta é provavelmente o sensor com a função mais óbvia. Este tem o intuito de saber quando algo ou alguém abriu a porta do armário. Assim informando que as mudanças bruscas que os sensores vão detectar são justificadas e não uma causa de preocupação [18].

Um dos sensores considerados foi o sensor magnético, este tem as vantagens de ser de fácil de uso, é pequeno o que facilita a instalação deste, e de ser de baixa potência. As desvantagens deste sensor emergem devido à maneira como funciona, como esta funciona detectando que existe um ímã na sua proximidade magnético exige que a instalação seja perto da porta, e que esta tenha um ímã que o active. Tendo em conta as vantagens e desvantagens deste sensor, este não foi escolhido porque, não se pode assegurar que em todos os armários onde se possivelmente vai instalar irá haver espaço perto da porta e a acrescida complexidade de instalação devido ao ímã levou à procura de soluções diferentes.

Outra solução ponderada foi utilizar um sensor de ultra-sons, este tipo de sensor tem as vantagens de ser fácil de uso e instalação. A desvantagem principal deste tipo de sensor originam no facto que as medidas feitas por este podem ser afectadas por vibrações e que num contexto urbano este tipo de interferência é prevalente.

A solução final considerada foi um sensor de luz, este sensor tem a vantagem de ser pequeno, adaptável à situação onde é colocado, devido à possibilidade de manipular o patamar de detecção de luz e de baixo consumo. A desvantagem principal deste tipo de sensor é o facto que o patamar de detecção pode ser diferente de armário para armário e da altura em que este é aberto. Visto que a luz que entra quando a porta abre de dia é diferente de noite

Como se pode ver na figura 3.4 existe dois conjuntos de pinos. O conjunto utilizado é o composto por três pinos:

- O pino G, é a terra;

- O pino V, é a alimentação;
- O pino S, é saída de dados.



FIGURA 3.4: Sensor porta aberta.

3.1.3 Aceleração

O sensor de aceleração é o sensor que tem como função verificar o estado físico do armário, o intuito da colocação deste sensor é no caso de haver um embate no armário, ou por exemplo no caso de uma cheia em que o armário fisicamente muda de lugar, com este sensor pode-se detectar estes eventos remotamente.

Existem dois tipos principais de sensores de aceleração:

- Piezoelétricos, este tipo funciona com estruturas de cristal microscópicas que geram tensão quando sujeitas a acelerações súbitas;
- Capacitivos, este tipo funciona com duas estruturas perto de si, um certo alinhamento corresponde a uma certa capacidade se uma das estruturas se mexer a capacidade muda, assim indirectamente dizendo a direcção da aceleração.

O sensor escolhido foi o ADXL335, este tem um custo acessível, baixo consumo (máximo de 1.26 mW), mas vem com a desvantagem de que a utilização não é fácil comparativamente aos outros sensores. Mas como a dificuldade é do lado da criação do circuito, esta não se traduz para a instalação [19].

O sensor ADXL335 contém uma superfície de polisilício sobre uma camada de silicone e um circuito capaz de implementar uma medição de aceleração continuamente. Os sinais de saída são proporcionais à alimentação. A superfície de polisilício contém molas que suspendem a estrutura sobre a camada e fornecem resistência às forças de aceleração

Como se pode ver na figura 3.5 este sensor é composto por 10 pinos:

- Três destes pinos são NC, o que significa que são nulos ou não ligados;
- O pino X é a saída que informa da posição no eixo X;
- O pino Y é a saída que informa da posição no eixo Y;
- O pino Z é a saída que informa da posição no eixo Z;
- O pino G é a terra;
- O pino ST é o *Self-Test*, que é um pino que quando ligado à alimentação informa se o sensor está a funcionar;
- O pino + é a alimentação.

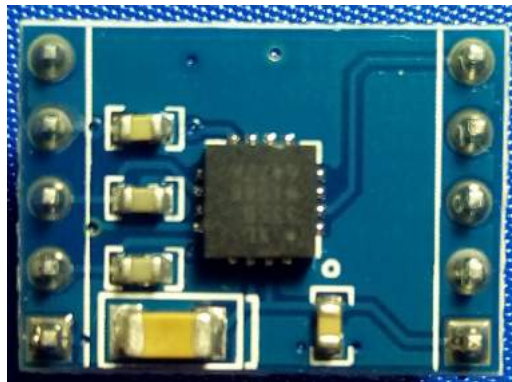


FIGURA 3.5: Sensor ADXL335.

3.2 Alimentação

O requerimento da alimentação é talvez o mais importante, pois sem este não existe a possibilidade de colocação do protótipo em qualquer lado. A alimentação geral do dispositivo é fornecida pela rede eléctrica, e com a utilização de um transformador simples é possível alimentar o protótipo dentro dos limites funcionais dos componentes.

Uma das funcionalidades do nosso módulo, é a capacidade de avisar que houve uma falha na alimentação, para cumprir esta funcionalidade o módulo necessita de ter alimentação suficiente para enviar no mínimo uma mensagem após falha na alimentação principal [20].

Neste capítulo começa-se por explicar o funcionamento das capacidades e depois compara-se com a outra solução possível, que é uma bateria.

Uma capacidade é um componente capaz de armazenar carga eléctrica num campo eléctrico, estas são tipicamente compostas por dois condutores separados por um dieléctrico. A carga é armazenada na superfície das placas, como cada placa armazena cargas iguais mas opostas, a carga total é zero. Na equação 3.1, o C é a capacidade esta é designada pelo sistema internacional de unidades como *farad*, o Q é o quociente de carga em *coulomb*, e o ΔV é a diferença de potencial entre as placas em *Volt*.

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (3.1)$$

Para carregar uma capacidade é necessário carregar cada uma das placas com cargas opostas, a carga eléctrica aumenta gradualmente até ao seu máximo.

O processo de carregamento de uma capacidade é dividido em 5 partes pelo τ_c , a cada deste período a capacidade é carregada por uma percentagem, este processo está descrito na tabela 3.2.

τ_c	Percentagem
0	0 %
1	63.2 %
2	86.5 %
3	95 %
4	97.5 %
5	100 %

TABELA 3.2: Fases de carregamento.

O τ_c pressupõem uma circuito de carregamento em que a fonte está em série com uma resistência, seguida de uma capacidade. O cálculo de τ_c está exemplificado na equação 3.2.

$$\tau_c = R * C \quad (3.2)$$

Por exemplo a capacidade usada no dispositivo é de 1.5 F, utilizando um resistência de 1 k Ω o que se traduz num tempo de carregamento máximo de 2 horas e 5 minutos,

Uma capacidade pode substituir uma bateria, estas capacidades são designadas como super capacidades, e diferem das capacidades normais no facto que tem capacidades acima de capacidades electrolíticas mas menores que baterias recarregáveis, visto que e as capacidades normais tem μF . Este tipo de capacidade servem para serem armazenadores de energia que está em constante ciclos de carga e descargas com correntes altas.

As vantagens das super capacidades sobre as baterias são:

- Operam com grande eficiência em temperaturas muito altas e baixas;
- Carregam muito rápido.

As desvantagens são:

- Descarga rápida quando inactivo, em 30 dias existe uma perda de 50% da carga;
- Diminuição da voltagem máxima ao longo do tempo;

3.3 Controlador

Para a leitura, processamento e formatação para envio é necessário um controlador neste protótipo, como se trata de um protótipo com o intuito de trabalhar numa rede LPWAN, deverá de ser de um controlador micro. Micro porque estes controladores sendo de baixa capacidade de processamento, são eficiente do ponto de vista energético.

