

Eficiência Energética e Manutenção Preventiva
na Gestão de Iluminação Pública
Diogo José Barbosa Nunes

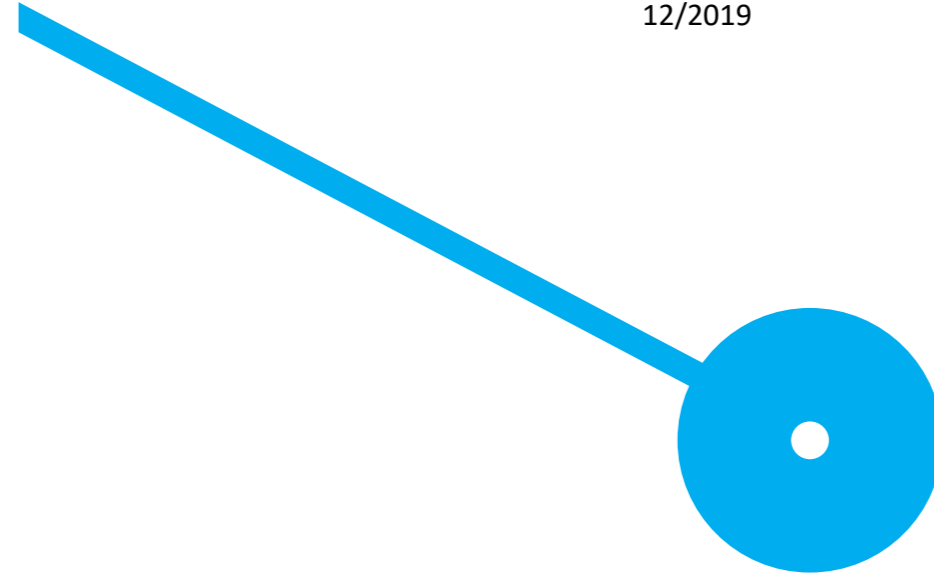
12/2019

Diogo José Barbosa Nunes. Eficiência Energética e Manutenção Preventiva na Gestão
de Iluminação Pública

Eficiência Energética e Manutenção Preventiva na Gestão de Iluminação Pública

Diogo José Barbosa Nunes

12/2019



Agradecimentos

Gostaria neste espaço de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradecer de forma muito particular e especial ao Professor Davide Carneiro por todo auxílio e trabalho de orientação prestado ao longo de toda a dissertação. Não esquecendo, e agradecendo a todos os professores do Mestrado de Engenharia Informática da ESTG por toda a sua ajuda e colaboração ao longo desta etapa.

Agradecer igualmente à minha família, amigos e companheiros de caminhada por todo o apoio e ajuda fundamental ao longo desta etapa de forma a conseguir alcançar a meta.

A todos um MUITO OBRIGADO!

Resumo

Atualmente, a iluminação pública é essencial numa cidade, sendo importante para assegurar a segurança e conforto dos cidadãos (motoristas ou pedestres) nos períodos noturnos. Isso implica a existência de uma grande rede de iluminação artificial e conseqüentemente um elevado consumo de energia, sendo a iluminação pública responsável por cerca de 3% do consumo total de energia em Portugal. Um dos problemas da maioria dos sistemas de iluminação pública existentes é o uso de tecnologia antiquada, sendo uma solução a implementação de tecnologias e sistemas de iluminação mais modernos e mais eficientes.

É necessário encontrar e desenvolver soluções que permitam tornar as infraestruturas de iluminação pública mais eficientes, este trabalho propõe o estudo e revisão de soluções e abordagens praticadas atualmente, propondo assim uma abordagem que permite obter uma maior eficiência na iluminação e, conseqüentemente, uma diminuição dos custos.

A solução desenvolvida ao longo desta dissertação tem em consideração as características operacionais de cada luminária, permitindo a deteção de falhas na operação das mesmas (manutenção preventiva) e o controlo e otimização do fluxo luminoso através de um sensor de luminosidade. Neste trabalho foram utilizados dados reais de uma rede de iluminação pública, provenientes de luminárias equipadas com tecnologia LED.

