



**Instituto Universitário de Lisboa**

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

**Sistema de controle de iluminação pública utilizando  
comunicações LoRaWAN**

**Nuno Correia Salgado**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de

**Mestre em Engenharia Informática**

Orientador:

Professor João Carlos Ferreira

ISCTE-IUL

**Outubro 2019**



À minha querida mulher



## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Doutor João Carlos Ferreira pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pela sua orientação e pelo seu dinamismo, apoio, motivação, incentivo e disponibilidade.

Ao Pedro Valverde da Arquiled pela sua disponibilidade, partilha de conhecimentos e ajuda prestados.

Ao Rui Pereira da Cisco por o apoio nos esclarecimentos prestados às questões colocadas.

A todos os que contribuem para o desenvolvimento de aplicações livres, com as quais grande parte deste trabalho foi desenvolvido, nomeadamente: GNU Linux, Debian, Emacs, Org-mode, Latex, Nim, Python, Firefox, Arduino, Dia, Gimp, Git, etc. e a todos os investigadores que desenvolvem tecnologia que nos permite constantemente ir mais além nos limites das leis da Física - senti-me mesmo nos ombros de gigantes!

Aos meus pais pelo apoio constante e compreensão.

Aos meus filhos pela sua paciência.

Em especial, à Ana, pelo seu exemplo e pela sua incansável compreensão.

A todos, o meu muito obrigado.



## Resumo

Este trabalho descreve a criação de um protótipo para prova de conceito de uma solução de transmissão e controlo, através de uma Internet das Coisas LoRaWAN, substituindo as comunicações GSM, de um sistema de comunicação e gestão com painéis de visualização e análise de dados, de uma solução de iluminação LED para iluminação pública.

Desenvolveu-se uma interface de comunicação LoRa e LoRaWAN e uma camada de comunicação, considerando, a limitação do tamanho das mensagens, a comunicação bidirecional, o número de transmissões e o número de dispositivos de iluminação presentes num sistema de iluminação pública. Implementou-se também um dos primeiros sistemas utilizando comunicação LoRaWAN Classe C.

**Palavras-chave:** LED, Sistema de Iluminação, Sustentabilidade, Internet das Coisas (IoT), LPWAN, LoRa, LoRaWAN, Class C, Wireless Sensor Network



## **Abstract**

This work describes an implementation of prototype towards the development of a Led Lighting System for Public illumination with a transmission and control solution with an Internet of Things LoRaWAN communication and management system with dashboard for data visualization and data analytics. It was developed a LoRaWAN communication interface and communication layer considering the message size limitation, two-way communication and the number of transmissions taking into account the number of lighting devices present in a street illumination system. A management system was developed with data analytics and visualization to make savings and improve process management. Also, we implemented one of the first commercial systems using a Class C LoRaWAN.

**Keywords:** LED, Lighting system, Sustainability, Internet of Things (IoT), LPWAN, LoRa, LoRaWAN, Class C, Wireless Sensor Network



# Conteúdo

Agradecimentos . . . . .	v
Resumo . . . . .	vii
Abstract . . . . .	ix
Lista de Tabelas . . . . .	xiii
Lista de Figuras . . . . .	xv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento do tema . . . . .	1
1.2 Motivação e relevância do tema . . . . .	1
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.4 Estrutura e organização da dissertação . . . . .	3
<b>2 Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1 Análise do sistema atual da Arquiled . . . . .	5
2.1.1 Visão geral . . . . .	5
2.1.2 Luminárias . . . . .	6
2.1.3 Módulo de comunicações GSM . . . . .	7
2.1.4 Servidor aplicacional . . . . .	8
2.1.5 Aplicação de gestão . . . . .	8
2.2 Redes LoRa . . . . .	9
2.2.1 Introdução . . . . .	9
2.2.2 LPWAN . . . . .	9
2.2.3 LoRa . . . . .	10
2.2.4 Bandas de frequência ISM . . . . .	11
2.2.5 LoRaWan . . . . .	12
2.2.6 Classes de dispositivos . . . . .	14
2.2.7 Segurança . . . . .	14
2.2.8 Limitações LoRaWan . . . . .	15
2.2.9 Exemplos de Soluções que utilizam tecnologias LPWAN . . . . .	15
<b>3 Solução proposta</b>	<b>17</b>
3.1 Visão geral . . . . .	17

3.2	Servidor de rede . . . . .	18
3.3	Comunicação da luminária . . . . .	20
3.4	Servidor intermediário . . . . .	23
3.5	Compressão das mensagens - método 1 . . . . .	23
3.6	Compressão das mensagens - método 2 . . . . .	28
3.7	Redução do número de mensagens e do tamanho . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Análise e discussão dos resultados</b>	<b>37</b>
4.1	Introdução . . . . .	37
4.2	Recolha de dados . . . . .	38
4.3	Comunicações . . . . .	39
4.4	Compressão das mensagens . . . . .	42
4.5	Redução do número de mensagens e do seu conteúdo . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Conclusões e recomendações</b>	<b>45</b>
5.1	Principais conclusões . . . . .	45
5.2	Contributos para a comunidade científica e empresarial . . . . .	45
5.2.1	Implicações ao nível académico . . . . .	45
5.2.2	Implicações ao nível empresarial . . . . .	46
5.3	Limitações do estudo . . . . .	46
5.4	Propostas de investigação futura . . . . .	46
	<b>Bibliografia</b>	<b>47</b>

## Lista de Tabelas

2.1	Comparação dos diferentes tipos de redes sem fios . . . . .	10
3.1	Sub-cadeia, de tamanho um, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre a placa e o servidor. . . . .	26
3.2	Sub-cadeia, de tamanhos diversos, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre a placa e o servidor. . . . .	26
3.3	Universo de símbolos utilizados nas mensagens enviadas pela placa durante os testes de comunicação. . . . .	27
3.4	Sub-cadeia, de tamanho um, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre o servidor e a placa . . . . .	29
3.5	Sub-cadeia, de tamanhos diversos, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre o servidor e a placa . . . . .	29
3.6	Universo de símbolos, utilizados nas mensagens recebidas pela placa durante os testes de comunicação entre o servidor e a placa . . . . .	30
3.7	Estruturas das mensagens enviadas pela placa durante os testes de comunicação com o servidor. . . . .	30
3.8	Códigos a utilizar para indicar o tipo de formato de mensagens entre a placa e o servidor	31
3.9	Códigos a utilizar para os caracteres hexadecimais das mensagens entre a placa e o servidor . . . . .	31
3.10	Estruturas das mensagens enviadas pelo servidor durante os testes de comunicação com a placa. . . . .	31
3.11	Códigos a utilizar para indicar o tipo de formato de mensagens entre a placa e o servidor	32
3.12	Códigos a utilizar para os caracteres hexadecimais das mensagens entre a placa e o servidor . . . . .	32
3.13	Valores de $\delta$ para cada um dos sensores/valores reportados pelas luminárias . . . . .	34
3.14	Tempos de envio das mensagens dos nós aos concentradores . . . . .	34
4.1	Exemplo de entradas no ficheiro de registo de mensagens trocadas . . . . .	38
4.2	Mensagens de teste enviadas e respostas recebidas pela placa instalada no ISCTE . . .	39
4.3	Mensagens de teste enviadas e respostas recebidas pela placa instalada na Arquiled . .	40
4.4	Resumo das Mensagens de teste enviadas e respostas recebidas pelas duas placas utilizadas . . . . .	40
4.5	Tamanho médio das mensagens reais entre a placa e o servidor . . . . .	43
4.6	Tamanho médio das mensagens reais entre o servidor e placa . . . . .	43
4.7	Redução da frequência de mensagens . . . . .	43



## Lista de Figuras

2.1	Infraestrutura da solução atual da Arquiled . . . . .	5
2.2	Luminária Arquicity R1 Efficiency . . . . .	6
2.3	Ciclo da Luminária . . . . .	7
2.4	Integrado GE864 para comunicações GPRS. . . . .	8
2.5	Ecrãs da aplicação Eccos City . . . . .	9
2.6	Exemplo de uma onda sinusoidal cuja frequência cresce . . . . .	11
2.7	Modelo LoRaWAN / LoRa . . . . .	12
2.8	Arquitetura em estrela Lora/LoRaWAN . . . . .	13
3.1	Concentrador interior Cisco. . . . .	17
3.2	Antena e Concentrador exterior Cisco. . . . .	17
3.3	Infraestrutura da solução proposta. . . . .	18
3.4	Servidor de rede. . . . .	19
3.5	Formulário de registo do servidor aplicacional no Actility. . . . .	19
3.6	Formulário de registo de um nó no Actility (1/2) . . . . .	20
3.7	Formulário de registo de um nó no Actility (2/2) . . . . .	21
3.8	Placa ASME Lion da Axel Elettronica . . . . .	21
3.9	O fluxograma do software desenvolvido para a placa . . . . .	22
3.10	Troca de mensagens entre a placa e o servidor aplicacional . . . . .	22
3.11	Servidor intermediário . . . . .	23
3.12	Estrutura da aplicação do servidor intermediário . . . . .	24
4.1	Desenvolvimento experimental e ambiente de teste com duas luminárias LED . . . . .	37
4.2	Troca de mensagens entre a placa no ISCTE e o servidor . . . . .	41
4.3	Troca de mensagens entre a placa na Arquiled e o servidor . . . . .	41
4.4	Mensagens de teste entre a placa e o servidor . . . . .	42
4.5	Mensagens de teste entre o servidor e a placa . . . . .	42



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento do tema

Iluminação artificial é essencial para a operação contínua dos edifícios, em locais com baixa incidência de luz solar e em momentos em que a luz não atinge os requisitos de iluminação, sendo também essencial para a iluminação pública em locais públicos.

Apesar de (Fotios and Castleton, 2016) não concordar, existem estudos que associam uma boa iluminação artificial a uma noção, por parte dos cidadãos, de segurança (Lux, 2018), o que faz com que os municípios invistam neste tipo de equipamentos.

Com o aumento da população nos centros urbanos o aumento das necessidades de iluminação têm vindo a aumentar, tornando-se cada vez mais uma preocupação em termos de consumo de energia com impactos nos custos e no impacto ambiental que tanto tem estado na ordem do dia.

Mas novas tecnologias, como o LED, têm permitido apenas por substituição dos sistemas atuais, diminuir o consumo de energia com o número atual de dispositivos.

Também os novos sistemas de gestão têm permitido uma melhor gestão da infraestrutura, permitindo melhor serviço quando é necessário e menor desperdício quando não é tão necessário.

Muitos destes sistemas estão a ser desenvolvidos baseados na Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) aproveitando as novas soluções que têm surgido em termos de comunicações sem fio, permitindo cada vez mais uma integração de serviços.

### 1.2 Motivação e relevância do tema

A Arquiled é uma empresa privada portuguesa que desenvolve soluções de iluminação pública.

A empresa desenvolveu uma solução de iluminação que permite, através de uma central de comando remota, recolher em tempo real informação das luminárias e efetuar o seu controlo.

No sistema desenvolvido, cada luminária utiliza um módulo de LED com tecnologia *inteligente* e comunicações móveis as quais permitem a ligação ao servidor de gestão Arquigest. Esta solução, instalada em várias cidades do país, substitui a tecnologia convencional anteriormente utilizada no

mesmo espaço físico, permitindo assim utilizar os candeeiros existentes.

Numa instalação piloto, em Évora, foram substituídas 45 luminárias. Em cada luminária existe um sistema com inteligência artificial com sensores e sistemas de comunicação de controladores lógicos de programação de forma a implementar em conjunto um sistema de controlo, gestão e monitorização avançada. Cada luminária tem uma identificação única na rede o que permite a gestão individual ou em grupo.

O projeto implementado pela Arquiled permite operar o sistema de iluminação em resposta a estímulos externos ou pré-programar parametrizações, otimizando a utilização das instalações de luz pública podendo permitir poupanças significativas de energia, de acordo com os níveis de conforto visual e segurança necessários.

A Arquiled gostaria de ter o mesmo sistema de luminárias e de gestão mas utilizando comunicações LoRa em vez das comunicações atuais com GSM. O novo sistema de comunicações a substituir, permitiria, em princípio:

1. Poupar nos custos mensais de comunicação uma vez que não seria necessário ter um cartão GSM de uma operadora móvel em cada luminária - em Portugal o LoRa é livre de operador;
2. Aproveitar o máximo possível toda a restante infraestrutura existente, nomeadamente o sistema inteligente das luminárias, o servidor aplicacional e os sistemas de gestão;
3. Reduzir o tempo de desenvolvimento, implementação e testes, limitando ao máximo as alterações e o seu impacto aos sistemas já existentes.
4. Permitir às entidades com luminárias com comunicação GSM, expandir para LoRa, efetuando a gestão de forma global com os processos já existentes;
5. Deixar de estar dependente do sinal de uma infraestrutura GSM. Em determinados mercados com infraestruturas de comunicações menos desenvolvidos, como países africanos e sul americanos, a dependência de uma infraestrutura de comunicações GSM pode inviabilizar a instalação de um projeto;
6. Ter um produto competitivo no mercado;

### **1.3 Objetivos**

A Arquiled gostaria de ter uma prova de conceito utilizando uma placa de comunicações LoRa e uma infraestrutura aplicacional específicas de construtores já pré-selecionados:

1. A placa, selecionada pela empresa, será a ASME Lion (Elettronica, 2016), da Axel Elettronica, a qual contém o módulo integrado LoRa (RN2483) da Microship;
2. A infraestrutura teria um Concentrador da Cisco com o servidor de rede da Actility;

Os objetivos a alcançar com este trabalho são o de desenvolver uma solução, economicamente favorável relativamente a uma solução GSM, com as seguintes componentes:

1. Aplicação de comunicação para a placa Smarteverything LION por forma a substituir o modem GSM atualmente utilizado para troca de mensagens entre as luminárias da Arquiled e o servidor de gestão.
2. Aplicação de interface entre a plataforma da Cisco + Actility e o sistema de gestão Arquigest da Arquiled;

No final do trabalho, deverá ser possível ter um protótipo a funcionar para prova de conceito, por forma a que a empresa possa passar o sistema à fase de produção e ter um produto com comunicação LoRa em alternativa às comunicações de dados GPRS/GSM.