Foram considerados dois micro-controladores, O ATMEGA32A e o arduino NANO.

A primeira a análise a fazer é a comparação de os parâmetro fornecidos pelos dois micro-controladores, esta pode ser feita com o auxilio da tabela 3.3.

	ATmega32A	Nano
Memória FLASH	32 KB	32 KB
SRAM	2 KB	2 KB
Velocidade de <i>Clock</i>	16 MHz	16 MHz
Tensão de Operação	2.7 -5.5 V	2.7 - 5.5 V
Nº de pinos	44	31
Consumo	3 mW	95 mW

TABELA 3.3: Parâmetros dos Micro-controladores.

Com a tabela 3.3 pode concluir que inicialmente o ATmega32A é melhor que o Nano, tendo mais pinos e menos consumo, é de notar que o consumo do ATmega32A é feito tendo em conta condições óptimas, e a do Nano não.

Se tivesse tido feito uma análise superficial, tinha-se escolhido o ATmega32A, mas tendo em conta as desvantagens secundárias que o Nano nos traz este é a escolha óbvia. O ATmega32A traz 2 desvantagens fundamentais, não existe possibilidade de fazer *debug*, sendo um circuito que é planeado ser replicado em massa a impossibilidade de *debug* de fios mal conectados ou sensores queimados traz um aumento de dificuldade de utilização que só é exacerbado pelo facto que a sua programação é de alta dificuldade comparativamente à do Nano. Com este factos em mente foi escolhido a utilização do Nano.

3.3.1 Algoritmo

Um algoritmo é uma sequência finita de instruções, criadas tipicamente para resolver um problema ou cálculo. No caso desta dissertação o algoritmo criado, tem a função de formatar a informação recebida de maneira a esta poder ser transmitida pela rede, e de controlar quando esta informação é enviada.

O algoritmo criado começa por activar os sensores, e criar uma base de referência. Uma base de referência, no contexto de sensores é a obtenção de valores padrão para o ambiente particular onde estes se encontram. Esta base só deve ser criada quando os sensores já estão colocados permanentemente.

Esta base é necessária porque o ambiente onde este dispositivo vai ser colocado tem de ser altamente regulado. Por isso é importante criar uma base de comparação para assim poder saber, quando é que os valores que estão a ser recebidos são normais, ou causa de preocupação. Com os testes feitos ao longo do desenvolvimento do trabalho um bom tempo para obter informação do ambiente onde se encontra e ter uma base de referência sólida é de 15 minutos.

Após a base de referência estar criada, pode-se começar a obter valores e compará-los com esta. Se houver um variação suficientemente grande dependo do sensor que se está a verificar, é enviada uma mensagem com os valores de todos os sensores assim actualizando a rede completamente acerca do armário em particular. Se não houver mudanças repentinas, a cada hora é enviada uma mensagem com som valores actuais. Tem de se ter estes cuidados visto que a rede LoRaWAN, limita quantas mensagens um nó pode enviar por período de tempo.

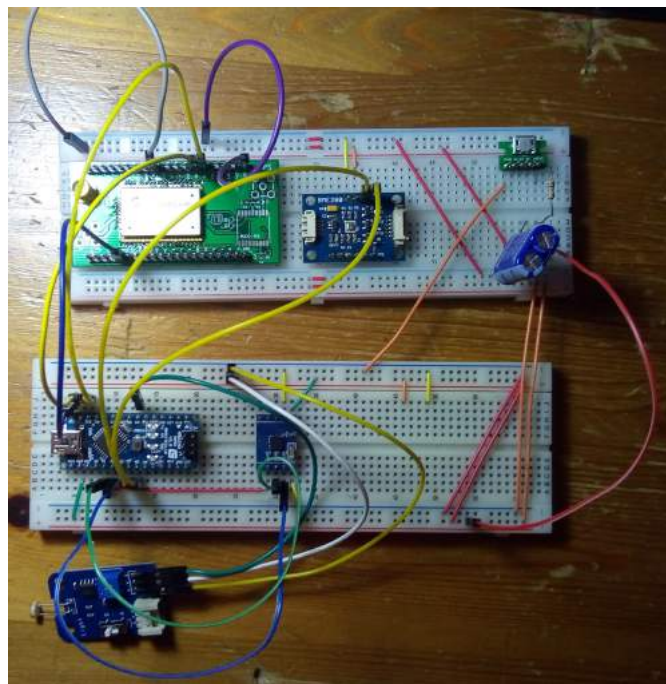


FIGURA 3.6: Prototipo na *breadboard*.

3.4 Aplicação de teste

Com o objectivo deste projecto em mente, foi começada a criação de uma página que agrega a informação fornecida pelos armários e a demonstra numa maneira fácil de compreender e navegar. Para concretizar o objectivo previamente mencionado utilizou-se o *Node-RED*.

O *Node-RED* é uma ferramenta de programação visual utilizada para ligar vários dispositivos entre si, é principalmente utilizado para criar aplicações IoT.

A principal função do *Node-RED* é de simplificar as ligações entre blocos de código, este concretiza este objectivo pela introdução da possibilidade de programarmos com nós, estes são blocos predefinidos de código que quando ligados em conjunto realizam um fluxo. Um fluxo normal consiste de um nó de entrada, um nó de processamento e um nó de saída.

O *Node-RED* fornece a possibilidade de manipular os fluxos de dados utilizando nós, estes podem ser fornecidos pelo *Node-RED* em si ou por outros utilizadores, também existe a possibilidade de criar nós. Fornece também a possibilidade de criar funções *JavaScript* dentro do editor.

3.4.1 Casos de uso

O *Node-RED* com as suas muitas vantagens traz certas limitações que podem levar ao utilizador mudar de ambiente ou só utiliza-lo em parte, por exemplo se for preciso de criar aplicações IoT complexas com múltiplas funções o *Node-RED* pode não ser indicado visto que este é mais propositado para aplicações pequenas e rápidas, e que tenha o propósito de ligar sensores entre si.

O modo com se programa em *Node-RED* traz as suas limitações, programação por fluxos não é indicada para algoritmos cíclicos.

Pelas razões previamente mencionadas o *Node-RED* deve ser utilizado com cuidado, se tivermos aplicações complexas que necessitem de tratamento de dados devemos fazer esse tratamento noutra ambiente e transportar os dados pelo *Node-RED* ou não o utilizar de todo. Na figura 3.7 pode-se ver um exemplo de um fluxo simples de *Node-Red*.

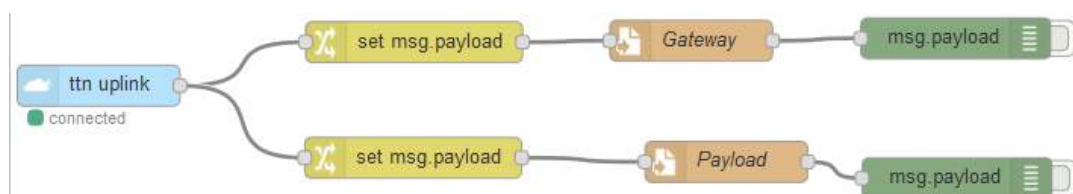


FIGURA 3.7: Exemplo de fluxo de *Node-Red*.