Palavras-chave: Iluminação Pública, Manutenção Preventiva, Tecnologia LED, Otimização fluxo luminoso, eficiência energética

Abstract

Nowadays, public street lightning is essential in a city, to ensure the safety and comfort of citizens (drivers and pedestrians) at night. This implies the existence of a large artificial lightning network and consequently a high energy consumption, being responsible for about 3% of total energy consumption in Portugal. A problem in most of the existing street lighting systems is the use of outdated technology and one solution is the implementation of more modern and efficient lighting technologies and systems.

It's necessary to find and develop solutions that allow the public lightning infrastructure to become more efficient, this work proposes the study and review of current solutions and approaches, proposing an approach to achieve greater lighting efficiency and, consequently, lower costs.

The solution developed throughout the dissertation takes into consideration the operational characteristics of each luminaire, and allows the detection of failures in their operation(preventive maintenance) and the control and optimization of the luminous flux through a luminosity sensor. In this dissertation we use real data from a street lighting network of luminaires equipped with LED technology.

Keywords: Public Street Lighting, LED technology, Preventive Maintenance, LED Technology, Luminous Flux Optimization, Energy Efficiency

Conteúdo

1	Introdução	13
1.1	Projeto 3SLM - <i>Smart System for Street Lighting Management</i>	17
1.2	Objetivos da dissertação	18
1.3	Organização do documento	18
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Métodos e Tipos de iluminação	20
2.1.1	Luminárias	20
2.1.2	Tipos de Fontes de iluminação	22
2.2	Iluminação Pública em Portugal	28
2.2.1	Consumo energético da Iluminação pública em Portugal	29
2.3	Medidas e Planos que visam melhorar o consumo de energia	31
2.3.1	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE)	32
2.3.2	Fundo de Eficiência Energética (FEE)	33
2.3.3	Estratégia 20-20-20	33
2.3.4	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica (PPEC)	33

2.3.5	Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC)	35
2.4	Projetos de infraestruturas Iluminação Pública eficientes	36
2.4.1	Portugal	36
2.4.2	Projetos Europeus	38
2.5	Regulamentação/Legislação Iluminação Pública	40
2.6	Manutenção	41
2.7	Conceitos	41
3	Estado da arte	46
3.1	Métodos e sistemas de controlo de Iluminação Pública	48
3.1.1	Sistemas ON/OFF (Sistemas Rudimentares)	49
3.1.2	Sistemas Autónomos Inteligentes	50
3.2	Casos de estudo	51
4	Trabalho Desenvolvido	58
4.1	Aquisição dos dados	59
4.2	Análise Exploratória	61
4.3	Análise e Previsão de parâmetros de operação	66
4.4	Manutenção preventiva	67
4.4.1	Categorização dos Dados	68
4.4.2	Treino dos Modelos	70
4.4.3	Resultados e Ferramentas	73

4.5	Otimização do fluxo luminoso	77
4.5.1	Recolha dos dados	78
4.5.2	Desenvolvimento do modelo	79
4.5.3	Teste do modelo	83
4.6	Resultados científicos	86
5	Conclusão e trabalho futuro	88

Lista de Figuras

1	Arquiled ARQUICITY R1. Fonte: [1]	17
2	Representação de uma luminária eficiente (esquerda) e de uma luminária ineficiente (direita)	22
3	Esquema com os tipos de lâmpadas	23
4	Tipos de fontes de luz utilizadas na iluminação pública (em percentagem). Fonte: [2]	29
5	Consumo de energia elétrica por tipo em Portugal (em percentagem)	30
6	Consumo de energia (em kWh) da iluminação pública por ano em Portugal	30
7	Estimativa do consumo de energia evitado ao longo dos anos, PPEC 2013-2014. Fonte: [3]	34
8	Metas energia e clima de Portugal para o horizonte 2030. Fonte: [4]	35
9	Iluminância. Fonte: [5]	43
10	Luminância. Fonte: [5]	43
11	Variação da temperatura de cor. Fonte: [2]	44
12	<i>Workflow</i> das abordagens apresentadas em [6,7]. Fonte: [6]	55
13	<i>Workflow</i> da abordagem apresentada em [8]. Fonte: [8]	56