## **1.4 Estrutura e organização da dissertação**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos os quais pretendem refletir as diferentes fases até à sua conclusão.

O primeiro capítulo contém uma introdução do tema e dos objetivos a investigar.

O segundo capítulo, reflete uma análise do sistema atual da Arquiled e o enquadramento teórico, em que foi analisado o que era a comunicação LoRa, LoRaWAN, as suas vantagens e desvantagens e diferenças com o GSM nomeadamente em termos de limitações; e por fim, o estado da arte para o caso da iluminação pública;

O terceiro capítulo é dedicado à solução proposta c quais foram tendo evoluções de acordo os resultados que se foi obtendo.

O quarto capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos.

O quinto capítulo apresenta as conclusões deste trabalho bem como as recomendações, limitações e trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Estado da arte

### 2.1 Análise do sistema atual da Arquiled

#### 2.1.1 Visão geral

O objetivo do sistema é o controlo centralizado, remoto, sem fios, de um conjunto de luminárias cujo número poderá variar entre as poucas dezenas e os milhares.

A infraestrutura do sistema atual de gestão de luminárias da Arquiled está esquematicamente representada na figura 2.1.

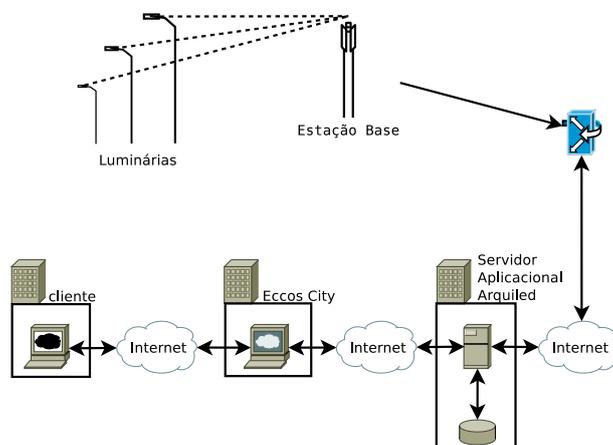


Figura 2.1: Infraestrutura da solução atual da Arquiled

A solução de gestão integrada de redes IP, fornece informações detalhadas sobre a atividade do sistema de iluminação, facilitando e maximizando a sua monitorização e gestão. O sistema modular, permite o incremento progressivo de acordo com as necessidades de expansão da rede IP.

Com uma interface amigável, o utilizador acede ao painel principal com a indicação dos pontos de iluminação georreferenciados, onde é possível visualizar de forma simples e intuitiva, todas as informações relevantes das luminárias.

Seguidamente, descreve-se com mais pormenor cada um dos componentes do sistema.

## 2.1.2 Luminárias

As luminárias da Arquiled, figura 2.2, são constituídas por dois blocos:



Figura 2.2: Luminária Arquicity R1 Efficiency

1. Um bloco ótico de LED que permite a variação da intensidade luminosa;
2. Um bloco eletrónico, do qual se destacam os seguintes componentes:
  - (a) Módulo de controlo com um microcontrolador, uma memória do tipo RAM e outra do tipo Flash;
  - (b) Conjunto de sensores e medidores de: luz exterior, temperatura, potência e GPS;
  - (c) Módulo de comunicações GSM + Antena GSM

Estas luminárias apesar de terem um módulo de comunicações para controlo remoto, têm a característica interessante de poderem funcionar autonomamente, substituindo facilmente as luminárias tradicionais, uma vez que têm um sistema simples de predefinição de intervalos temporais de níveis de fluxo o que em conjunto com o módulo ótico de LED, permite uma poupança de energia de até 80% relativamente às luminárias convencionais (Arquiled, 2018a).

Quando a luminária recebe corrente, o microcontrolador carrega na memória RAM o sistema operativo que tem na memória Flash, e após acertar o relógio interno, executa continuamente o ciclo representado na figura 2.3.

O controlador da luminária comunica com o Módulo de comunicações através de uma porta série, para enviar e receber mensagens do servidor.

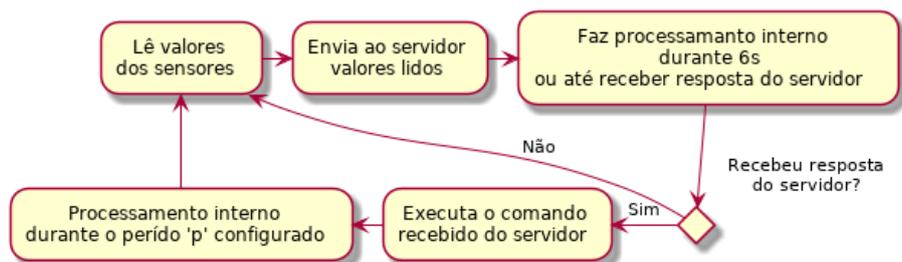


Figura 2.3: Ciclo da Luminária

As comunicações efetuadas pela luminária são do tipo Falar-Antes-d'Ouvir, ou seja, são sempre iniciadas pela luminária, abrindo a porta série de comunicação e enviando os parâmetros lidos pelos sensores, nesse instante. Após o envio da informação, fica a aguardar um comando durante uma janela de tempo definida. Ao receber o comando, a porta série é fechada e o comando processado. Caso não tenha sido recebido nenhum comando ao fim de 6 segundos, o ciclo repete-se.

Pelo facto da comunicação ser do tipo Falar-Antes-D'Ouvir o sistema de gestão tem um tempo pré-definido de 5 min para que a luminária contacte o servidor. Ou seja, normalmente, cada luminária reporta o seu ponto de situação, pelo menos, de 5 em 5 min, o que equivale a 12 mensagens por hora.

A informação transmitida entre a luminária e o servidor de comunicação são os valores dos sensores, nomeadamente: Identificação da luminária, consumo instantâneo, intensidade dos LED, intensidade de luz exterior, temperatura, consumo de energia e localização GPS;

As mensagens enviadas pela luminária são em texto ASCII com 1 B, códigos entre 32 e 128, e podem ter um comprimento que varia entre os 8 B e os 114 B.

Exemplos de mensagens enviadas pelas luminárias ao servidor aplicacional:

- res=0003,03,00,00
- res=0001,00,00,0F&hid=,&log=0090,0000,0003,00000000,00000000,00000000
- res=0003,0F,0F,0F&pol=0002,003E,0005,0F31,0017,0000,AB13,000000,0000,"38445413N009090074W",05,2B,19,FFFF0000001612

### 2.1.3 Módulo de comunicações GSM

As comunicações entre as luminárias e o servidor central são efetuadas através de um modem GSM 2G embutido em cada luminária e ligado ao sistema operativo através de uma porta série.

O modem utilizado para as comunicações foi o GE864, figura 2.4, o qual permite comunicações GPRS. De acordo com o manual do fabricante (S.p.A., 2009), o modem necessita de uma antena GSM com uma impedância de 50 Ohm e um ganho máximo de 0,3 dB.

Para poder funcionar, o modem tem um cartão SIM, ativado, fornecido pela operadora de telecomunicações com quem foi contratualizado o serviço de comunicação de dados móveis.



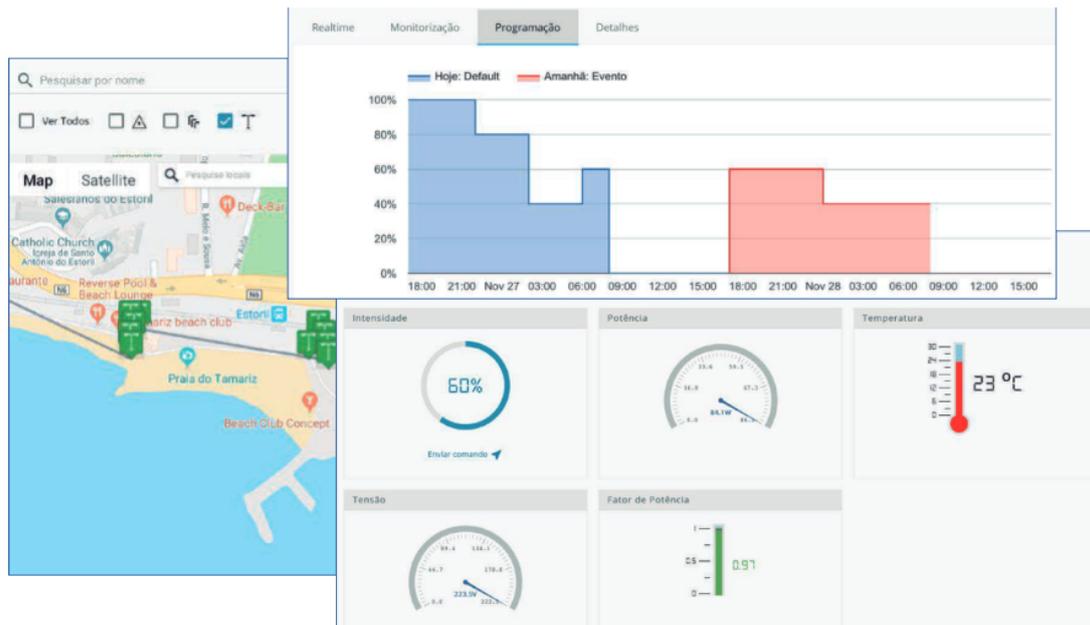


Figura 2.5: Ecrãs da aplicação Eccos City {Arquiled (2018b)}

## 2.2 Redes LoRa

### 2.2.1 Introdução

LoRa, a abreviatura de *Long Range*, é uma técnica de modulação, utilizada pela camada física, que permite comunicações de grande alcance, com baixa potência.

LoRa faz parte de um conjunto de tecnologias de comunicações sem fio designadas por LPWAN.

### 2.2.2 LPWAN

LPWAN, abreviatura de *Low Power Wide Area Network*, são redes que representam um novo paradigma de comunicação (Raza et al., 2017) uma vez que permitem:

1. conectividade a baixo preço - baseado em protocolos simples, baixos custos de dispositivos e baixa complexidade das infraestruturas;
2. longas distâncias - algumas dezenas de km;
3. reduzido consumo de energia - baterias podem durar 10 ou mais anos.

Este tipo de redes são por isso apropriadas para o envio de pequenos pacotes de informação de aparelhos que utilizem baterias.

As redes LPWAN permitem complementar e nalguns casos substituir as redes celulares e as redes sem fios de curto alcance, sendo por essa razão cada vez mais utilizadas na ligação de dispositivos à Internet.

A tabela 2.1 permite uma comparação dos diferentes tipos de redes sem fio (Vannieuwenborg et al., 2018) onde são apresentadas, de forma resumida, as seguintes características:

**Veloc.** - velocidade de transmissão dos transdutores;

**Op.** - indica se a rede pode ou não transmitir ao mesmo tempo dados nos dois sentidos (d - Duplex) ou só num sentido de cada vez (s - Semi-Duplex);

**Mx.Transf** - número máximo de bytes que podem ser enviados numa mensagem;

**Consumo** - tempo médio indicativo do tempo de duração das baterias - estes valores podem variar muito consoante os tempos de transmissão, potência de transmissão, velocidade, e tempo de hibernação;

**Alcance** - alcance espacial típico máximo que se consegue ter entre os transdutores;

**Standards** - se a tecnologia é baseada em standards ou não.

Tabela 2.1: Comparação dos diferentes tipos de redes sem fios

Tipo	Veloc.	Op.	Mx.Transf	Consumo	Alcance	Standards
Satélite (Banda-L)	200 kbit/s	d		alto (semanas)	global	proprietário
Celular (GSM a LTE-A)	14,4 kbit/s a 1 Gbit/s	a d		médio (meses)	35 km	GSM; GPRS; LET-A;
LoRaWan	0,3 kbit/s a <50 kbit/s	s	256 B	baixo (+anos)	3 a 5 km	LoRaWAN
UNB-Sigfox	0,1 kbit/s	s	12 B	baixo (+anos)	5 a 25 km	Sigfox proprietário
Weightless-P	0,2 kbit/s a 100 kbit/s	s	min. 10 B	baixo (+anos)	2 km urbano 5 km exterior	Weightless SIG
Wi-Fi 'a' a 'n'	54 a 1300 Mbit/s	s		alto (semanas)	15 a 150 m	IEEE 802.11 a - n
z-Wave	0,04 a 0,2 kbit/s	s	64 B	baixo (+anos)	30 a 100 m	z-wave proprietário
802.15.4	0,02 a 0,25 kbit/s	d	127 B	baixo (+anos)	30 a 100 m	Zigbee
BLE	1 Mbit/s	d	47 B	baixo (+meses)	5 a 100 m	IEEE 802.15.1
Bluetooth	1 a 3 Mbit/s	d	358 B	médio (+meses)	3 a 30 m	IEEE 802.15.1

### 2.2.3 LoRa

LoRa é uma tecnologia proprietária de modulação, baseada na Chirp Spread Spectrum (CSS), desenvolvida pela Cycleo de Grenoble/França, entretanto comprada em 2012 pela empresa Semtech Corporation (Design and Reuse, 2012). Atualmente a Semtech licencia a tecnologia a outros fabricantes de integrados como p.e. a Microchip e a STMicroelectronics.

A CSS foi desenvolvida para aplicações de radar no anos 40. Este tipo de tecnologia tem vindo a ser crescentemente adotada para comunicação de dados pelo facto de necessitar de, relativamente, pouca potência de transmissão, ser robusto a interferências, eliminar ou atenuar os efeito de propagação multi-percurso ou Doppler (Semtech, 2015).