3.4.2 Desenvolvimento de fluxo

No desenvolvimento deste trabalho foram desenvolvidos dois fluxos. O primeiro foi desenvolvido para apoiar os testes feitos nos armários, este fluxo vai buscar as mensagens recebidas pela aplicação TTN e coloca as informações pertinentes numa folha *Excel* de uma maneira pré-determinada. O segundo fluxo foi criado para ser utilizado na suposta central que irá receber as informações dos sensores nos armários, este recebe as mensagens da aplicação TTN e separa-as por armários e amostra-as no painel criado, este está representado na figura 3.8.

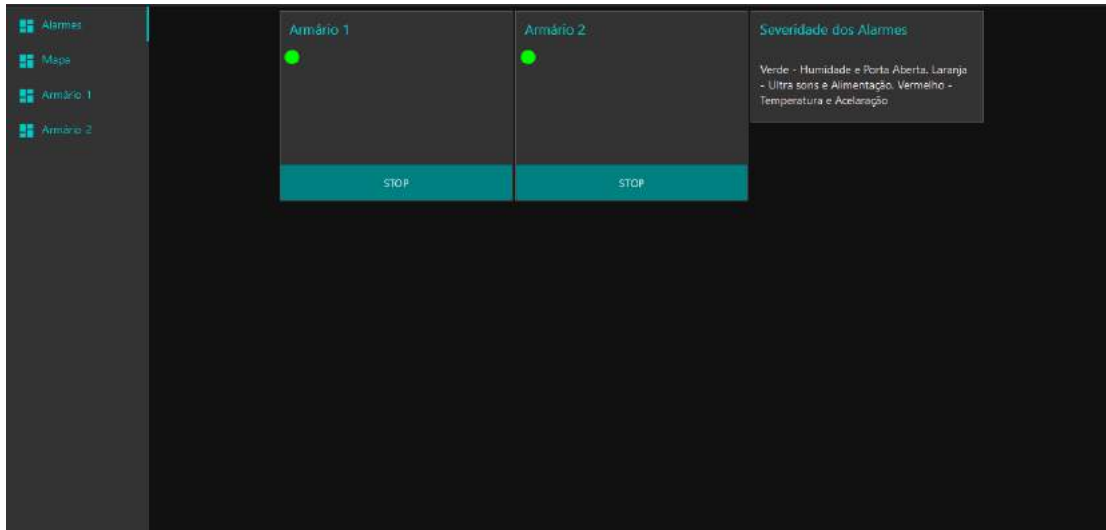


FIGURA 3.8: Painel criado.

4 Requisitos de Cobertura Rádio

Para concretizar o propósito deste projecto, é necessário saber as características de vários armários SLAT, e de caracterizar a ligação entre nó e *gateway* numa rede LoRa. Com estes propósitos em mente este capítulo servirá para determinar os requisitos em termos de cobertura rádio dos armários. Assim, será efectuada uma caracterização sobre a atenuação do sinal pela penetração nos armários, tendo em conta a respectiva localização, tipo de material e situação de porta aberta ou fechada.

Neste capítulo irá-se começar por descrever os testes preliminares a sua função, analisar os resultados obtidos e retirar conclusões preliminares. Após vai-se fazer o mesmo para os testes em armários SLAT, mas agora estando numa situação mais realista as conclusões tiradas podem ser consideradas definitivas, mesmo que sejam retiradas dos dados recolhidos. Estes testes vão consistir em, colocar o nó dentro e fora do armário com a porta aberta e fechada, em várias posições. Durante este foram enviadas 20 mensagens em cada posição, de maneira a dar suficientes amostras para o teste ser válido, mas não tantas que o teste demora-se demasiado tempo.

4.1 Testes preliminares

Os testes preliminares foram concretizado no edificio G do ISEL, apresentado na figura 4.1, num armário vazio, representado na figura (4.2). O propósito destes testes era fornecer resultados que pudessem simular os testes com armários no meio de Lisboa ou seja no ambiente real.

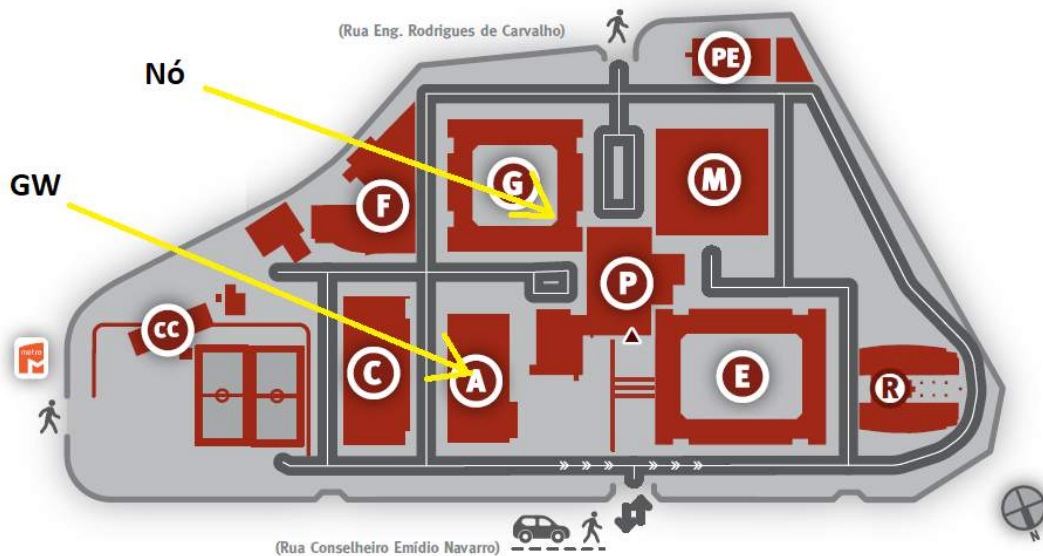


FIGURA 4.1: Mapa do ISEL (figura adaptada) [21].

Neste teste utilizou-se um nó da TTN, com um programa que envia um número de mensagens que variou ao longo do teste, do SF7 ao SF10 e guarda os resultados num ficheiro para posterior análise.



FIGURA 4.2: Armário com porta fechada.

O teste foi feito para 5 localizações dentro e fora do armário.

A primeira situação é em cima do armário, tal como está representado na figura 4.3, esta situação tem o objectivo de fornecer dados pelo qual se pode comparar ao resto.



FIGURA 4.3: Nó no topo de armário.

As outras situações são dentro do armário em cima e no meio, com a porta aberta e fechada, representados respectivamente pela figura 4.4 e 4.5.



FIGURA 4.4: Nó na parte de cima do armário.



FIGURA 4.5: Nó no meio do armário.

4.1.1 Resultados dos testes preliminares

Com os testes efectuados foi feita uma análise dos valores obtidos.

Posição	Máximo [dBm]	Mínimo [dBm]	Média [dBm]	Desvio Padrão
Cima	-79	-99	-84.22	3.524
Porta Aberta Meio	-87	-115	-99.78	5.788
Porta Aberta Cima	-86	-119	-93.6	7.4824
Porta Fechada Meio	-80	-124	-95.97	13.0944
Porta Fechada Cima	-84	-114	-92.29	8.7756

TABELA 4.1: Valores obtidos para o RSSI (*Received Signal Strength Indication*).