14	Exemplo estrutura dos dados antes da transformação (cima) e exemplo da estrutura dos dados depois da transformação (baixo).	61
15	Dados recolhidos das luminárias (esquerda) e dados meteorológicos (direita). .	62
16	Distribuição da variável <i>power</i> em 47 das luminárias (15%, selecionadas aleatoriamente) ao longo dos 4 meses de recolha de dados (os <i>outliers</i> foram removidos para maior clareza).	62
17	Distribuição da temperatura de trabalho de 65 luminárias (21%, selecionadas aleatoriamente) ao longo dos 4 meses de recolha de dados (os <i>outliers</i> foram removidos para maior clareza).	63
18	<i>Heatmap</i> que mostra a relação entre <i>dimming</i> , temperatura de trabalho e consumo de energia.	64
19	Gráfico de dispersão da temperatura ambiente (°C) em relação com temperatura de operação da luminária (°C).	64
20	Consumo de energia das duas luminárias da configuração de testes, localizadas na nossa escola, das três noites entre 3 e 6 de maio de 2018, respectivamente da esquerda para a direita.	65
21	Distribuição do consumo de energia durante uma semana, entre maio, para as duas luminárias no cenário de teste.	65
22	Importância relativa de cada uma das variáveis na previsão do consumo de energia.	66
23	Importância relativa de cada uma das variáveis na previsão da temperatura de operação da luminária.	67
24	Exemplo do método <i>K-Fold Cross Validation</i> , com $K=3$	71
25	Importância relativa de cada variável nos modelos baseado em regras (esquerda) e iqr (direita).	73

26	Concordância das previsões de ambos os modelos: os quadrantes de concordância contêm 95,71% das instâncias.	74
27	Exemplo de informação presente na <i>dashboard</i> , como exemplo gráfico de previsão de temperatura ou informação da temperatura funcionamento em comparação à temperatura ambiente.	76
28	Exemplo de informação presente na <i>dashboard</i> , como exemplo informação relacionada com a detecção de falhas na operação das luminárias.	76
29	Exemplo de resposta do serviço online por parte dos modelos.	77
30	Esquema do posicionamento dos sensores de luminosidade na recolha de dados.	79
31	Distribuição da luminosidade medida por baixo da luminária por percentagem de <i>dimming</i>	80
32	Variação da luminosidade ao longo de três noites diferentes, escolhidas aleatoriamente.	80
33	Importância relativa de cada variável do modelo de previsão de luminosidade.	81
34	Diferentes previsões do modelo para um valor de luminosidade ao longo de uma noite, selecionada aleatoriamente.	82
35	Exemplo de resposta do serviço online por parte dos modelo.	83
36	Distribuição gráfica dos dados e as retas de equação dos modelos, modelo regressão linear (à esquerda) e o modelo regressão quadrática (à direita).	84
37	Comparação dos valores de potência (MW) real recolhida com o valor previsto.	86

Lista de Tabelas

1	Características luminária Arquiled ARQUICITY R1. Fonte: [1]	18
2	Comparação dos diferentes tipos de lâmpadas.	28
3	Dados relacionados com o projeto de renovação na cidade de Águeda. Fonte: [9]	37
4	Factos do projeto no Município de Bad Schallerbach, Áustria. Fonte: [10]	39
5	Factos do projeto Cidade de Santander, Espanha. Fonte: [10]	40
6	Comparação sistemas de controlo e gestão iluminação pública.	51
7	Resultados da análise das abordagens e dos cenários realizados no caso de estudo [11]	57
8	Diferenças entre o consumo das duas luminárias (em Watt-Hora) na configuração de teste.	65
9	Métricas de <i>Cross validation</i> para cada modelo.	72
10	Métricas de validação do modelo de previsão de luminosidade.	82