Este tipo de modulação digital, é uma técnica de espalhamento espectral que utiliza pulsos *chirp* modulados em frequência linear, numa largura de banda maior, para codificar informação.

A técnica de espalhamento espectral patenteada em 1942, por Hedwig Kiesler Markey e George Antheil, é um método pelo qual um sinal é deliberadamente espalhado, no domínio da frequência, distribuindo sinais de banda larga através de várias frequências em sequencias pseudo-aleatórias, permitindo desta forma menores interferências e relações sinal/ruído mais baixas (Abrantes, nd).

Um pulso *Chirp* é um sinal sinusoidal cuja frequência cresce (*up-chirp*) ou decresce (*down-chirp*) no tempo (Rochol, 2018) conforme figura 2.6.

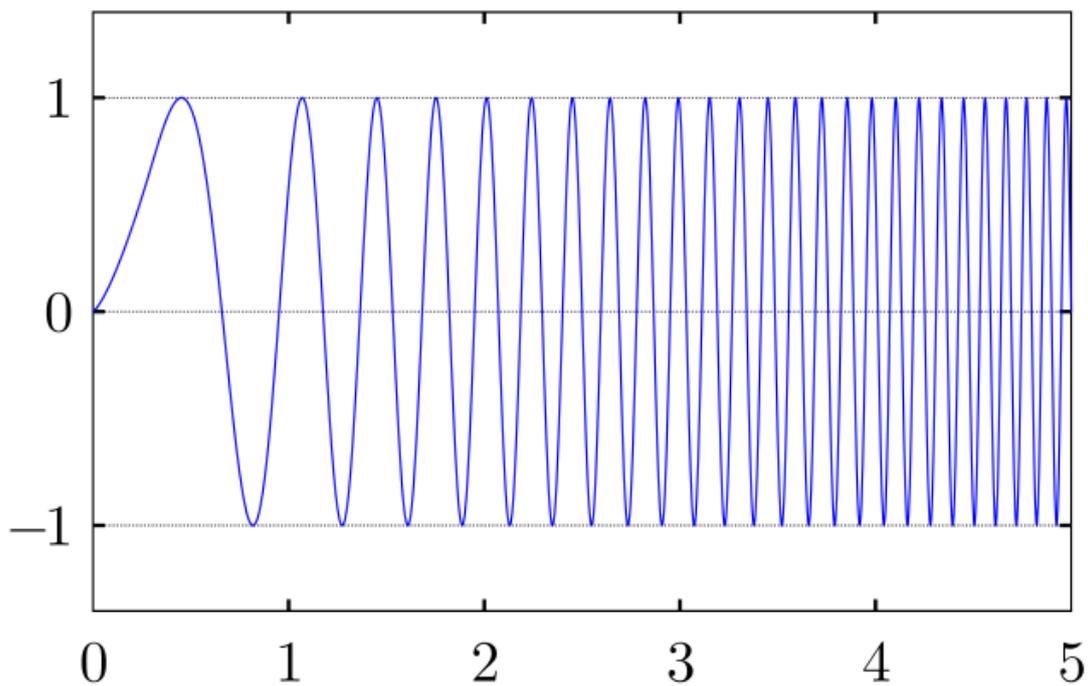


Figura 2.6: Exemplo de uma onda sinusoidal cuja frequência cresce <sup>1</sup>

Uma vez que esta tecnologia é proprietária e fechada, o seu modo de funcionamento não é completamente compreendido, apesar da Semtech dar algumas pistas e haver muitos investigadores que tentam perceber detalhadamente o seu funcionamento.

## 2.2.4 Bandas de frequência ISM

LoRa utiliza a banda de rádio não licenciada ISM (Industria, Científica e Médica) definida a nível mundial (Union, nd).

Para a Europa e especificamente para Portugal a banda está definida nas frequências entre 433,05 e 434,79 MHz (EUR433) e entre 863 e 870 MHz (EU863-870) Workgroup (2018).

Esta banda de frequências pode ser utilizada livremente por qualquer pessoa não tendo de pagar qualquer taxa de utilização.

<sup>1</sup>By Georg-Johann - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11330709>

No entanto, cada um dos dispositivos LoRa está sujeito a um ciclo de serviço (*Duty-Cycle*), o qual está definido de acordo com cada região e sub-banda.

Para Portugal, o ciclo de serviço é:

- g (863.0 – 868.0 MHz): 1%
- g1 (868.0 – 868.6 MHz): 1%
- g2 (868.7 – 869.2 MHz): 0.1%
- g3 (869.4 – 869.65 MHz): 10%
- g4 (869.7 – 870.0 MHz): 1%

Por exemplo, para a sub-banda g, se um dispositivo, para o envio de uma mensagem, levar 1 s, para um tempo de serviço de 1 %, o dispositivo terá de aguardar 99 s para voltar a enviar nova mensagem.

No caso do LoRa, é de salientar que estes limites se aplicam tanto aos nós como aos concentradores, sendo por isso mais crítico no caso dos concentradores uma vez que servem vários nós.

## 2.2.5 LoRaWan

LoRaWan é um protocolo de comunicação e arquitetura de sistema, figura 2.7, desenvolvida pela LoRa Alliance, para uma rede sem fios, utilizando a camada física de comunicação LoRa (Workgroup, 2015).

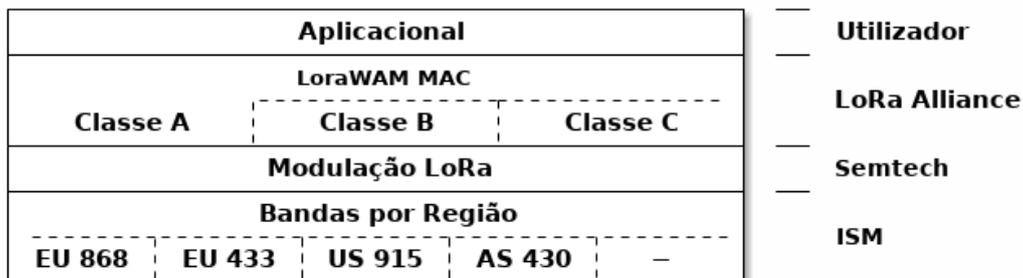


Figura 2.7: Modelo LoRaWAN / LoRa

A LoRa Alliance é um consórcio de várias empresas líderes tecnológicas com o objetivo de normalizar a tecnologia LPWAN baseada na radio modulação LoRa.

As redes LoRaWAN utilizam uma topologia em estrela de acordo com a figura 2.8, sendo utilizada a seguinte nomenclatura:

**Nó final** - dispositivo transceptor. Cada dispositivo tem de ter definido um identificador global único, DevEUI, um endereço do universo IEEE EUI64, o qual identifica de forma exclusiva o dispositivo no servidor de rede. Para cada um dos dispositivos poder participar numa rede LoRaWAN tem de ser previamente personalizado e ativado de acordo com modo de segurança adotado - 2.2.7;

**Concentrador** - transceptor que recebe mensagens dos nós finais e encaminha para o servidor de rede e vice-versa;

**Servidor de rede** - servidor que centraliza as mensagens enviadas por um nó final, recebidas de um ou mais Concentradores, reencaminhando-a para o devido servidor aplicacional; e vice-versa; Uma vez que vários concentradores podem receber a mesma mensagem de um nó final, o servidor expurga as mensagens repetidas e avalia a segurança e integridade das mesmas. Para cada mensagem, identifica o Concentrador com a melhor qualidade de sinal, relativamente ao nó, para envio de eventuais confirmações e/ou respostas, adaptando automaticamente, se necessário, a velocidade de transmissão;

**Servidor aplicacional** - servidor que processa as mensagens recebidas do servidor de rede, devolvendo, eventualmente, uma mensagem de resposta.

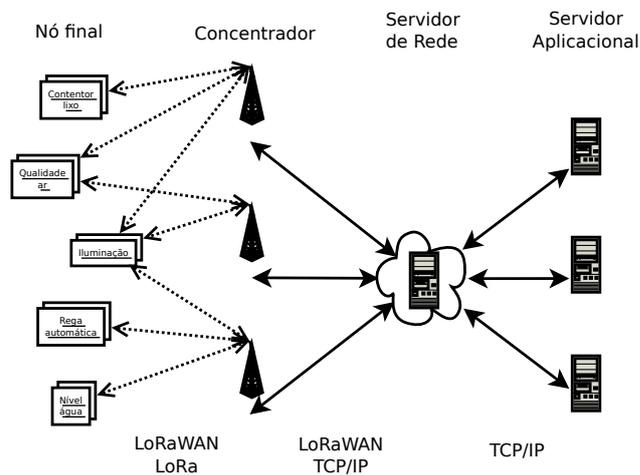


Figura 2.8: Arquitetura em estrela Lora/LoRaWAN

As mensagens enviadas pelos nós finais ao Concentrador designam-se, *uplink*, ligações ascendentes e as mensagens enviadas do Concentrador para os nós finais designam-se, *downlink*, ligações descendentes.

As mensagens ascendentes, enviadas pelos nós finais, podem ser recebidas por vários Concentradores que as reencaminham para o servidor de rede através de uma outra rede que pode ser Móvel, Ethernet, Satélite ou Wi-Fi. Caso haja mensagem de resposta, o servidor de rede seleciona o melhor Concentrador para o fazer, uma vez que mesmo que vários Concentradores tenham recebido a mensagem do nó final, só um deles enviará a resposta.

O servidor de rede tem definido o DevEUI de cada nó final bem como o endereço do servidor aplicacional que deverá receber e responder ao referido nó, por forma a poder encaminhar as mensagens que recebe, tanto ascendentemente como descendentemente.

O protocolo LoRaWAN permite instalar/criar quer redes privadas, fechadas, em que uma determinada entidade faz a sua gestão, como por exemplo, uma universidade ou um município, quer redes publicas, abertas, como por exemplo, a rede da The Things Network (<https://www.thethingsnetwork.org>) em que o servidor de rede é de uma entidade que faz a sua gestão e os Concentradores, nós finais e servidores aplicativos são de entidades ou pessoas que os podem ligar livremente à rede.

## 2.2.6 Classes de dispositivos

A especificação LoRaWAN (Workgroup, 2015) define três classes de dispositivos, havendo para cada uma delas um compromisso entre a latência de comunicação e vida da bateria:

**A(II - todos)** - É a classe base, suportada por todos os dispositivos, sendo fundamentalmente para os dispositivos a bateria uma vez que é a mais eficiente em termos de energia. É do tipo Fala-Antes-D'ouvir, ou seja, só depois de o nó final enviar uma mensagem é que fica disponível para receber uma resposta do servidor, havendo duas janelas, denominadas por RX1 e RX2, temporalmente pequenas, configuráveis, para o efeito. Após o período definido ser ultrapassado, caso o servidor aplicativo pretenda enviar nova mensagem, terá de aguardar que o nó volte a enviar uma nova mensagem;

**B(eancon - farol)** É uma classe opcional definida opcionalmente para além da anterior. Esta classe permite que os nós finais fiquem no modo de escuta em determinados períodos agendados de tempo, sincronizados com o servidor de rede;

**C(ontínuos - contínuo)** É também uma classe opcional que permite que o nó final fique quase sempre à escuta de mensagens do servidor de rede. A janela de escuta só é encerrada quando o dispositivos estão a enviar mensagens ao Concentrador.

## 2.2.7 Segurança

A especificação LoRaWAN (Workgroup, 2015) define dois níveis de segurança, utilizando encriptação AES com troca de chaves:

**ao nível da rede** - exigindo autenticação do nó final na rede;

**ao nível das aplicações** assegurando que o operador da rede não tem acesso aos dados das aplicações dos utilizadores.

Todos os dispositivos para funcionarem numa determinada rede têm de ser ativados através de uma das seguintes formas (Committee, 2017):

**Over-The-Air-Activation (OTAA)** - Para além do endereço único DevEUI do dispositivo são definidas outras duas chaves raiz AES-128: *NwkKey* e a *AppKey* do conhecimento do servidor de rede. A partir da primeira chave são geradas outras 2: *FNwkSIntKey*, *SNwkSIntKey* e a partir da segunda é gerada a *AppSKey*.

**Activation By Personalization (ABP)** - É um sistema menos seguro mas permite que os dispositivos estejam em movimento e se vão autenticando em diferentes redes, desde que tenham permissão, claro.

### **2.2.8 Limitações LoRaWan**

Adelantado et al. (2017) avaliou alguns limites da rede LoRaWAN, ao nível da dimensão da rede e do débito e para diversos casos de utilização possíveis com monitorização em tempo real, aplicações para Cidades Inteligentes, Transporte inteligente e logística e até vídeo-vigilância.

Um dos constrangimentos mais significativos, serão os ciclos de serviço e o número de nós limite que cada concentrador consegue ouvir e enviar mensagens.

### **2.2.9 Exemplos de Soluções que utilizam tecnologias LPWAN**

Entretanto, analisaram-se outros exemplos por forma a aferir se existiriam outros tipos de limitação:

Zanella et al. (2014), menciona as melhores práticas e diretrizes adotadas no projeto de cidade inteligente de Pádua e com exemplos de leitura remota de vários sensores wireless.

Parekar and Dongre (2015), analisa um sistema de iluminação inteligente com comunicações por GSM, idêntico ao da Arquiled.

Pascual Pelayo (2018), avalia várias opções de comunicação para sistemas de iluminação inteligente.

Araujo Soto (2017), avalia a performance de plataforma IoT utilizando ferramentas existentes.

Sri Kantha (2015), refere um sistema de iluminação inteligente com Zigbee e GSM / WiMAX.



## Capítulo 3

# Solução proposta

### 3.1 Visão geral

Para o desenvolvimento da solução houve a necessidade de criar uma rede LoRaWAN. A instalação dos concentradores da Cisco, interior, figura 3.1 e exterior, figura 3.2, já estava em curso no ISCTE, tendo sido apenas necessário instalar fisicamente o servidor de rede, figura 3.4, o sistema operativo e a respetiva solução aplicacional da Actility.