Posição	Máximo [dB]	Mínimo [dB]	Média [dB]	Desvio Padrão
Cima	15	2	14.48	1.634
Porta Aberta Meio	15	-13	10.55	5.169
Porta Aberta Cima	15	-10	12.56	4.589
Porta Fechada Meio	15	-12	8.93	6.884
Porta Fechada Cima	15	-13	12.99	4.083

TABELA 4.2: Valores obtidos para o SNR.

As tabelas 4.1 e 4.2, foram criadas de modo a dar uma visualização o mais fiável possível sem se ter de ver os dados brutos destes testes, com o máximo e o mínimo, consegue-se ver os limites obtidos, com a média e o desvio padrão consegue-se saber que valores se pode esperar num teste e que valores são fora da norma.

Com os valores das tabelas 4.1 e 4.2, é possível retirar várias conclusões, tal como que a introdução do armário significa uma perda de -109 dB em média de sinal, que a pior localização é no topo do armário e que mesmo os mínimos de sinal estão acima da sensibilidade da estação base.

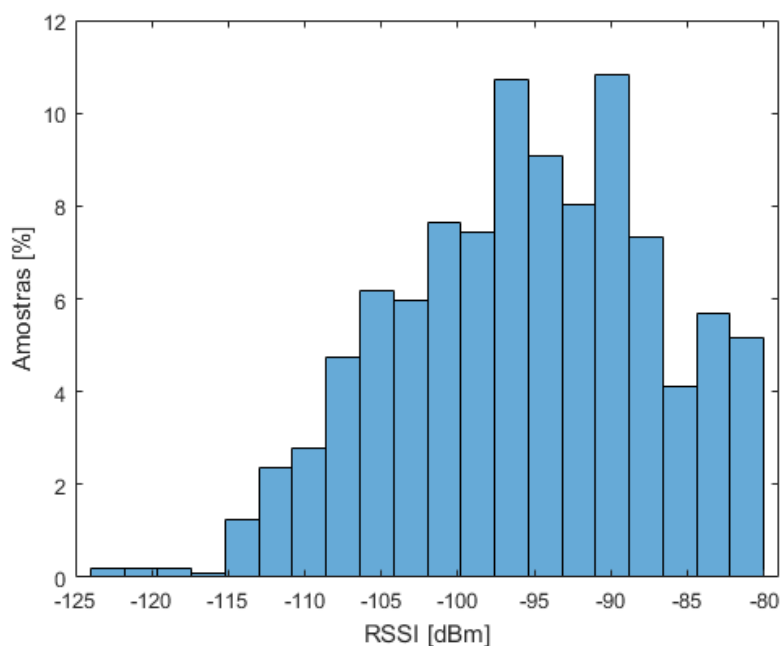


FIGURA 4.6: Histograma do RSSI dentro do armário.

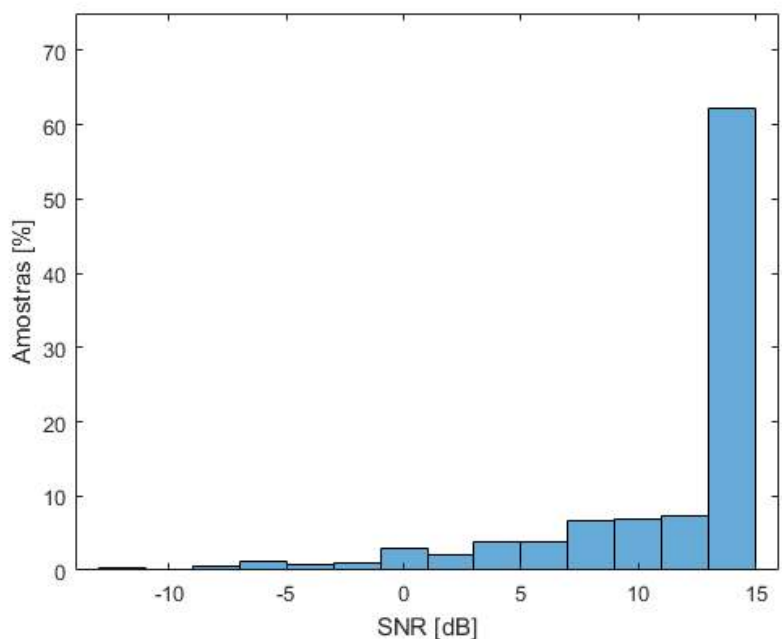


FIGURA 4.7: Histograma do SNR dentro do armário.

É de notar que as conclusões retiradas dos resultados dos testes deste armário, tem a sua relevância mitigada pelo facto que a construção e localização deste é privilegiada comparativamente aos armários no meio de Lisboa, visto que este está a menos de 100 metros da *gateway*, não tem fundo e equipamentos dentro dele o que inflaciona a força do sinal.

4.2 Testes em armários SLAT

O segundo teste foi feito em armários SLAT perto do edifício das Amoreiras, representados na figura 4.8. Para avaliar os resultados deste teste é preciso colocar os valores obtidos em contexto, visto que existem factores que fazem variar as conclusões a tirar, tal como se existe linha de vista entre armário e *gateway*, a distância entre estes e a construção e condições do próprio armário.



FIGURA 4.8: Localizações dos armários e *gateway*.

O primeiro armário é localizado a 660 metros da *gateway*, e não se encontra em linha de vista com o *gateway*, representada na figura 4.9.

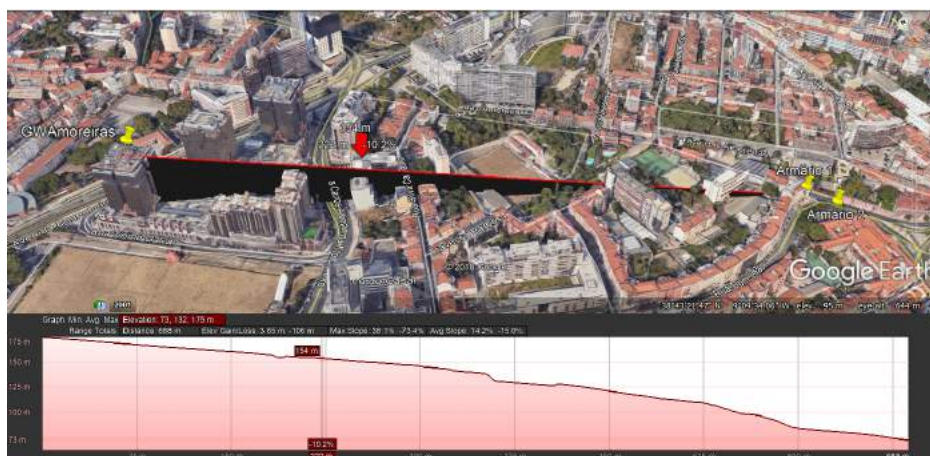


FIGURA 4.9: Linha de vista de armário 1 e *gateway*.

A construção e condições deste armário, representado na figura 4.10, limitou as possibilidades de teste, neste armário só foi possível fazer testes em cima dele e dentro do armário mas no topo, isto foi devido ao facto que este estava mal isolado e havia o perigo de choque em certas áreas.



FIGURA 4.10: Armário 1.

O segundo armário é localizado a 660 metros da *gateway*, e não se encontra em linha de vista com o *gateway*, representada na figura 4.9.



FIGURA 4.11: Linha de vista de armário 2 e *gateway*.

A construção do segundo armário proibiu a colocação do nó no topo do interior do armário devido a uma placa metálica que impedia a recepção das mensagens pelo *gateway*, portanto os testes foram feitos na parte de baixo do armário, representada na figura 4.12.