Lista de abreviaturas e símbolos

LPS	<i>Low Pressure Sodium</i> , Lâmpadas de Vapor de Sódio de Baixa Pressão
HPS	<i>High Pressure Sodium</i> , Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão
HPM	<i>High Pressure Mercury Lamp</i> , Lâmpadas Vapor de Mercúrio
LED	<i>Lighting Emitted Diode</i> , Díodo emissor de luz
W	Watt
MW	<i>MegaWatt</i>
UE	União Europeia
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
FEE	Fundo de Eficiência Energética
PPEC	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
IRC	Índice de Reprodução de Cor
FM	Fator de Manutenção
FMLL	Fator de Manutenção da Luminosidade da Lâmpada
FSL	Fator de Sobrevivência da Lâmpada
FML	Fator de Manutenção da Luminária
LOR	<i>Light Output Ratio</i> , Rácio de Saída do Fluxo Luminoso
EMS	<i>Energy Management Systems</i> , Sistemas de Gestão de Energia
DSS	<i>Decision Support System</i> , Sistema de Suporte à Decisão
DRF	<i>Distributed Random Forest</i>
GBM	<i>Gradient Boosting Machine</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
IQR	<i>Interquartile Range</i> , Intervalo Interquartil

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos fatores como o aquecimento global têm estado na ordem de trabalhos das grandes organizações mundiais. A União Europeia, não indiferente às alterações climáticas resultantes do aquecimento global, em conjunto com os seus estados membros, tem procurado encontrar soluções para todos os problemas com o objetivo de limitar essas mesmas alterações climáticas. Um tópico muito relevante e precioso no combate aos desafios impostos é a eficiência energética, visto que procura aumentar a segurança no abastecimento energético, reduzir o consumo de energia, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa proveniente do uso energético e reduzir os custos associados ao uso de energia contribuindo dessa forma para atenuar o efeito das alterações climáticas.

Um setor com grande consumo de energia e onde é necessário aumentar a eficiência energética é o setor da Iluminação Pública. A Iluminação Pública faz parte do nosso quotidiano, sendo um fator determinante na nossa qualidade de vida, assumindo um papel preponderante no desenvolvimento social e económico das populações. A Iluminação Pública pode ser definida como a iluminação artificial das ruas quando a luz natural ultrapassa o limite mínimo desejado. Este é um serviço público que oferece mais conforto e segurança aos cidadãos permitindo-lhes desfrutar plenamente dos espaços públicos mesmo em períodos noturnos.

No entanto, tudo isto implica uma grande rede de iluminação artificial, sendo a Iluminação Pública responsável por 3% do consumo total de energia gasta em Portugal, representando assim uma percentagem significativa dos gastos dos vários municípios em energia. Um dos problemas da maioria dos sistemas de iluminação pública existentes é o uso de tecnologia antiquada. A implementação de tecnologias e sistemas de iluminação mais modernos e mais

eficientes apresenta-se como uma solução importante para a redução do consumo de energia e conseqüente redução dos custos e das emissões de CO₂ relacionadas com esse mesmo consumo. Atualmente, uma solução bastante aplicada passa pela substituição das luminárias convencionais baseadas em lâmpadas de sódio de alta pressão (HPS) por luminárias LED, permitindo esta alteração economias significativas, no entanto, é possível aumentar ainda mais a eficiência.