Figura 3.1: Concentrador interior Cisco.

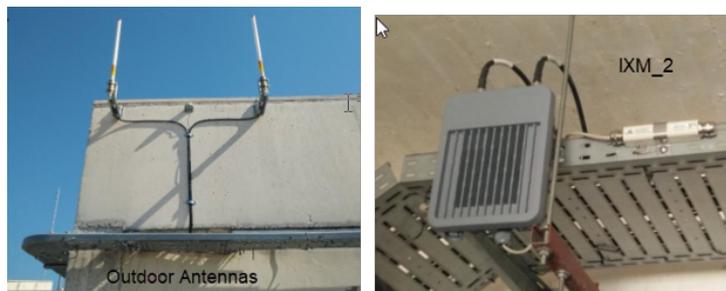


Figura 3.2: Antena e Concentrador exterior Cisco.

O modelo da infraestrutura do protótipo da solução proposta, encontra-se na figura 3.3.

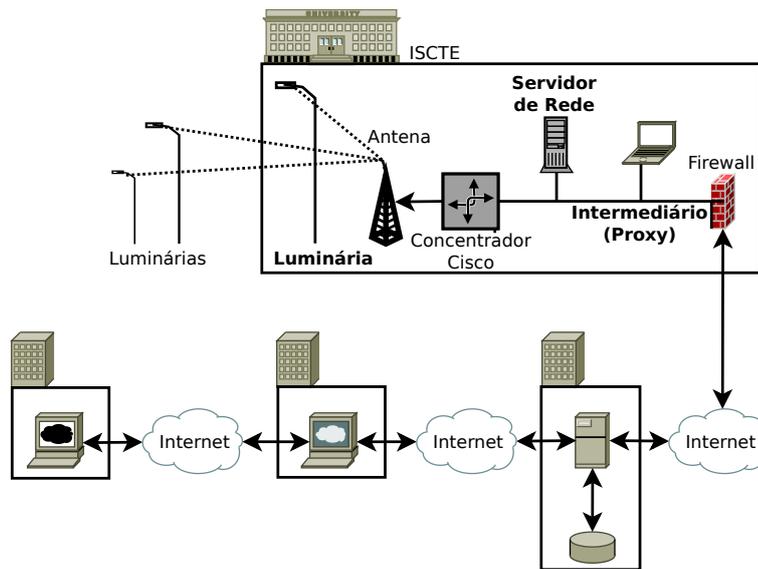


Figura 3.3: Infraestrutura da solução proposta.

A solução proposta, foi desenvolvida no sentido de ter o menor impacto no sistema atual da Arquiled. Assim, os componentes do sistema instalados e/ou desenvolvidos foram:

1. servidor de rede - foi necessário instalar um servidor e configurar os dispositivos que iriam aceder à rede e o servidor aplicacional para o qual serão reencaminhadas as mensagens recebidas dos nós da rede;
2. luminária - foi necessário ligar o módulo de comunicação à luminária e desenvolver e instalar o software necessário para que pudesse enviar mensagens comunicar e responder ao servidor aplicacional;
3. servidor intermediário (*Proxy*) - esta componente foi necessária por duas razões:
  - o sistema estava a ser desenvolvido com uma rede sem acesso do exterior;
  - dadas as limitações dos tamanhos das mensagens impostos pela comunicação LoRa, as mensagens enviadas pela luminária tiveram de ser descomprimidas antes de serem entregues ao servidor aplicacional e as respostas tiveram de ser comprimidas antes de ser enviadas à luminária.

## 3.2 Servidor de rede

Relativamente à componente de aplicacional, foi selecionado pelo ISCTE o software de gestão Activity ThingPark Enterprise (TPE) versão 5 da Activity. A Activity é membro da LoRa Alliance, desenvolve

várias soluções para *IoT* e tem parcerias com a Cisco.

Os requisitos mínimos de uma máquina virtual ou um computador exclusivo, para o TPE funcionar, gerindo até 10 concentradores e 2 000 nós, eram: processador do tipo Intel i3, memória RAM de 16 MB e armazenamento até 64 GB.

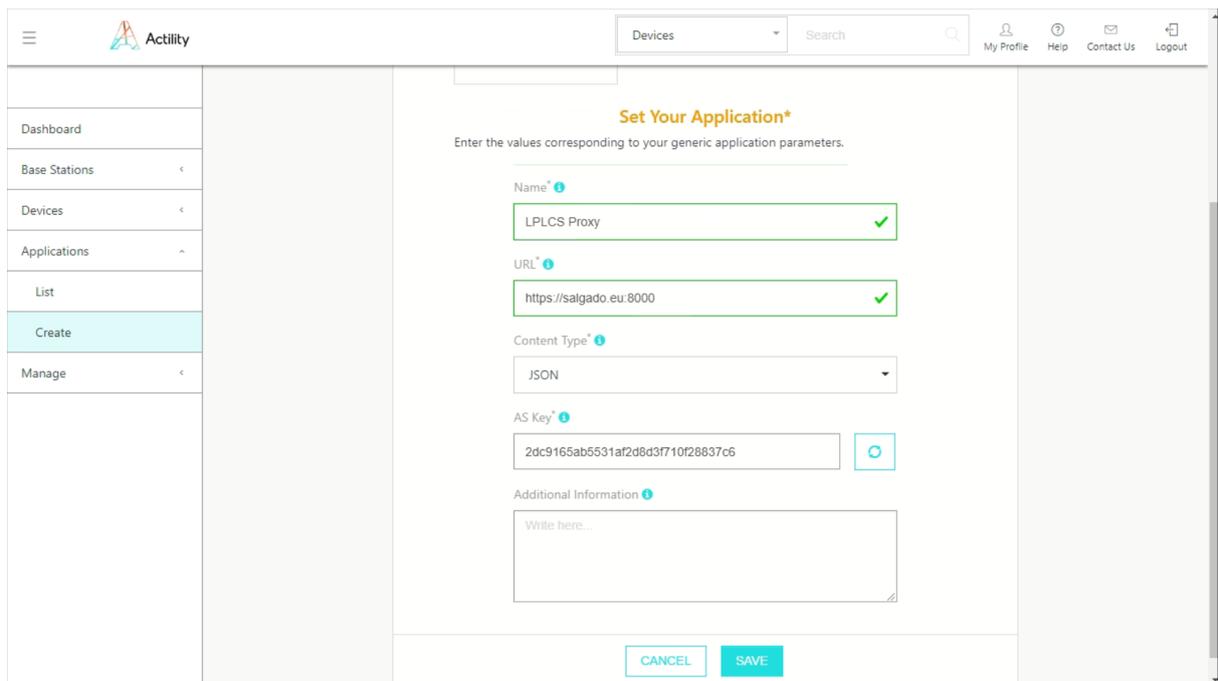
Utilizou-se um computador HP Optiplex 7040, figura 3.4, com uma ligação Ethernet.



Figura 3.4: Servidor de rede.

O DVD de instalação da aplicação, instala também de raiz o sistema GNU/Linux Cent OS versão 7. O sistema instalado funciona apenas com terminais, em modo de texto, disponibilizando uma conta de utilizador de sistema com apenas algumas funcionalidades, sendo a gestão do software da Actility efetuada, remotamente, através de um navegador.

O endereço URL do software aplicacional foi configurado de acordo com a figura 3.5.



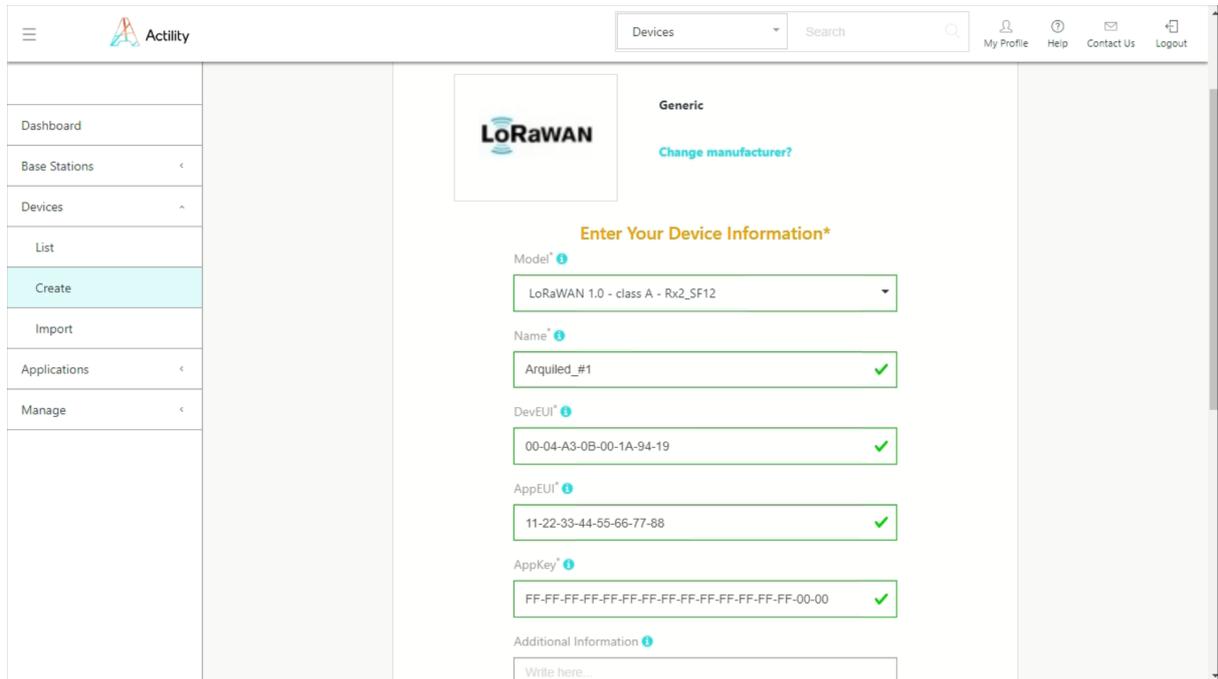
The screenshot shows the Actility web interface. On the left is a navigation menu with options: Dashboard, Base Stations, Devices, Applications, List, Create (highlighted), and Manage. The main content area is titled "Set Your Application\*" and contains the following fields:

- Name\*: LPLCS Proxy (with a green checkmark)
- URL\*: https://salgado.eu:8000 (with a green checkmark)
- Content Type\*: JSON (dropdown menu)
- AS Key\*: 2dc9165ab5531af2d8d3f710f28837c6 (with a refresh icon)
- Additional Information\*: A text area with the placeholder "Write here..."

At the bottom of the form are two buttons: "CANCEL" and "SAVE".

Figura 3.5: Formulário de registo do servidor aplicacional no Actility.

Os nós foram também configurados de acordo com as figuras 3.6 e 3.7 fazendo também a associação ao servidor aplicacional, anteriormente configurado.



The screenshot displays the 'Activity' web application interface. On the left is a sidebar menu with options: Dashboard, Base Stations, Devices, List, Create (highlighted), Import, Applications, and Manage. The main content area is titled 'Generic' and features the LoRaWAN logo and a 'Change manufacturer?' link. Below this is the 'Enter Your Device Information\*' form, which contains the following fields:

- Model: LoRaWAN 1.0 - class A - Rx2\_SF12
- Name: Arquiled\_#1
- DevEUI: 00-04-A3-0B-00-1A-94-19
- AppEUI: 11-22-33-44-55-66-77-88
- AppKey: FF-FF-FF-FF-FF-FF-FF-FF-FF-FF-FF-FF-FF-00-00
- Additional Information: Write here...

Figura 3.6: Formulário de registo de um nó no Activity (1/2)

### 3.3 Comunicação da luminária

A Arquiled disponibilizou uma luminária para testes, tendo previamente adaptado o *firmware* para a interpretação dos comandos que são enviados e recebidos através da porta série, removendo a camada de comunicação GSM.

Para a comunicação entre a luminária e o sistema de gestão, utilizou-se a placa ASME Lion da Axel Elettronica, figura 3.8. Esta placa, para além de ter um controlador Atmel D21, tem um módulo LoRa RN2483 da Microchip, requisito da Arquiled, o que lhe permite comunicações LoRaWAN.

Uma vez que as luminárias da Arquiled já funcionavam num conceito de Falar-Antes-D'ouvir a utilização de um dispositivo Classe A seria suficiente para a nova solução com comunicação LoRa, desde que os tempos de resposta do servidor aplicacional estivessem dentro das janelas RX1 e/ou RX2 para receber a mensagem.

O fluxograma do software desenvolvido para a placa é o indicado na figura 3.9.

Na figura 3.10 o esquema geral de comunicação.

Uma vez que no sistema de comunicação desenhado pela Arquiled o servidor aplicacional devolve sempre uma resposta e esta pode não estar chegar a tempo da janela RX1 ou RX2, nesses casos, a placa envia uma nova mensagem apenas a informar que continua a aguardar resposta, para que a janela de tempo para receber uma resposta volte a estar aberta.

Para o desenvolvimento da aplicação de comunicação na placa, foi necessário preparar um

The screenshot shows the Actility web interface. On the left is a navigation menu with items: Dashboard, Base Stations, Devices, List, Create (highlighted), Import, Applications, and Manage. The top right contains a search bar and user options: My Profile, Help, Contact Us, and Logout. The main content area is titled 'Additional Information' and contains a text input field with the placeholder 'Write here...'. Below this is the section 'Associate Your Device With Your Application\*', which instructs the user to select an application. A dropdown menu is open, showing 'LPLCS Proxy' with a plus icon to its right. The next section is 'Set Your Device Location', which instructs the user to enter coordinates. A dropdown menu is open, showing 'No location'. At the bottom of the form are two buttons: 'CANCEL' and 'SAVE'.