FIGURA 4.12: Armário 2.

O terceiro armário é localizado a 350 metros da *gateway*, e não se encontra em linha de vista com o *gateway*, representada na figura 4.13.



FIGURA 4.13: Linha de vista de armário 3 e gateway.

A construção do terceiro armário não proibiu nenhuma posição de teste.

O quarto armário é localizado a 270 metros da gateway, e encontra-se em linha de vista com o gateway, representada na figura 4.14.



FIGURA 4.14: Linha de vista de armário 4 e gateway.

A construção do quarto armário proibiu a colocação no topo do interior do armário, representado na figura 4.15.



FIGURA 4.15: Armário 4.

O quinto armário é localizado a 230 metros da *gateway*, e encontra-se em linha de vista com o *gateway*, representada na figura 4.16.



FIGURA 4.16: Linha de vista de armário 5 e *gateway*.

A construção do quinto armário proibiu a colocação do nó no topo e no meio do interior armário.



FIGURA 4.17: Armário 5.



FIGURA 4.18: Armário 5.

4.2.1 Resultados

Com os testes realizados obteve-se os resultados e estes foram exposto na tabela 4.3. Esta tabela tem 6 colunas, a coluna designada de Armário identifica o armário, a coluna Localização indica onde dentro dos armários os testes foram feitos, para esta coluna é preciso a visualização das figuras anteriores onde se apresentam os armários, a coluna \overline{RSSI} contém a média do RSSI, a coluna σ RSSI contem o desvio padrão, a coluna \overline{RSNR} contém a média do SNR, a coluna σ SNR contem o desvio padrão. Para estes testes foram realizadas 20 amostras para cada localização.

Armário	Localização	\overline{RSSI} [dBm]	σ RSSI [dBm]	\overline{SNR} [dB]	σ SNR [dB]
1	Exterior no topo	-110.3	1.64	3.59	2.19
	Interior no topo	-107.16	3.82	3.46	4.77
2	Exterior no topo	-111.5	2.25	3.07	2.73
	Interior no chão	-115.25	2.3	-4.08	2.77
3	Exterior no topo	-102.7	4.94	6.5	4.24
	Interior no chão	-106.5	3.18	5.26	4.1
	Interior no topo	-110.92	6.94	-3.25	4.65
4	Exterior no topo	-97.95	4.58	9.6	1.18
	Interior no chão	-96.15	2.58	8.91	2.34
	Interior no centro	-106.7	7.18	3.19	4.94
5	Exterior no topo	-99.45	5.3	9.2	1.48
	Interior no chão	-95.9	5.5	7.52	3.09

TABELA 4.3: Resultados do segundo teste.

Com uma breve análise da tabela 4.3 é possível determinar que a colocação da antena dentro dos armários tem uma grande influência na quantidade de sinal que é recebido pelo *gateway* e que a proximidade á estação base aumenta a probabilidade de recepção do sinal, visto que houve menos mensagens perdidas com a aproximação (esta conclusão foi retirada de uma leitura directa das mensagens no momento de teste).

A influência da distância no sinal recebido pode ser vista com a média do RSSI que aumenta com a aproximação á estação base.

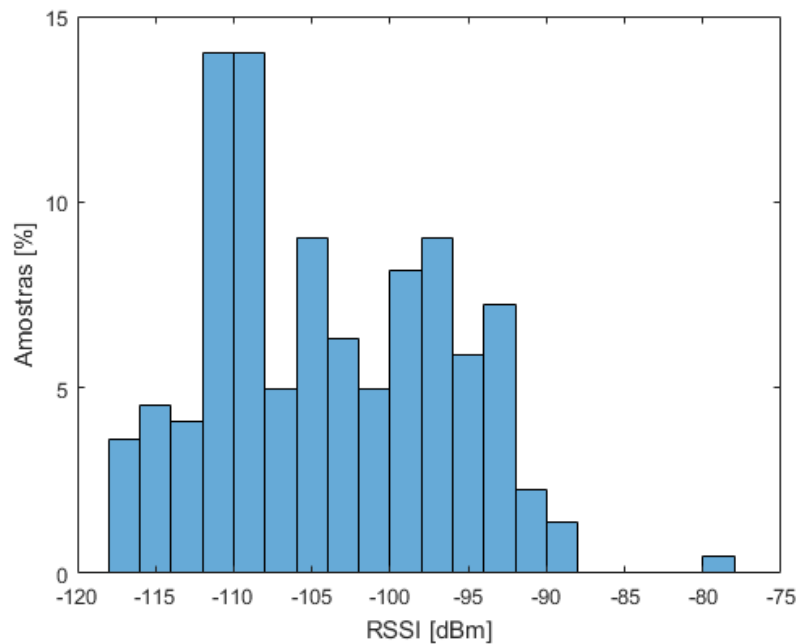


FIGURA 4.19: Histograma do RSSI dentro do armário.

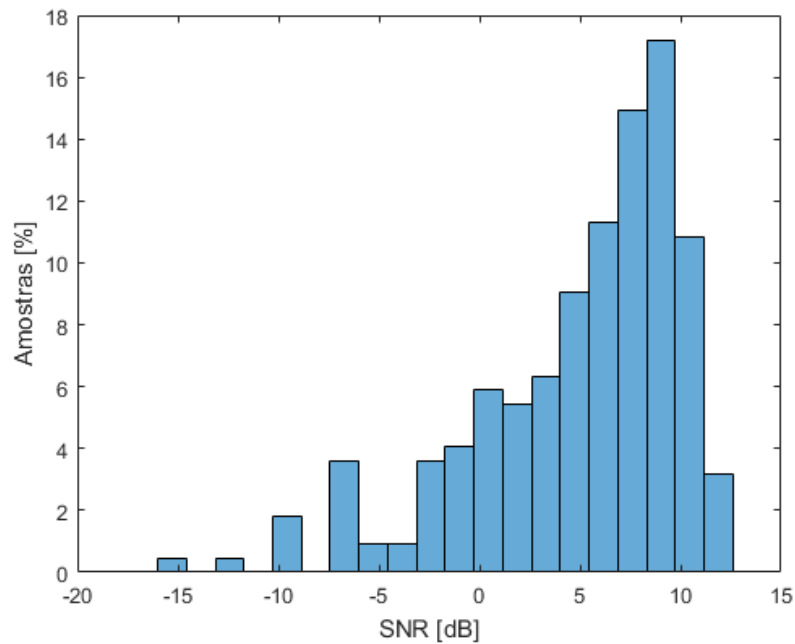


FIGURA 4.20: Histograma do SNR dentro do armário.

É de notar que foram perdidas 19 mensagens ao longo destes testes que é um número relativamente pequeno considerando que foram enviadas 240 mensagens no total.

4.3 Conclusões retiradas

Com os testes feitos e os resultados analisados, pode-se concluir:

- Que a distância influencia não só o nível de sinal mas também no número de mensagens perdidas;
- O nível de sinal nas piores circunstâncias está acima da sensibilidade;
- A pior localização em todos os armários é dentro e no topo do armário;
- A linha de vista é um factor importante, com os resultados consegue-se ver um acréscimo quando se tem linha de vista.
- A atenuação introduzida pelo armário é em média -140 dB.

5 Planeamento de rede

Para poder criar a rede formada pelos nossos nós é necessário saber quais as necessidades da rede total, o que significa que é necessário saber quantos nós e *gateways* são necessários colocar para a área pretendida, que no nosso caso é Lisboa.