Tendo em consideração todos estes problemas a União Europeia tem procurado implementar medidas e estratégias com o objetivo de colmatar esses problemas de forma a que seja possível atingir uma maior eficiência energética. É nesta ótica que surgem estratégias propostas pela União Europeia como a "Estratégia 20-20-20", cujos objetivos são reduzir 20% o consumo de energia, reduzir 20% das emissões de gases com efeito de estufa e que 20% da energia consumida seja de fonte renovável. Em Portugal foram também definidas estratégias e metas a atingir, como por exemplo o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) que define, entre outras áreas, um conjunto de medidas de eficiência energética para uma iluminação pública eficiente.

Deste modo, torna-se necessário agir de modo a diminuir o consumo e os gastos relacionados com a iluminação pública, de forma a aumentar a sustentabilidade energética. Posto isto, é necessário encontrar e desenvolver soluções que permitam tornar as infraestruturas de iluminação pública mais eficientes, sem colocar em causa a segurança e o conforto dos cidadãos.

Neste sentido, este trabalho propõe o estudo e revisão de soluções e abordagens praticadas atualmente, propondo uma abordagem que permite obter uma maior eficiência na iluminação e, conseqüentemente, uma diminuição dos custos associados, permitindo assim facilitar a monitorização da iluminação. O trabalho desenvolvido ao longo da dissertação está inserido no projeto 3SLM - *Smart System for Street Lighting Management*, projeto este que tem por base a utilização de luminárias equipadas com tecnologia LED.

Numa fase inicial da dissertação e com o objetivo de perceber e obter mais conhecimento sobre a temática do mesmo, foi realizada uma revisão da literatura por forma a explorar e obter conhecimento sobre a temática da mesma. Ao longo de todo o documento é apresentada pelos vários capítulos toda a revisão de literatura realizada. Exploramos os principais conceitos luminotécnicos, as principais fontes de iluminação artificial e ainda alguns tópicos como o panorama nacional de consumo de energia, onde foi possível concluir que a iluminação pública

ocupa uma grande fatia do total de consumo, com cerca de 3% do consumo total de energia. Com esta revisão foi possível perceber que existem planos e estratégias, tanto a nível nacional como europeu, para atingir metas e solucionar problemas rumo à sustentabilidade.

Após a análise inicial que permitiu a obtenção de algum conhecimento, e uma vez que pretendíamos apresentar uma solução que permitisse a utilização de energia de uma forma mais eficiente, decidimos aprofundar ainda mais a nossa revisão, através da revisão de literatura relacionada com soluções de controlo e monitorização da iluminação pública. Nesta revisão, numa primeira fase foi possível identificar e conhecer os diferentes tipos de métodos e sistemas que permitem este controlo e monitorização, podendo os mesmos ser divididos em duas categorias: os sistemas mais simples, ou seja, sistemas “sem inteligência” e os sistemas autónomos inteligentes. Os primeiros sistemas permitem o controlo da iluminação tendo por base parâmetros predefinidos, e sendo assim não permitem um grande controlo sobre a mesma, sendo exemplos destes sistemas os relógios astronómicos e os sensores crepusculares. Já os sistemas autónomos inteligentes permitem o controlo total da rede de iluminação permitindo assim maximizar a performance e a eficiência da rede, um exemplo deste tipo de sistemas são os sistemas de telegestão.

Tendo em consideração os diferentes sistemas existentes identificados na primeira fase da revisão, fizemos uma revisão sobre soluções e abordagens que foram desenhadas e desenvolvidas noutros projetos e estudos. Através desta revisão foi possível verificar que existe uma grande variedade de estudos nesta área permitindo-nos concluir que a implementação de sistemas de controlo e monitorização de redes de iluminação é bastante benéfico. Desta revisão da literatura, dos estudos e projetos recolhidos e analisados além da conclusão esperada apresentada anteriormente foram retiradas duas outras conclusões: a primeira é que a abordagem que possui mais benefícios é o desenvolvimento de um sistema de controlo e monitorização utilizando sensores de luminosidade e de deteção de movimento (esta e outras abordagens são explicadas em mais detalhe na secção de revisão do estado da arte). A segunda conclusão que foi possível retirar é que todos os estudos e projetos apresentam soluções globais, ou seja, soluções em que todas as luminárias da rede são geridas de forma igual. No entanto, na nossa visão acreditamos que é possível aumentar a eficiência das luminárias através de uma gestão individual das mesmas, tendo em conta as suas características e o meio em que estão inseridas, ou seja, ajustar a iluminação artificial individualmente por luminária.