Figura 3.7: Formulário de registo de um nó no Actility (2/2)



Figura 3.8: Placa ASME Lion da Axel Elettronica

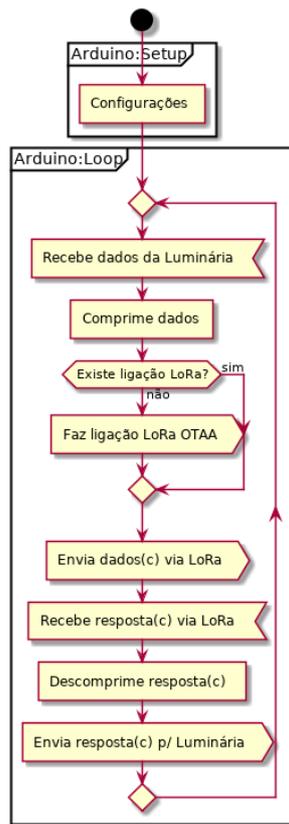


Figura 3.9: O fluxograma do software desenvolvido para a placa

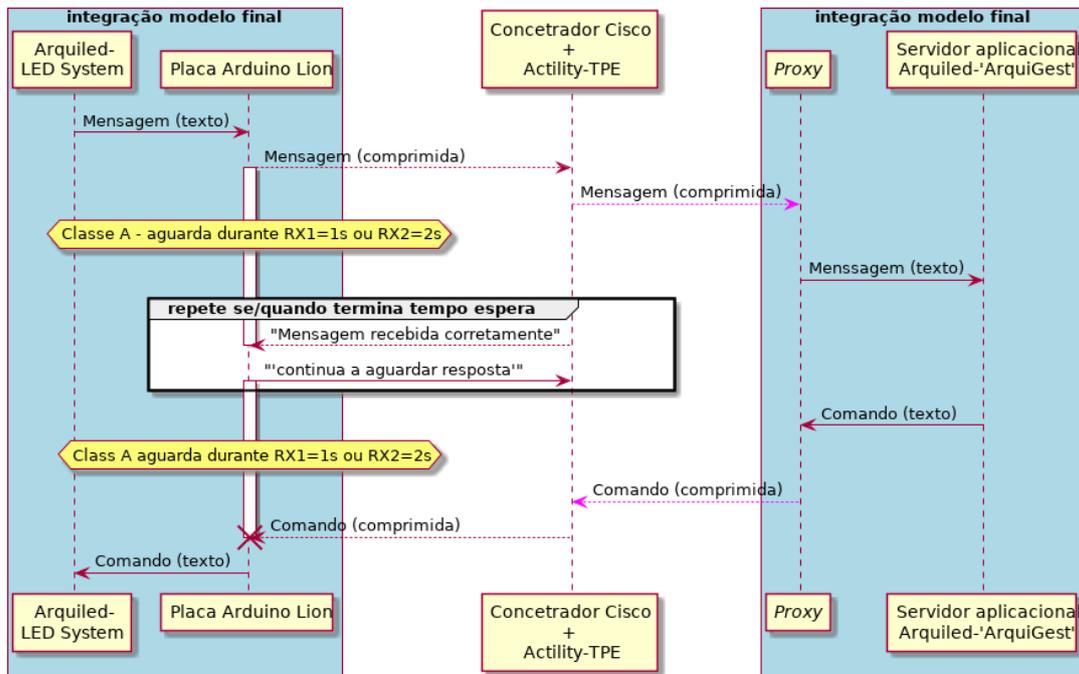


Figura 3.10: Troca de mensagens entre a placa e o servidor aplicacional

ambiente de desenvolvimento. O manual do utilizador da placa (Elettronica, 2016) sugeria duas alternativas: Arduino IDE ou Atmel Studio. Pelo conhecimento e experiência que já existia, optou-se por Arduino IDE. Por se estar a utilizar um sistema para desenvolvimento GNU/Linux, o qual tem um gestor de instalação de aplicações onde o Arduino IDE está incluído, efetuou-se a instalação através do gestor de pacotes da distribuição.

O desenvolvimento da aplicação de comunicação foi efetuado em C++ de acordo com as especificações (Arduino, 2019).

Entretanto, após uma atualização de *firmware* à placa de comunicação, foi possível a utilização de comunicação em Classe C. Uma vez que neste tipo de solução não existem constrangimentos de energia, passou a utilizar-se este tipo de comunicação permitindo um melhor controlo das luminárias com menos transmissões caso as respostas do servidor estivessem fora da janela de tempo para receção.

### 3.4 Servidor intermediário

Para haver comunicação bidirecional, necessária, entre o servidor de rede 3.2 e o servidor aplicacional 2.1.4 teve de se instalar um servidor intermediário (*Proxy*), figura 3.11, uma vez que a rede da universidade tem instalada uma *Firewall*, não permitindo que o servidor aplicacional comunicasse com o servidor de rede para enviar respostas.



Figura 3.11: Servidor intermediário

Este servidor passa assim a receber as mensagens do servidor de rede e encaminha-as ao servidor aplicacional através da chamada, HTTPS, de um endereço *URL*, ficando a aguardar uma eventual resposta. Caso haja resposta, a mesma é enviada ao servidor de rede para ser entregue à luminária.

O programa de comunicação foi desenvolvido em Python e tem a estrutura da figura 3.12.

### 3.5 Compressão das mensagens - método 1

De acordo com (Committee, 2017) o tamanho máximo das mensagens a transmitir deverá ser no máximo 51 B, pelo que o tamanho atual das mensagens, quer de envio da placa ao servidor quer



Figura 3.12: Estrutura da aplicação do servidor intermediário

do servidor à placa, teria de ser reduzido.

Uma vez que as mensagens podem ter 114 B de tamanho, a compressão para 51 B, equivale a um rácio de compressão igual ou superior a cerca de  $51 / 114 = 44,74\%$  ou seja, uma redução superior a 55 % em cada mensagem.

O tipo de compressão/descompressão necessário teria de ser relativamente simples e rápido para a capacidade de processamento existente na placa, tendo em atenção também o facto de cada mensagem ser relativamente curta, pelo que se optou por um método estatístico de compressão, uma vez que se efetuaria o processamento prévio de análise estatística, retirando-o da placa de comunicação.

No entanto, porque ainda não existiam dados estatísticos para a análise, na fase de testes de comunicações, desenvolveu-se um algoritmo de compressão, utilizando dicionários e códigos de comprimento variável, o qual permitiu compressões de até 50 %, insuficiente dado que quando as mensagens passavam o limite dos 51 B as mensagens não eram transmitidas.

Foi necessário analisar a redundância da informação que era transmitida, procurando-se redundância de símbolos, ou seja, os símbolos que mais se repetiam nas mensagens, bem como redundância contextual, ou seja, conjuntos de símbolos que mais se repetiam. Em seguida, atribuiu-se a cada símbolo um código de substituição, utilizando o algoritmo de Hauffman (Salomon and Motta, 2010), o qual gera códigos de comprimento variável para cada símbolo, atribuindo os códigos com menor tamanho aos símbolos mais utilizados.

Numa primeira fase, optou-se por fazer uma análise automática ao conteúdo e não à sua estrutura de dados uma vez que assim não seria necessário ter conhecimento do tipo de informação que era transmitida, nomeadamente, formato, intervalos de valores, etc.

Dado que o conteúdo das mensagens enviadas e recebidas era muito diferente, pretendeu-se

analisar separadamente as mensagens de envio e de recepção.

Assim, registou-se em ficheiros de texto o conteúdo das transmissões ocorridas durante, cerca de um mês e meio, de testes. Foram analisadas 33 776 mensagens entre a placa e o servidor e o mesmo número entre o servidor e a placa.

Desenvolveu-se uma aplicação que lia o ficheiro de texto com as mensagens a analisar e, para cada linha, identificava todas as sub-cadeias de caracteres, únicas, possíveis de obter, desde a mais pequena, apenas com um carácter, até à maior, com o comprimento total da linha, gerando um ficheiro com um dicionário de todas as "palavras". O ficheiro de dicionário conteria assim as palavras identificadas, uma por linha, juntamente com o respetivo tamanho e o número de ocorrências no período analisado. Obteve-se um ficheiro com 5 591 243 tipos de palavras diferentes com tamanho superior a 1 carácter.

Em seguida, ordenou-se por ordem crescente de tamanho e decrescente de nº de ocorrências. Para o ficheiro com as mensagens de teste entre a placa e o servidor, para as sub-cadeias de um carácter de tamanho, obteve-se o resultado da tabela 3.1.

A primeira coluna da tabela 3.1 permite identificar o universo de símbolos utilizados pela placa, para comunicar com o servidor.

A análise de sub-cadeias de maiores tamanhos e em grandes quantidades permitiu detetar a redundância contextual, como a listada na tabela 3.2, e, desta forma, simplificar o universo de símbolos.

Foi necessário ter-se em atenção que, por exemplo, ao substituir na tabela os símbolos "r", "e", "s" por "res=", ao número de ocorrências existente para o símbolo "=" teve de ser retirado o número de ocorrências da sub-cadeia "res=", neste caso são 33 776 ocorrências.

Com base no "novo" universo, aplicou-se o algoritmo de Hauffman para obter os códigos de tamanho variável (CTV) utilizados na compressão. A tabela 3.3 mostra para cada Símbolo:

**Nº Ocorrências** - contabilizado no universo das mensagens analisadas retirado o nº de ocorrências em Símbolos com mais caracteres;

**%** - probabilidade de ocorrência do símbolo no universo analisado;

**Tamanho normal** - tamanho total do símbolo transmitido em bits obtido através do produto do Nº de Ocorrências pelo nº de caracteres do Símbolo multiplicado por 8 (nº de bits de cada carácter);

**CTV** - códigos finais obtidos, em notação binária;

**Tamanho Comprimido** - tamanho do símbolo comprimido, obtido através do produto do nº de bits do código VLC e o Nº de Ocorrências.

Com os códigos indicados na tabela 3.3 é possível uma compressão com um ganho médio de 62 % para as transmissões enviadas pela placa, o que permite ter alguma folga em relação à compressão média necessária de 55 %.

O mesmo processo foi utilizado para as mensagens de envio do servidor para a placa. A tabela 3.4 permite identificar o universo de símbolos utilizados, pelo servidor, para comunicar com a placa.

Tabela 3.1: Sub-cadeia, de tamanho um, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre a placa e o servidor.

Símbolo	Nº Ocorrências	Nº Caracteres
0	1 055 245	1
,	536 575	1
F	193 879	1
1	190 229	1
5	119 961	1
2	100 154	1
A	83 060	1
3	68 502	1
=	67 489	1
"	66 830	1
B	63 811	1
C	62 440	1
6	62 359	1
9	61 920	1
E	53 044	1
4	53 009	1
8	48 876	1
7	44 264	1
e	33 776	1
r	33 776	1
s	33 776	1
&	33 713	1
D	33 659	1
l	33 564	1
o	33 564	1
p	33 415	1
N	626	1
W	626	1
d	149	1
g	149	1
h	149	1
i	149	1

Tabela 3.2: Sub-cadeia, de tamanhos diversos, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre a placa e o servidor.

Sub-cadeia	Nº Ocorrências	Nº Caracteres
,00	192 768	3
res=	33 776	4
",,	33 415	2
,"	33 415	2
&pol=	33 415	5
&hid=	149	5
&log=	149	5

Tabela 3.3: Universo de símbolos utilizados nas mensagens enviadas pela placa durante os testes de comunicação.

Símbolo	Nº Ocorrências	%	Tamanho normal (bit)	CTV (binário)	Tamanho comprimido (bit)
0	669 709	26,64	5 357 672	10	1 339 418
,	276 977	11,02	2 215 816	010	830 931
F	193 879	7,71	1 551 032	1110	775 516
,00	192 768	7,67	4 626 432	1101	771 072
1	190 229	7,57	1 521 832	1100	760 916
5	119 961	4,77	959 688	0001	479 844
2	100 154	3,98	801 232	11110	500 770
A	83 060	3,30	664 480	01111	415 300
3	68 502	2,72	548 016	01101	342 510
B	63 811	2,54	510 488	00110	319 055
C	62 440	2,48	499 520	00101	312 200
6	62 359	2,48	498 872	00100	311 795
9	61 920	2,46	495 360	00001	309 600
E	53 044	2,11	424 352	00000	265 220
4	53 009	2,11	424 072	111111	318 054
8	48 876	1,94	391 008	111110	293 256
7	44 264	1,76	354 112	011101	265 584
res=	33 776	1,34	1 080 832	011001	202 656
D	33 659	1,34	269 272	011000	201 954
,"	33 415	1,33	534 640	001111	200 490
",	33 415	1,33	534 640	0111001	233 905
&pol=	33 415	1,33	1 336 600	001110	200 490
N	626	0,02	5 008	011100011	5 634
W	626	0,02	5 008	01110000	5 008
&hid=	149	0,01	5 960	0111000101	1 490
&log=	149	0,01	5 960	0111000100	1 490
	2 514 192	100,00	25 621 904		9 664 158



Tabela 3.4: Sub-cadeia, de tamanho um, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre o servidor e a placa

Símbolo	Nº Ocorrências	Nº Caracteres
=	34 297	1
A	33 906	1
m	33 826	1
E	33 803	1
c	33 780	1
q	33 780	1
r	33 780	1
:	33 776	1
d	33 776	1
N	33 776	1
T	33 776	1
W	33 547	1
0	5 574	1
p	682	1
8	610	1
,	521	1
5	416	1
9	405	1
l	401	1
o	383	1
1	238	1
t	124	1
4	119	1
C	118	1
2	110	1
F	109	1
s	70	1
3	63	1
D	61	1
6	54	1
i	54	1
B	33	1
7	30	1
f	14	1
x	14	1
"	8	1
.	4	1
a	4	1
e	4	1
g	4	1
n	4	1
X	4	1