O objectivo deste capítulo é efectuar o planeamento de uma rede LoRa para cobertura da infraestrutura SLAT na cidade de Lisboa.

Neste capítulo irá-se começar por explicar a técnica de *Adaptive Data Rate*, após faz-se uma análise só tendo em conta a potência da ligação, seguindo essa análise introduz-se as limitações impostas pela rede em si.

5.1 Requisitos

Os requisitos desta rede são impostos pelo número de armários de Lisboa e o seu ambiente de propagação. Para determinarmos como estes dois afectam o planeamento da nossa rede é preciso determinar o número de *gateways* necessárias para cobrir Lisboa tendo em conta estes dois factores.

Para determinar o número de *gateways* necessárias, começa-se por determinar qual das direcções da ligação é a que é limitadora, pela perspectiva da potência de emissão conclui-se que o nó é o limitador, visto que tem uma potência de emissão e ganho de antena menor que o da *gateway*.

Após determinar a direcção limitadora, é preciso determinar as condições de estudo, neste capítulo irá-se fazer os cálculos para o pior caso assim dando uma margem de segurança para casos particulares, tais como zonas de difícil instalação, ou que tenham interferência com outras tecnologias.

Foi utilizado o programa *Radio Mobile* que tem o propósito de facilitar a visualização da rede, e os cálculos necessários para a criar [22].

Esta ferramenta concretiza o seu propósito com as suas várias funcionalidades, tal como, a capacidade de criar redes de estações base, que dependendo da antena, dar diferentes coberturas, tendo em conta factores como, a cota do terreno e de poder ter várias redes ao mesmo tempo e ver como estas interagem.

Com este criou-se a rede de armários de Lisboa e colocou-se as capacidades de transmissão do nó, e finalmente simulou-se 4 armários em localizações distintas representado na figura 5.1.

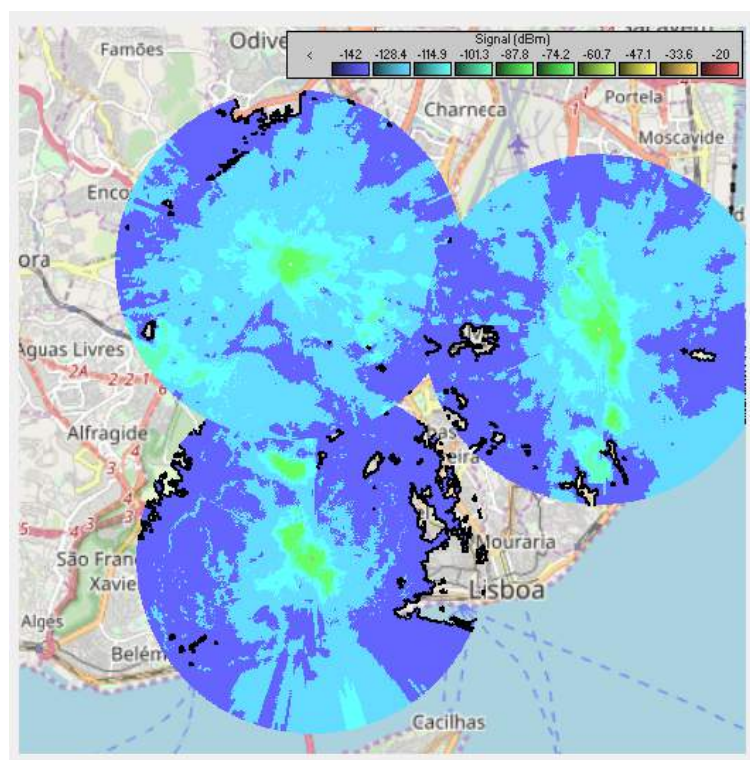


FIGURA 5.1: Propagação centrada em armários.

Com uma análise da figura 5.1, pode-se concluir um alcance médio de 2.46 km, o que com a distribuição de armários representada na figura 5.2, cria a necessidade de ter no máximo 9 gateways.

Este número de gateways pode ser diminuído com um ajuste das localizações das gateways e um estudo dos armários caso a caso.



FIGURA 5.2: Distribuição de armários em Lisboa.

5.2 Capacidade

O número de *gateways* previamente considerado ainda não é o pior caso, devido ao facto que todos os nós TTN utilizam ADR o que faz com que com o aumento da dificuldade de recepção das mensagens pelo *gateway*, o SF aumenta.

O aumento do SF é significativo devido ao facto que, com o seu aumento existe um aumento do ToA, o que consequentemente faz com que o nó seja limitado pelo seu *duty cycle* mais rapidamente.

Assumindo distribuição uniforme dos armários e que as limitações da potência não permitem transmissão além dos 3.5km o número de nós é calculado na equação 5.1.

$$N_{nodes} = \frac{1}{N_{SFconsiderados}} * \left(\frac{N_{canaís} * 86400 * 0.01}{TOA_{SF} * 24} + \dots \right) \quad (5.1)$$

SF	TOA [ms]	Nº nós cumulativo
7	36	3000
8	72	2250
9	123	1797
10	247	1453
11	495	1206
12	991	1023

TABELA 5.1: Nº máximo de nós com o aumento do SF.

Este limite de 30 segundos limita também o número de mensagens que se pode mandar por SF, e visto que os armários não se vão mexer o SF deve manter-se constante, o que faz com que as limitações calculadas na tabela 5.2, sejam significativas principalmente se considerarmos que os nós vão enviar pelo menos uma mensagem por hora para reportar a situação geral, assim retirando 24 mensagens aos resultados.

SF	Nº Mensagens
7	500
8	255
9	130
10	65
11	40
12	20

TABELA 5.2: Número de mensagens com o SF.

5.3 Link Budget

Nesta secção irá ser feito o *Link Budget* que consiste no cálculo da distância máxima de propagação da nossa ligação estação base e móvel, que na rede LoRa são designados respectivamente por *gateway* e nó.

	GW	Nó
Potência de transmissão [dBm]	27	14.1
Perdas de conector [dB]	0	0
Ganho [dBi]	8	0
Sensibilidade [dBm]	-142	-137

TABELA 5.3: Dados da *Gateway* e Nó.

Com os dados da tabela 5.3 consegue-se calcular o EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*), este é a medida de potência radiada por uma antena numa direcção específica este tem em contas as perdas na linha de transmissão, conectores e ganho da antena.

$$EIRP = P_{out} + G_{ant} \quad (5.2)$$

A equação 5.2 consiste no cálculo do EIRP, em que P_{out} é a potência de transmissão e o G_{ant} é o ganho da antena.

Com o EIRP calculado, o passo seguinte é o cálculo do SS (*Signal Strength*), a fórmula deste está representada na equação 5.3. Nesta equação o $Sens$ é a sensibilidade do receptor e o G_{antrec} é o ganho da antena receptora.

$$SS = Sens + G_{antrec} \quad (5.3)$$

Com o EIRP e o SS calculados pode-se calcular Lp_{max} que é a perda máxima no caminho. O método do cálculo deste está exemplificado na equação 5.4. Na equação o SS_{req} é o SS mas com as margens consideradas, o LNF_{margem} é a margem necessária para compensar o desvanecimento log-normal sendo LNF *Log Normal Fading*.

$$Lp_{max} = EIRP - (SS_{req} + LNF_{margem}) \quad (5.4)$$

	Uplink	Downlink
EIRP	14.1	34
SS	-153	-137
LPmáx	152.4	156.8

TABELA 5.4: Cálculos de Limitação da ligação.

Com a perda máxima calculada pode-se calcular a distância máxima de transmissão de uma *gateway* LoRa no ambiente escolhido. As equações 5.5 e 5.6 representam o método o cálculo da distância máxima, nesta a variável A representa o factor descritivo do ambiente em que a ligação se encontra, neste caso é 146.8 porque o ambiente é urbano denso. O h_m é a altura do nó e o h_b é altura em que a *gateway* se encontra. As alturas encontram-se representadas na tabela 5.5.

$$a = \frac{LP_{max} - A + 13.62 * \log_{10}(h_b) + (3.2 * (\log_{10}(11.75 * h_M))^2 - 4.97)}{44.9 - 6.55 * \log_{10}(h_b)} \quad (5.5)$$

$$d = 10^a \quad (5.6)$$

Altura Nó [m]	1
Altura Gateway [m]	100

TABELA 5.5: Altura do Nó e da *Gateway*.

Concluindo a distância máxima calculada é 10 km, esta foi calculadas utilizando o Lp_{max} menor. Esta distância é bastante maior que a simulada no *Radio Mobile*, existem várias razões possíveis esta diferença:

- O *Radio Mobile* não foi programado para redes LoRa;
- O *Link Budget* não tem em conta a topografia específica de Lisboa.

Tendo em conta as conclusões deste capítulo é proposto uma localização das *gateways* tal com está apresentado na figura 5.3. Esta figura tem em conta *gateways* já instaladas e propriedades governamentais. Adicionalmente é apresentada a figura 5.4 em que é demonstrada a cobertura simulada de Lisboa. Esta cobertura foi feita colocando todos os armários e as *gateways* da figura prévia e usa-se uma questão do melhor sinal, o que significa que o sinal apresentado em cada localização é melhor sinal que se consegue receber.

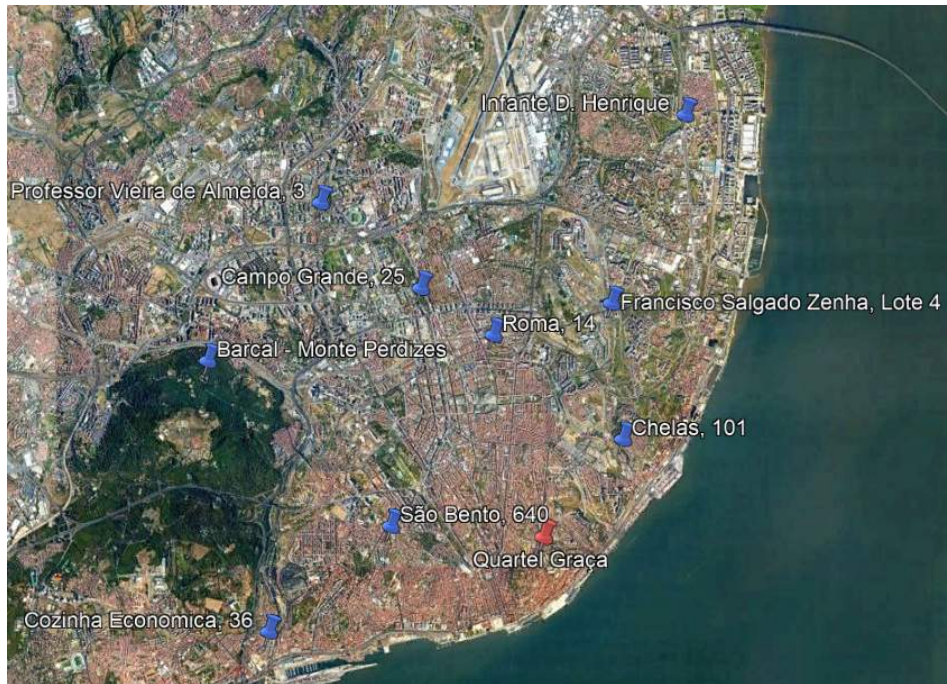


FIGURA 5.3: Distribuição das gateways em Lisboa.

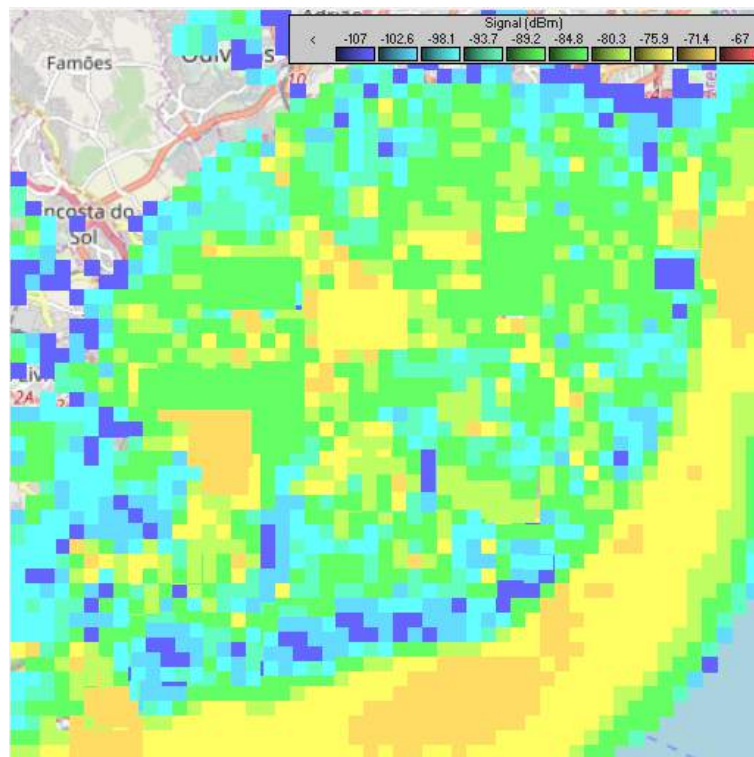


FIGURA 5.4: Cobertura em Lisboa.

6 Conclusão

Com a evolução dos sistemas de comunicação contemporâneos a necessidade de mais serviços mais exigentes e mais variados emergiram naturalmente. Com o crescimento exponencial destas tecnologias, os equipamentos tiveram de acompanhar o aumento das exigências que os consumidores impõem, fazendo assim com que haja um crescimento exponencial do número de objectos em cada rede.

Um destes sistemas é o sistema que controla o trânsito rodoviário. Este sistema é composto por vários armários que contêm diversos equipamentos activos e passivos, estes equipamentos são vitais para a circulação rodoviária. Devido aos equipamentos contidos nestes armários, serem de altamente importantes, a sua condição tem de ser constantemente monitorizada para que no caso de avaria seja possível uma reparação, rápida e eficaz.

6.1 Trabalho Desenvolvido

Ao longo desta dissertação foi estudado o LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT com o intuito de determinar qual tecnologia IoT é a mais apropriada, tendo em conta os objectivos desta dissertação.

Foi um levantamento dos requisitos do dispositivo e dos sensores que o compõem. Sendo que após este levantamento foi desenvolvido um estudo de mercado dos sensores disponíveis. Finalizando com uma comparação entre os sensores para determinar quais eram os que iam de encontro com os objectivos desta dissertação. Com os sensores escolhidos foi feito um estudo de soluções de alimentação possíveis para este dispositivo tendo em conta as condições previstas de utilização. Com este estudo concluído, apresentou-se a aplicação de teste e o ambiente escolhido para a desenvolver.