Tabela 3.5: Sub-cadeia, de tamanhos diversos, de caracteres enviadas pela placa durante os testes de comunicação entre o servidor e a placa

Sub-cadeia	Nº Ocorrências	Nº Caracteres
ArqNET:	33 776	8
cmd=	33 776	4
pol=	383	4
pst=	70	4
tim=	50	4
flx=	14	4
cgi="arqnet.pl"	4	15

Tabela 3.6: Universo de símbolos, utilizados nas mensagens recebidas pela placa durante os testes de comunicação entre o servidor e a placa

Símbolo	Nº Ocorrências	%	Tamanho normal (bit)	CTV (binário)	Tamanho comprimido (bit)
ArqNET:	33 776	30,58	2 161 664	11	67 552
cmd=	33 776	30,58	1 080 832	10	67 552
W	33 547	30,37	268 376	01	67 094
0	5 574	5,05	44 592	001	16 722
8	610	0,55	4 880	000111	3 660
,	521	0,47	4 168	000101	3 126
5	416	0,38	3 328	000010	2 496
9	405	0,37	3 240	000001	2 430
pol=	383	0,35	12 256	000000	2 298
1	238	0,22	1 904	0001001	1 666
p	225	0,20	1 800	0000111	1 575
A	130	0,12	1 040	00011010	1 040
4	119	0,11	952	00011000	952
C	118	0,11	944	00010001	944
2	110	0,10	880	00001101	880
F	109	0,10	872	00001100	872
pst=	70	0,06	2 240	000110110	630
3	63	0,06	504	000110011	567
D	61	0,06	488	000100001	549
6	54	0,05	432	000100000	486
tim=	50	0,05	1 600	0001101111	500
B	33	0,03	264	0001100101	330
7	30	0,03	240	0001100100	300
E	27	0,02	216	00011011101	297
flx=	14	0,01	448	000110111001	168
cgi="arqnet.pl"	4	0,00	480	0001101110001	52
X	4	0,00	32	0001101110000	52
	110 467	100,00	3 598 672		244 790

Tabela 3.7: Estruturas das mensagens enviadas pela placa durante os testes de comunicação com o servidor.

Mod.	Sub-cadeia	Nº Ocorrências	Nº Caracteres	Nº ?
1	res=????,??,??,??&pol=????,??? ?,????,????,????,????,????,??? ???,????,??,??,??,????????? ?????	32 789	95	68
2	res=????,??,??,??&pol=????,??? ?,????,????,????,????,????,??? ???,????,"????????N????????W" ,??,??,??,????????????	626	114	85
3	res=????,??,??,??	198	17	10
4	res=????,??,??,??&hid=????????? ????????,????????????????????&l og=????,????,????,????????,??? ?????,?????????	76	104	81
5	res=????,??,??,??&hid=,&log=? ??,????,????,????????,???????? ,?????????	73	69	46
6	res=????	14	8	4

Tabela 3.8: Códigos a utilizar para indicar o tipo de formato de mensagens entre a placa e o servidor

Mod.	Nº Ocorrências	%	Tamanho normal (bit)	CTV (binário)	Tamanho comprimido (bit)
1	32 789	97,08	7 082 424	1	32 789
2	626	1,85	145 232	01	1 252
3	198	0,59	11 088	001	594
4	76	0,23	13 984	0000	304
5	73	0,22	13 432	00011	365
6	14	0,04	448	00010	70
	33 776	100,00	7 266 608		35 374

Tabela 3.9: Códigos a utilizar para os caracteres hexadecimais das mensagens entre a placa e o servidor

Símbolo	Nº Ocorrências	%	Tamanho normal (bit)	CTV (binário)	Tamanho comprimido (bit)
0	1 055 245	45,99	8 441 960	0	1 055 245
F	193 879	8,45	1 551 032	1110	775 516
1	190 229	8,29	1 521 832	1101	760 916
5	119 961	5,23	959 688	1001	479 844
2	100 154	4,37	801 232	11110	500 770
A	83 060	3,62	664 480	11001	415 300
3	68 502	2,99	548 016	10111	342 510
B	63 811	2,78	510 488	10110	319 055
C	62 440	2,72	499 520	10101	312 200
6	62 359	2,72	498 872	10100	311 795
9	61 920	2,70	495 360	10001	309 600
E	53 044	2,31	424 352	10000	265 220
4	53 009	2,31	424 072	111111	318 054
8	48 876	2,13	391 008	111110	293 256
7	44 264	1,93	354 112	110001	265 584
D	33 659	1,47	269 272	110000	201 954
	2 294 412	100,00	18 355 296		6 926 819

Tabela 3.10: Estruturas das mensagens enviadas pelo servidor durante os testes de comunicação com a placa.

Mod.	Sub-cadeia	Nº Ocorrências	Nº Caracteres	Nº ?
1	ArqNET: cmd=W	33 271	13	0
2	ArqNET: pol=???,cmd=W	226	21	3
3	ArqNET: pol=???,cmd=p	141	21	3
4	ArqNET: pst=???????????????? ???????????????????????????? ???????????????????????????? ???????????????????????????? ????????????????????????????,cmd=p	70	114	96
5	ArqNET: tim=????,cmd=W	48	22	4
6	ArqNET: cmd=p,pol=???,flx=??	14	28	5
7	ArqNET: cgi="arqnet.pl",cmd=X	4	29	0
8	ArqNET: tim=????,pol=???,cmd=W	2	30	7

Tabela 3.11: Códigos a utilizar para indicar o tipo de formato de mensagens entre a placa e o servidor

Mod.	Nº Ocorrências	%	Tamanho normal (bit)	CTV (binário)	Tamanho comprimido (bit)
1	33 271	98,50	3 460 184	1	33 271
2	226	0,67	32 544	00	452
3	141	0,42	20 304	011	423
4	70	0,21	10 080	0101	280
5	48	0,14	6 912	01001	240
6	14	0,04	2 576	010001	84
7	4	0,01	928	0100001	28
8	2	0,01	368	0100000	14
	33 776	100,00	3 533 896		34 792

Tabela 3.12: Códigos a utilizar para os caracteres hexadecimais das mensagens entre a placa e o servidor

Símbolo	Nº Ocorrências	%	Tamanho normal (bit)	CTV (binário)	Tamanho comprimido (bit)
A	33 906	44,82	271 248	0	33 906
E	33 803	44,68	270 424	11	67 606
0	5 574	7,37	44 592	101	16 722
8	610	0,81	4 880	10010	3 050
5	416	0,55	3 328	100111	2 496
9	405	0,54	3 240	100110	2 430
1	238	0,31	1 904	100010	1 428
4	119	0,16	952	1000110	833
C	118	0,16	944	1000011	826
2	110	0,15	880	1000001	770
F	109	0,14	872	1000000	763
3	63	0,08	504	10001110	504
D	61	0,08	488	10000101	488
6	54	0,07	432	10000100	432
B	33	0,04	264	100011111	297
7	30	0,04	240	100011110	270
	75 649	100,00	605 192		132 821

### 3.7 Redução do número de mensagens e do tamanho

Uma das principais limitações (Adelantado et al., 2017) em relação às transmissões LoRaWAN são: 1) o ciclo de serviço, na Europa, cada dispositivo e cada gateway têm, por hora, uma limitação no tempo de transmissão para cada sub-banda (Institute, 2017; Bankov et al., 2016); e 2) a carga útil limitada.

Do ponto de vista energético, a maior parte do consumo é gasta em transmissões de rádio. Apenas uma pequena parte (20%) da energia do nó é gasta em recepção de rádio, processamento de dados e tempo de espera (Bouguera et al., 2018; Casals et al., 2017; Mathur et al., 2017). Geralmente, economizar energia é outra preocupação para o uso desta tecnologia de comunicação, embora não tenha sido um problema neste trabalho.

Pelas razões acima apontadas, analisou-se uma forma de minimizar o tamanho das mensagens e a frequência das transmissões mas tentando garantir a detecção de falta de comunicação das luminárias por eventuais avarias.

O Sistema da Arquiled, tinha as luminárias a comunicar a cada 5 minutos. No entanto, durante o dia, poucos parâmetros se alteram (e durante a noite esperamos que os valores do GPS também não se alterem), embora a detecção, o mais cedo possível, de dispositivos que deixem de funcionar por avaria, seja uma grande preocupação.

Tentou-se resolver o problema (Institute, 2017) e minimizar a comunicação do concentrador (Pop et al., 2017) através da seguinte proposta:

**$\delta$ \_Sensor-N** - definir o que é considerado uma alteração significativa de valor de cada um dos sensores  
- p.e: Se as coordenadas GPS não variarem em  $\pm 10^3$  não se considera uma alteração que mereça ser reportada;

**T- $\delta$**  - definir um período mínimo de comunicação de alterações nos valores de cada sensor - p.e: não reportar alterações significativas com períodos inferiores a 5 min;

**NRet** - definir o número de retransmissões se houver uma alteração de valores - em vez de aguardar confirmação por parte do concentrador de que recebeu a mensagem, a mesma é reenviada, novamente, um determinado número de vezes por forma a garantir que não se perde a informação a transmitir;

**T-Puls** - definir um período de pulsação - poderá haver casos em que não há alterações significativas de valores durante algum tempo pelo que o nó não enviará qualquer mensagem. No entanto, podem não existir mensagens por problemas na luminária e por essa razão é conveniente definir um período para comunicação mesmo que não existam alterações a reportar. Desta forma, poderão ser dados alertas caso não se tenha recebido uma mensagem de pulsação no período esperado;

**TpPuls** - definir o tipo de mensagem de pulsação (mensagem vazia ou todos os valores dos sensores)  
- a mensagem vazia serve apenas para indicar que o sistema está a comunicar. A mensagem com todos os valores dos sensores, permite uma redundância acrescida;

As mensagens transmitidas pelas luminárias, comunicariam apenas valores "alterados", ou seja, teriam um cabeçalho para indicação bit a bit, dos valores dos sensores que tinham sido alterados, seguido dos respectivos valores.

Um exemplo de definição de valores para cada um dos pontos anteriores, seria:

1.  $\delta$ -Temperatura = +/-1,  $\delta$ -Tensão = +/-10;
2. T- $\delta$  = 120 s;
3. NR = 1;
4. T-Puls = 3 600 s;
5. TpPuls = <vazio>;

A tabela 3.13 mostra os valores  $\delta$  definidos para cada sensor:

Tabela 3.13: Valores de  $\delta$  para cada um dos sensores/valores reportados pelas luminárias

Sensor	$\delta$
GPS_LAT	0,001
GPS_LNG	0,001
TEMP	1
POWER	10
ENERGY	100
VOLTAGE	100
PFACTOR	10
DIMMING	10
STATE	1
SIGNAL	10
UPTIME	3 600
LOCAL_TIME	3 600
LED_USAGE	3 600
LED_AVERAGE	10
ENERGY_USAGE	100
TIME_USAGE	60
GROUP_CRC	1
ERROR_CNT	1
EVENT_CNT	1
CMD_CNT	1
SMS_CNT	1

Como nota final, de acordo com os dados disponibilizados pelo servidor de rede, tabela 3.14, o número e o tamanho das mensagens conta.

Tabela 3.14: Tempos de envio das mensagens dos nós aos concentradores

Tamanho (B)	Tempo (ms)	Tamanho no Concentrador (B)	Tempo no Concentrador (ms)
0	25,856	13	46,3
8	36,096	21	56,6
16	51,456	29	66,8
32	71,936	45	92,4
48	97,536	61	112,9

Apesar do tempo de envio de uma mensagem não ser proporcional ao tamanho, uma mensagem com um tamanho de 8 B tem um tempo no ar de cerca de metade em relação a uma mensagem de 32 B.



## Capítulo 4

# Análise e discussão dos resultados

### 4.1 Introdução

Para testar a solução proposta, utilizámos dois sistemas de luz diferentes, um no ISCTE-IUL e outro na Arquiled, com uma distância de cerca de 1 km, conforme figura 4.1. Estas luminárias foram registadas na aplicação de gestão da Arquiled, Eccos City, a qual já fazia a gestão das luminárias com comunicação GSM.

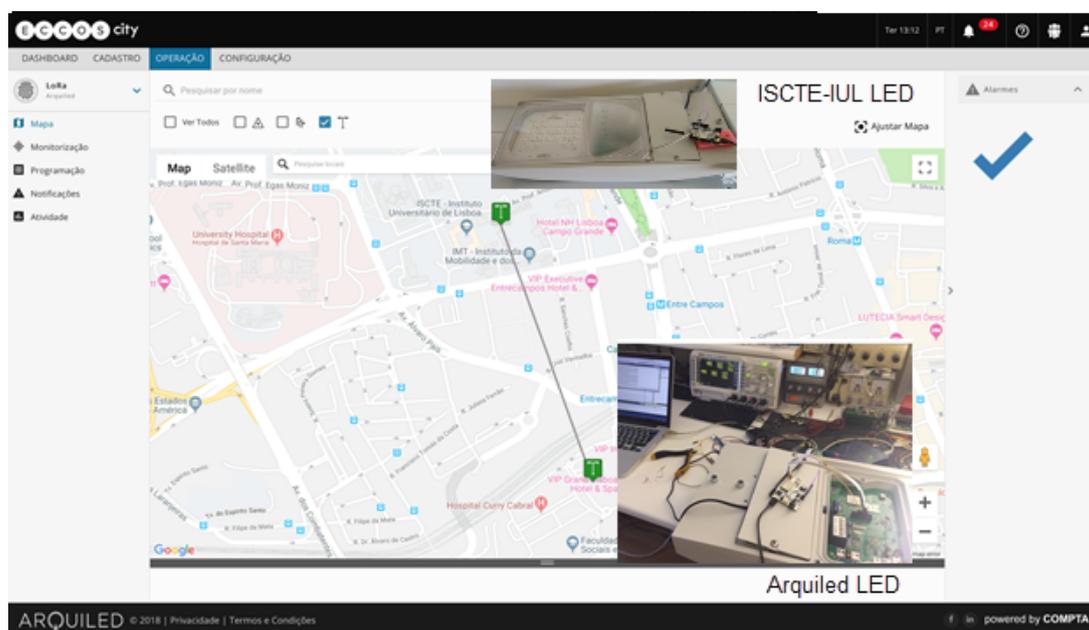


Figura 4.1: Desenvolvimento experimental e ambiente de teste com duas luminárias LED (no ISCTE e no escritório da Arquiled) em operação utilizando dois módulos Arduino Lion, configurados.

Usando o sistema proposto, foi possível simular uma gestão das luminárias com um sistema de produção e comparar as mensagens enviadas e recebidas. Verificou-se que dadas as limitações do ciclo de operação *Duty Cycle*, foi necessário reduzir para metade a frequência de envio das mensagens dos nós quando, por falhas de comunicação, não recebiam um comando ao fim de 6 s – o que fazia com que a luminária enviasse nova mensagem.

## 4.2 Recolha de dados

A recolha de dados para avaliação do sistema foi efetuada através de duas formas: no servidor intermédio, registando num ficheiro *log* de texto todas as mensagens trocadas entre os nós e o servidor aplicacional e vice-versa e no servidor aplicacional, através da base de dados já existente da Arquiled.

O ficheiro de texto com as mensagens trocadas, entre 10 de novembro e 23 de dezembro, tem o seguinte formato indicado na tabela 4.1. Cada entrada tem 4 linhas:

- a 1ª linha com a data e hora do registo;
- a 2ª linha tem um número hexadecimal de 16 algarismos, identificador da placa, seguido da mensagem enviada pela mesma. Na mensagem, o valor hexadecimal de 4 algarismos a seguir à palavra "res=" é um identificador da mensagem enviada pela placa. Este identificador, é um número sequencial atribuído a cada mensagem enviada pela placa, desde que esta foi ligada.
- a 3ª linha deverá ter o mesmo número hexadecimal de 16 algarismos do identificador da placa, seguido da mensagem de resposta do servidor à placa;
- a 4ª linha está em branco.

Tabela 4.1: Exemplo de entradas no ficheiro de registo de mensagens trocadas

```
2018-11-10 16:14:15.357122
F004A30B001A9419 res=007D,06,06,0F
F004A30B001A9419 ArqNET: pol=805,cmd=W

2018-11-10 16:14:21.297416
F004A30B001A9419 res=007E,06,00,0F
F004A30B001A9419 ArqNET: pol=805,cmd=W

...
```

O registo efetuado, permite identificar o seguinte:

1. falhas na comunicação entre a placa e o servidor - as mensagens enviadas pela placa são numeradas, pelo que caso haja uma falha na numeração das mesmas, significa que a mensagem não foi rececionada pelo sistema.
2. falhas na comunicação entre o servidor e a placa - caso uma mensagem de resposta não seja rececionada pela placa, esta volta a enviar uma nova mensagem com 6 ou 12 segundos de intervalo desde a última mensagem enviada. Normalmente, a placa envia mensagens com uma periodicidade de 5 min.

Este processo, todavia, não permite identificar claramente, diferenças entre falhas de receção de mensagens enviadas à placa e mensagens enviadas, mas com atraso. Poderão também existir casos em que a mensagem da placa enviada ao fim de 6 segundos por não receção de resposta do servidor, não tenha sido rececionada pelo sistema.

### 4.3 Comunicações

Analisando o ficheiro de mensagens, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 4.2, para a placa que se encontrava no ISCTE e na tabela 4.3, para a placa que se encontrava na Arquiled.

Tabela 4.2: Mensagens de teste enviadas e respostas recebidas pela placa instalada no ISCTE

Dia	Nº msgs	Nº msgs c/ sucesso	% msgs c/ sucesso	Nº respostas	Nº respostas c/ sucesso	% respostas c/ sucesso
1	444	330	74,3	330	324	98,2
2	583	580	99,5	580	579	99,8
3	403	398	98,8	398	395	99,2
4	570	564	98,9	564	562	99,6
5	16	13	81,2	13	12	92,3
6	224	218	97,3	218	214	98,2
7	118	116	98,3	116	115	99,1
8	592	583	98,5	583	580	99,5
9	582	580	99,7	580	579	99,8
10	583	581	99,7	581	580	99,8
11	584	580	99,3	580	578	99,7
12	587	583	99,3	583	581	99,7
13	596	592	99,3	592	591	99,8
14	582	580	99,7	580	579	99,8
15	583	581	99,7	581	580	99,8
16	584	581	99,5	581	579	99,7
17	583	580	99,5	580	579	99,8
18	587	584	99,5	584	583	99,8
19	582	580	99,7	580	579	99,8
20	584	580	99,3	580	577	99,5
21	584	580	99,3	580	578	99,7
22	600	592	98,7	592	588	99,3
23	586	583	99,5	583	582	99,8
24	582	578	99,3	578	575	99,5
25	587	582	99,1	582	578	99,3
26	582	580	99,7	580	579	99,8
27	484	484	100,0	484	484	100,0
28	94	84	89,4	84	82	97,6
29	88	82	93,2	82	79	96,3
30	576	572	99,3	572	569	99,5
31	596	580	97,3	580	576	99,3
32	284	238	83,8	238	237	99,6

Tendo-se obtido os gráficos das figuras 4.2 e 4.3.

Na tabela 4.4 resumem-se os valores totais obtidos para cada uma das placas.

Os resultados obtidos, em termos de sucesso de comunicação, ficaram aquém do esperado. Uma das hipóteses, poderá ser pelo facto do período de mensagens no arranque ou, quando não recebe resposta do servidor, ser de 6s / 12s, continuamente, o que pode gerar sobrecarga de comunicações. Outra hipótese, poderá ser pelo facto de estarem a decorrer no ISCTE aulas e outros trabalhos com comunicações LoRaWan. Todavia, não foi possível testar estas suposições.

Tabela 4.3: Mensagens de teste enviadas e respostas recebidas pela placa instalada na Arquiled

Dia	Nº msgs	Nº msgs c/ sucesso	% msgs c/ sucesso	Nº respostas	Nº respostas c/ sucesso	% respostas c/ sucesso
1	709	631	89,0	631	603	95,6
2	438	424	96,8	424	414	97,6
3	12	10	83,3	10	9	90,0
4	253	237	93,7	237	228	96,2
5	588	579	98,5	579	575	99,3
6	601	582	96,8	582	575	98,8
7	670	620	92,5	620	601	96,9
8	681	641	94,1	641	629	98,1
9	638	600	94,0	600	583	97,2
10	623	585	93,9	585	572	97,8
11	661	607	91,8	607	584	96,2
12	658	619	94,1	619	604	97,6
13	733	677	92,4	677	660	97,5
14	689	640	92,9	640	627	98,0
15	670	636	94,9	636	626	98,4
16	595	582	97,8	582	576	99,0
17	588	579	98,5	579	573	99,0
18	617	598	96,9	598	592	99,0
19	592	576	97,3	576	567	98,4
20	583	572	98,1	572	566	99,0
21	614	583	95,0	583	570	97,8
22	609	582	95,6	582	570	97,9
23	602	584	97,0	584	575	98,5
24	590	574	97,3	574	564	98,3
25	601	588	97,8	588	582	99,0
26	589	577	98,0	577	571	99,0
27	597	579	97,0	579	567	97,9
28	592	579	97,8	579	572	98,8
29	602	581	96,5	581	570	98,1
30	538	516	95,9	516	502	97,3
31	103	99	96,1	99	98	99,0
32	83	77	92,8	77	74	96,1
33	595	575	96,6	575	568	98,8
34	591	575	97,3	575	568	98,8
35	385	374	97,1	374	367	98,1

Tabela 4.4: Resumo das Mensagens de teste enviadas e respostas recebidas pelas duas placas utilizadas

Placa	Nº msgs	Nº msgs c/ sucesso	% msgs c/ sucesso	Nº respostas	Nº respostas c/ sucesso	% respostas c/ sucesso
ISCTE	15 610	15 319	98,1	15 319	15 253	99,6
Arquiled	18 581	17 807	95,8	17 807	17 479	98,2

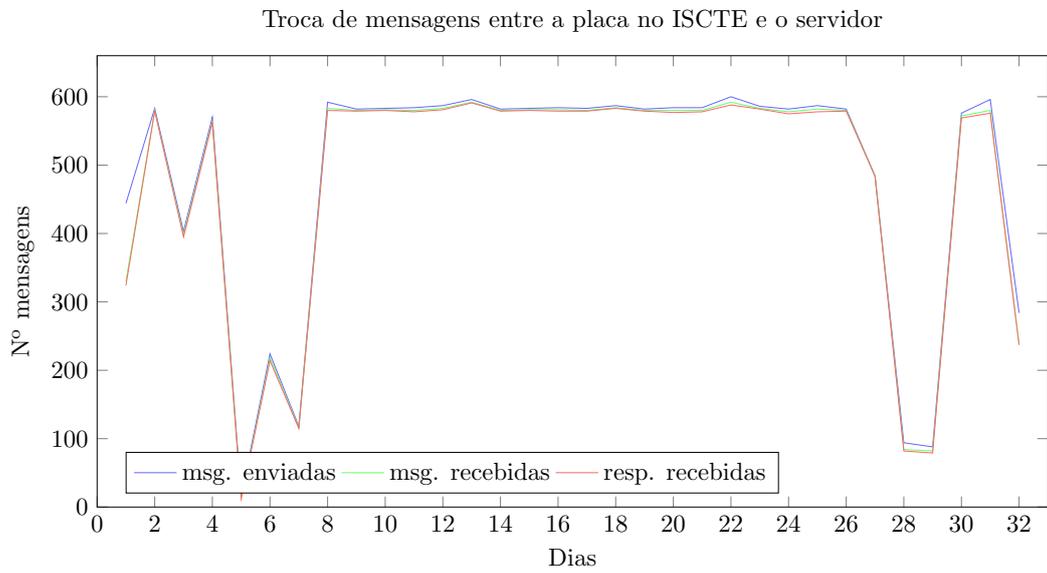


Figura 4.2: Troca de mensagens entre a placa no ISCTE e o servidor

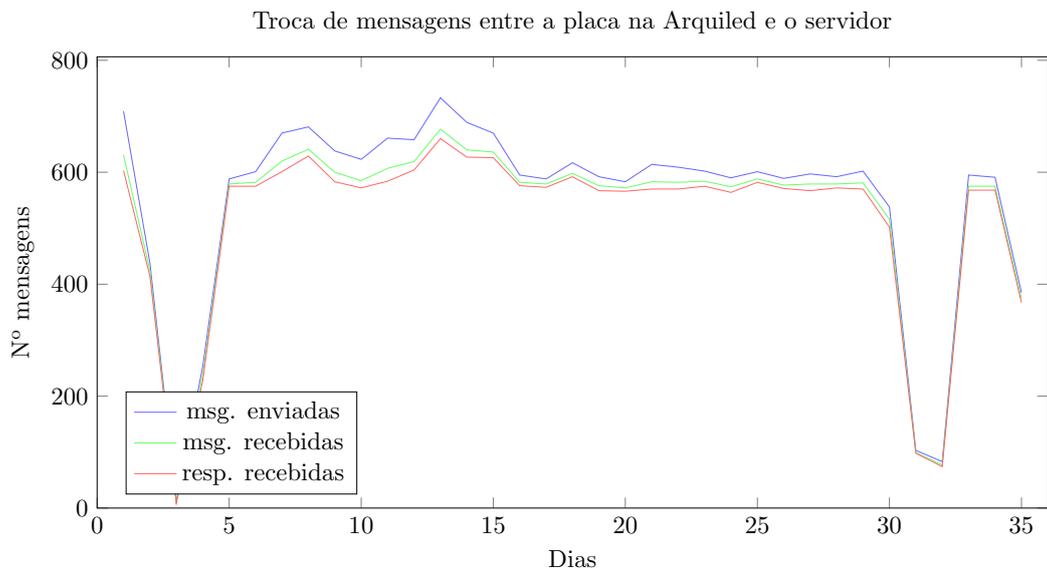


Figura 4.3: Troca de mensagens entre a placa na Arquiled e o servidor

## 4.4 Compressão das mensagens

Analisaram-se os métodos de compressão com os dados de teste tendo-se obtido o resultado apresentado no gráfico da figura 4.4, para mensagens enviadas pela placa e no gráfico da figura 4.5, para as respostas recebidas pela placa.