Com o dispositivo desenvolvido, foram compostos testes para obter e estudar resultados em ambientes reais. Primeiro foram uns testes preliminares com o objectivo de ter um ponto de comparação quando se passar para os testes num ambiente mais realista. Nestes testes foram feitos um levantamento de várias condições, tal como a construção do armário e se existe linha de vista com a *gateway*.

Finalmente foi feito o planeamento da rede, este é composto pela determinação dos requisitos e o que os influencia, cálculo da cobertura tendo em base a utilização de uma ferramenta de planeamento rádio e o *link budget* e cálculo da capacidade. Este planeamento foi finalizado com um exemplo teórico das localizações das *gateways* e um resultado de uma simulação da cobertura de Lisboa.

6.2 Conclusões Finais

Com esta dissertação foi concluído que das três tecnologias estudadas o LoRaWAN é a mais apropriada, tendo em conta os objectivos desta dissertação. Visto que o LoRaWAN possibilita a utilização de classes que aumenta a flexibilidade de utilização da tecnologia, que utiliza partes do espectro não licenciadas, o que aumenta as possibilidades de utilização e que permite o desenvolvimento de a rede numa maneira orgânica.

No desenvolvimento desta dissertação foi concluído que para o dispositivo ir de encontro com os objectivos, este tem de ter sensores de temperatura humidade, porta aberta, de estado de alimentação e de aceleração.

No estudo do sensores foi considerado três factores, custo sendo este o factor mais considerado na criação de dispositivos que idealmente terão de estar numa multitude de armários, consumo, baixo consumo é um tópico muito falado nos dias de hoje e que e todas as aplicações criadas deve ser considerada com alta importância, e finalmente a complexidade do componente, visto este dispositivo ser criado com o intuito de replicação massiva a complexidade de criação e manutenção tem de ser baixa para poder ser consertado com facilidade.

Com o estudo das soluções para a alimentação foi escolhida a solução para alimentação de emergência um super condensador. Este para a aplicações intermitentes e de baixa potência, são a melhor fonte de energia auxiliar, visto que carregam permanentemente e são de alta eficiência nas mais variadas temperaturas.

No estudo dos controladores disponíveis e apropriados foram considerados dois, o ATMEGA32A e o arduino NANO, destes dois de um ponto de vista teórico o ATMEGA32A é superior ao NANO mas após utilização dois dois foi concluído que em questões de complexidade de programação o NANO é extremamente superior.

Após isto foi exposto a aplicação de teste, que foi criado com o intuito de dar um maneira visual de ver alarmes dos diferentes armários e diferentes sensores. A ferramenta escolhida foi o *Node-RED*.

Nesta dissertação foram feitos testes com o intuito de obter informação sobre os requisitos de cobertura. Foi feito duas rondas de testes. Os testes preliminares foram executados no ISEL, o propósito destes era fornecer um ponto de comparação com os testes em ambiente real. No ambiente real foi concluído que os armários apresentadas mais várias formas de instalação e organização, e que nem todas as localizações previstas podem ser possíveis, os resultados deste teste revelaram que os armários em média introduzem uma atenuação de -140 dB.

O planeamento de rede teve como objectivo determinar o número de *gateways* necessárias para Lisboa tendo em conta o seu ambiente de propagação, o número de armários que existem e as necessidades que surgem em questão á capacidade. Com este planeamento foi determinado que com a ferramenta *Radio Mobile* o alcance de um armário é de 2.46 km, e que na perspectiva da capacidade e o *link budget* o alcance é de 10 km. Esta diferença de

resultados resulta do *Radio Mobile* não ser apropriado para redes LoRaWAN, e do *link budget* não ter em conta a topografia específica de Lisboa.

6.3 Trabalho Futuro

Com a conclusão desta dissertação existe trabalho futuro que pode ser feito para melhorar certos aspectos destes trabalho. A criação de uma ferramenta profissional de alarmes mais específicos e versátil do que foi criado. Este trabalho era importante visto que a aplicação criada, apresenta alarmes extremamente simplistas, uma criação de alarmes mais variados e com informação mais específica sobre o que pode estar a acontecer num armário, diminuía o tempo que uma equipa local tinha de passar a arranjar, assim diminuindo os custo futuros para qualquer entidade que possa usar este sistema.

Os testes feito foram realizado numa gama limitada de armários numa área específica de Lisboa, estas limitações fazem com que os resultados dos teste possam não ser fiáveis a outras zonas ou cidades. Visto que existem vários tipos de armários e vários tipos de topologias de cidades e ambientes.

Bibliografia

- [1] A. Note, “LoRa Modulation Basics” no. Rev.2, pp. 1–26, 2015
- [2] “The Things Network,”[Online].Available: www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/. [Acedido em 27 Dezembro 2018].
- [3] Semtech, “SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem Designer’s Guide” no. Rev.1, pp. 1–9, 2013
- [4] Semtech, “SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver” no. Rev.3.1, pp. 24–30, Março de 2017
- [5] LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, “LoRaWAN™ Backend Interfaces 1.0 Specification” Versão 1, Outubro de 2017
- [6] CEPT, “ERC Recommendation, Relating to the use of Short Range Devices (SRD)”, pp. 8-9, 5 de Outubro de 2018
- [7] “The Things Network,” [Online].
Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html> [Acedido em 27 Dezembro 2018].
- [8] A. Aloys, Y. Jiazi, C. Thomas e T. William, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,” Sensors, p. 4, 2016.
- [9] LoRa Alliance Technical Committee, “LoRaWAN 1.1 Specification” Versão 1.1, Outubro de 2017
- [10] “S. Johan” [Online] .Available: <https://www.thethingsnetwork.org/article/the-things-network-architecture-1> [Acedido em 19 Janeiro 2019].
- [11] Sigfox, “Sigfox Technical Overview” , Maio de 2017
- [12] “L. Perry” [Online] .Available: <https://www.survivingwithandroid.com/2018/07/sigfox-protocol-network-architecture-iot-protocol-stack.html> [Acedido em 28 Dezembro 2018].
- [13] J. Schlien, D. Raddino, “Narrowband Internet of Things Whitepaper”
- [14] VIAVI Solutions, “Application Note Narrowband Internet of Things (NB-IoT)”, 2018
- [15] GSM Association, “NB-IoT Deployment Guide to Basic Feature set Requirements” Versão 1.0, 2 Agosto de 2017
- [16] S.Rashmi, W.Yiqiao, H.Seung-Hoon, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT”, 21 Março de 2017

- [17] Bosch, "BME280 Combined humidity and pressure sensor", Revision 1.6, Setembro de 2018
- [18] Itead Studio, "Electronic Brick of Magnetic Switch", 17 Abril de 2013
- [19] Itead Studio, "ADXL335 Module-Accelerator Sensor Module", 6 Outubro de 2011
- [20] Z., Thomas, D., Korochkina, T., Phillips, C., Lupo, D., Lehtimäki, S., J. O'Mahony, D.T. Gethin, "D.T. Gethin", 9 Novembro de 2016
- [21] "furnituredecor"[Online] Available: <https://cheveuxcrepusfrun.blogspot.com/2017/04/isel-mapa.html> [Acedido em 11 Dezembro 2019].
- [22] "Roger Coudé" [Online] .Available: <http://radiomobile.pe1mew.nl/index.php?Welcome...> [Acedido em 2 Junho 2019].