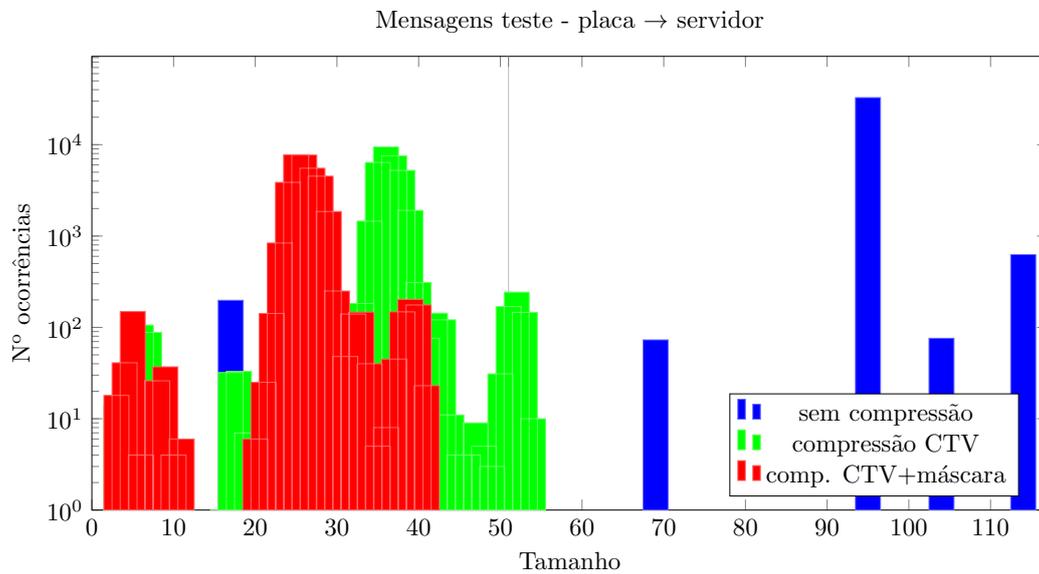


Figura 4.4: Mensagens de teste entre a placa e o servidor

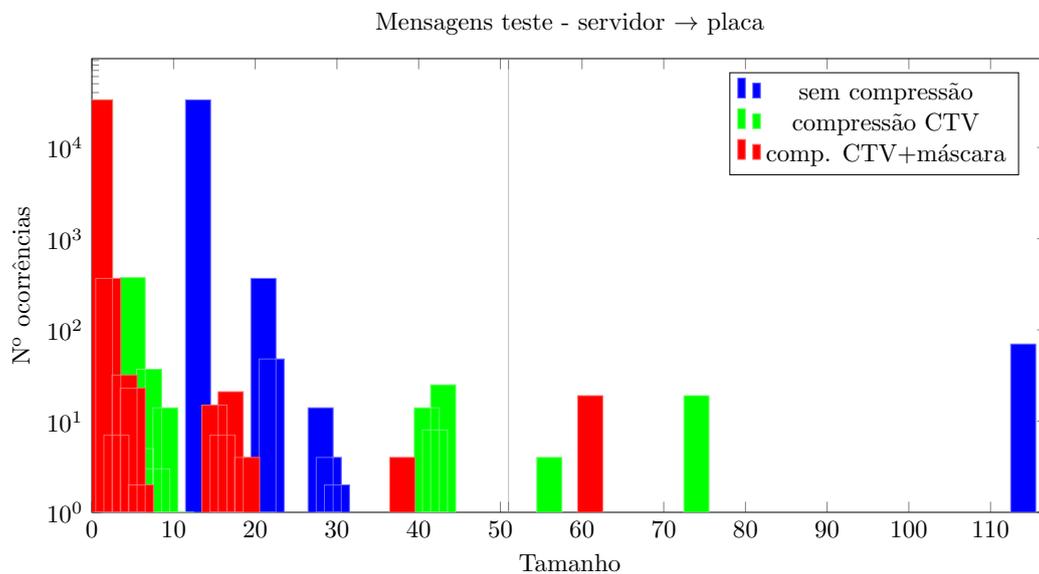


Figura 4.5: Mensagens de teste entre o servidor e a placa

Para o método de compressão 1, apenas com código de tamanho variável (CTV), o objetivo de ter, no máximo, mensagens com 51 B, não foi atingido, quer para as mensagens enviadas pela placa quer para as respostas recebidas pela placa.

Para o método de compressão 2, com máscaras previamente definidas, o objetivo foi atingido nas mensagens enviadas da placa para o servidor mas não na resposta do servidor para a placa. Após a análise das respostas que ficavam com um tamanho superior aos 51 B, verificou-se que a mensagem servia para configurar os agendamentos de ativação / desativação de luz e os testes tinham sido efetuados com valores limite que em casos reais nunca serão alcançados.

No entanto, é possível uma alternativa ao método 2, utilizando o mesmo modelo de máscaras mas convertendo 2 algarismos hexadecimais num B, em vez de utilizar códigos de tamanho variável (CTV).

Já na fase final da elaboração do trabalho, foi possível avaliar os métodos de compressão com dados reais de comunicações de cerca de 300 luminárias durante o período de um ano. Com esses dados reais obtiveram-se também novos códigos CTV. As tabelas 4.5 e 4.6 permitem avaliar o desempenho.

Tabela 4.5: Tamanho médio das mensagens reais entre a placa e o servidor

sem compressão	Compressão máscara+CTV	Compressão máscara+Hex
113,6	(máx. 44) 39,6	(máx. 44) 43,9

Tabela 4.6: Tamanho médio das mensagens reais entre o servidor e placa

sem compressão	Compressão máscara+CTV	Compressão máscara+Hex
13,4	(máx. 45) 1,1	(máx. 49) 1,1

Dos resultados, verifica-se que a compressão com códigos CTV, para as mensagens entre a placa e o servidor, tem um ganho de cerca de 4 B em relação à compressão de 2 algarismos hexadecimais num único B. No entanto, este ganho pode não compensar em complexidade de código de implementação. Qualquer um dos dois métodos tem no máximo 44 B, nunca ultrapassando assim os 51 B.

## 4.5 Redução do número de mensagens e do seu conteúdo

Foi desenvolvida uma aplicação para simular, com os dados reais utilizados no subcapítulo anterior, a minimização da transmissão de dados entre a placa e o servidor. Os resultados dos ganhos estão definidos na tabela 4.7. Para as respostas do servidor à placa, retiraram-se apenas as mensagens de confirmação de receção.

Relativamente às mensagens da placa para o servidor, pode concluir-se que o ganho compensará o acréscimo de complexidade do código. Por outro lado, a eliminação das respostas de confirmação de receção do servidor, permitem uma importante redução de tráfego.

Tabela 4.7: Redução da frequência de mensagens

Tipo de redução	placa - servidor	Servidor - placa
numero de mensagens	60%	98%
conteúdo das mensagens	50%	0%



## Capítulo 5

# Conclusões e recomendações

### 5.1 Principais conclusões

Foi possível atingir os objetivos propostos no início do trabalho, a saber: o desenvolvimento de um protótipo para comunicações LoRaWAN e respetivo software de comunicação do transceptor na luminária e integração com o sistema de gestão já existente da Arquiled.

Foi criada uma solução inteligente analisando dados históricos e informações em tempo real. Além disso, por meio de uma plataforma acessível pela Internet, é possível controlar e gerir um sistema público de iluminação, individualmente ou inserido num grupo de vários pontos de iluminação, bem como adaptar os regimes de economia de acordo com as necessidades do projeto.

Conseguiu-se assim concluir que a integração das novas luminárias com comunicação LoRaWAN se faz de forma transparente para o sistema de gestão já existente, permitindo desta forma a gestão integrada de luminárias com os dois tipos de comunicações.

Concluiu-se também que poderá ser vantajoso em termos de consumo de energia, que neste caso não era relevante, e tráfego, a análise dos valores dos sensores por forma a não comunicar valores redundantes ou com alterações não significativas.

### 5.2 Contributos para a comunidade científica e empresarial

#### 5.2.1 Implicações ao nível académico

O presente trabalho apresenta uma colaboração entre uma empresa e o ISCTE-IUL para o desenvolvimento de novos produtos na área de sistema de informação e comunicação da Internet das Coisas.

Para além da prova de conceito que resultou no final, foi possível ter um caso prático para avaliação de resultados e para encontrar, na prática, formas de ultrapassar questões que foram surgindo.

Conseguiu-se também obter resultados simultaneamente para poupança de energia que apesar de não ter utilidade neste trabalho, eventualmente, poderá ter para outros e para minimização de troca de

mensagens.

### **5.2.2 Implicações ao nível empresarial**

Este projeto permitiu também à Arquiled adquirir novas competências em comunicações LoRaWAN, nomeadamente, em operadores de gestão de servidores de redes, fabricantes de placas de comunicação e limitações do sistema. Com base nesses conhecimentos, foi possível desenvolver um produto final que integra a sua gama de soluções de iluminação, respondendo às necessidades de mercado.

A empresa divulgou recentemente (Arquiled, 2019) que já iniciou, a sua primeira instalação de um sistema de iluminação com comunicações LoRaWAN, prevendo instalar cerca de 14 000 luminárias no município de Tomar (Baptista, 2019; SAPO, 2019).

### **5.3 Limitações do estudo**

Uma das limitações foi o número reduzido de dispositivos para testes de avaliação da carga da rede não permitindo uma avaliação real do comportamento do sistema, nesses casos.

### **5.4 Propostas de investigação futura**

Para trabalhos futuros apresentam-se as seguintes propostas:

1. avaliação real do impacto e desempenho da rede LoRa à medida que vão sendo adicionados nós à rede;
2. formas de atualização remota, devido ao impacto financeiro que as atualizações no local podem ter dada a grande escala de dispositivos que este tipo de instalações tem. Neste tipo de redes, existem limitações à atualização do software, quer do *firmware* do módulo LoRa quer do software nas camadas superiores mas que por vezes são imperativas por deteção de falhas que podem comprometer a integridade e segurança do sistema;
3. formas de normalizar os dados e a comunicação deste tipo de equipamentos, bem como o software de gestão por forma a que o cliente final possa integrar facilmente sistemas de vários operadores.

# Bibliografia

- Abrantes, S. A. (n.d.). Introdução ao espalhamento espectral (“Spread Spectrum”). Apontamentos.
- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., and Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications magazine*, 55(9):34–40.
- Araujo Soto, V. E. (2017). Performance evaluation of scalable and distributed iot platforms for smart regions. Master’s thesis, Luleå University of Technology, Computer Science.
- Arduino (2019). Language reference. <https://www.arduino.cc/reference/en/>. Acedido em: 2019-10-01.
- Arquiled (2018a). Arquicity R1 Efficiency.
- Arquiled (2018b). Eccos City.
- Arquiled (2019). Arquiled equipa concelho de Tomar com luminárias inteligentes conectadas por lorawan. <https://www.arquiled.com/antena-1-dedica-um-segmen-to-do-programa-portugal-em-direto-ao-novo-sistema-inteligente-de-iluminacao-publica-de-tomar/>. Acedido em: 2019-10-30.
- Bankov, D., Khorov, E., and Lyakhov, A. (2016). On the limits of LoRaWAN channel access. In *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, pages 10–14. IEEE.
- Baptista, J. (2019). Projeto pioneiro - Tomar com iluminação pública inteligente. <https://maisribatejo.pt/2019/06/18/projeto-pioneiro-tomar-com-iluminacao-publica-inteligente/>. Acedido em: 2019-10-30.
- Bouguera, T., Diouris, J.-F., Chaillout, J.-J., Jaouadi, R., and Andrieux, G. (2018). Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN. *Sensors*, 18(7):2104.
- Casals, L., Mir, B., Vidal, R., and Gomez, C. (2017). Modeling the energy performance of LoRaWAN. *Sensors*, 17(10):2364.
- Committee, L. A. T. (2017). *LoRaWAN™ 1.1 Specification*. LoRa Alliance, 1.1 edition.
- Design and Reuse (2012). Semtech acquires wireless long range ip provider Cycleo. <https://www.design-reuse.com/news/28706/semtech-cycleo-acquisition.html>. Acedido em: 2019-10-01.

- Eletronica, A. (2016). *ASME Lion - User Guide*. Axel Eletronica, 1.3 edition.
- Fotios, S. and Castleton, H. (2016). Specifying enough light to feel reassured on pedestrian footpaths. *LEUKOS*, 12(4):235–243.
- Institute, E. T. S. (2017). Short range devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz. Technical report, ETSI - European Telecommunications Standards Institute 2017.
- Lux (2018). Major study finds lighting cut crime by 39%. <https://luxreview.com/article/2018/03/major-study-finds-lighting-cut-crime-by-39->. Acedido em: 2019-10-30.
- Mathur, S., Sankar, A., Prasan, P., and Iannucci, B. (2017). Energy analysis of LoRaWAN technology for traffic sensing applications. In *Intelligent Transportation Systems (ITS) World Congress*.
- Parekar, S. R. and Dongre, M. M. (2015). An intelligent system for monitoring and controlling of street light using gsm technology. In *Information Processing (ICIP), 2015 International Conference on*, pages 604–609. IEEE.
- Pascual Pelayo, I. J. (2018). Smart city lighting in the city of stockholm. Master's thesis, KTH, Network and Systems engineering.
- Pop, A.-I., Raza, U., Kulkarni, P., and Sooriyabandara, M. (2017). Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks? In *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6. IEEE.
- Raza, U., Kulkarni, P., and Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):855–873.
- Rochol, J. (2018). *Sistemas de Comunicação sem Fio: Conceitos e Aplicações*. Bookman Editora.
- Salomon, D. and Motta, G. (2010). *Handbook of data compression*. Springer Science & Business Media.
- SAPO (2019). E se a iluminação inteligente alertasse para cheias? a aposta é de uma empresa 100% portuguesa. <https://tek.sapo.pt/noticias/computadores/artigos/e-se-a-iluminacao-inteligente-alertasse-para-cheias-a-aposta-e-de-uma-empresa-100-portuguesa>. Acedido em: 2019-10-30.
- Semtech (2015). LoRa modulation basics. Technical report, Semtech.
- S.p.A., T. C. (2009). *GE864 Hardware User Guide*. Telit Communications S.p.A., 1vv0300694 rev.11 edition.
- Sri Kantha, J. (2015). Smart city street lighting system: An engineering internship at eco-fx led. Technical report, Murdoch University.
- Union, I. T. (n.d.). Industrial scientific and medical (ISM) bands. <https://www.itu.int/net/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>. Acedido em: 2019-10-01.

- Vannieuwenborg, F., Verbrugge, S., and Colle, D. (2018). Choosing IoT-connectivity? A guiding methodology based on functional characteristics and economic considerations. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 29(5):e3308. e3308 ETT-17-0322.R1.
- Workgroup, L. A. T. C. R. P. (2018). *LoRaWAN 1.1 - Regional Parameters*. LoRa Alliance, Inc., b edition.
- Workgroup, T. M. (2015). A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. Technical Report 1.0, LoRa Alliance.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., and Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1):22–32.