Posto isto, desenhamos e desenvolvemos uma solução para gestão de iluminação pública

tendo por base as características individuais das luminárias, tendo sempre em consideração a segurança e conforto dos cidadãos bem como as normas e regulamentação existente. A solução que apresentamos é um sistema de gestão de iluminação pública capaz de:

- Recolher dados em tempo real do funcionamento das luminárias;
- Monitorizar e prever o consumo de energia de cada luminária;
- Ligar e/ou desligar a rede de iluminação de forma autónoma tendo em consideração a iluminação ambiente (possível através da utilização de um sensor de luminosidade);
- Controlar o fluxo luminoso, *dimming*, das luminárias tendo em consideração a iluminação ambiente (possível através da utilização de um sensor de luminosidade);
- Detetar falhas nas luminárias.

Com a solução desenhada, foi altura do desenvolvimento prático da mesma, no qual subdividimos o trabalho em duas grandes partes:

Deteção do normal funcionamento das luminárias (manutenção preventiva): nesta fase do trabalho o objetivo passou por tentar identificar falhas no funcionamento das luminárias, para tal foi necessário saber qual o normal funcionamento das mesmas. Para esta parte, desenvolvemos duas abordagens, uma com base em regras e nos valores normativos das variáveis relacionadas com a operação das luminárias e outra tendo por base as características individuais de operação das luminárias calculando o seu normal funcionamento através do cálculo do intervalo interquartil (IQR, do inglês *Interquartile Range*).

Otimização do fluxo luminoso: Com a revisão do estado de arte ficou comprovado que uma abordagem de regulação do fluxo luminoso através da utilização de sensores em luminárias possui diversas vantagens para otimização do consumo. Assim, pensamos numa abordagem utilizando sensores de luminosidade nas luminárias com o objetivo de otimizar o fluxo luminoso da iluminação pública durante os períodos noturnos. O objetivo desta fase do estudo era então otimizar o fluxo luminoso, *dimming*, tendo em consideração a luminosidade ambiente e o limite mínimo de luminosidade possível. Os resultados desta fase da dissertação permitiram uma poupança de cerca de 28%.

1.1 Projeto 3SLM - *Smart System for Street Lighting Management*

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação está inserido no projeto 3SLM - *Smart System for Street Lighting Management*, com a referência FCT: C474975759-00069629. Este projeto foi desenvolvido numa parceria entre as organizações Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico do Porto, Compta - Emerging Business, S.A., Porto e INESC TEC, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência, Porto.

Este projeto tem por base a utilização de luminárias equipadas com tecnologia LED. Esta é uma tecnologia que tem vindo a transformar as redes de iluminação pública uma vez que possui muitos benefícios para a eficiência energética. Além de um menor consumo de energia, entre outras vantagens esta tecnologia permite a variação de intensidade e um maior tempo de vida útil, além disso permitem ainda a recolha dos dados de operação em tempo real. Todos estes fatores, aumentam os possíveis casos de uso e aplicações para redes de iluminação pública que abrem caminho para um consumo eficiente de energia.

Os dados utilizados neste projeto foram recolhidos de uma rede de 305 luminárias, equipadas com a tecnologia LED, fabricadas pela Arquiled, mais especificamente o Modelo ARQUICITY R1, de uma rede de iluminação pública localizada num município português, Cascais. As ARQUICITY R1 foram projetadas com o objetivo de permitir poupança e possuem uma eficiência luminosa até 163 lm/W [1]. As características deste tipo de modelo de luminária são apresentadas na tabela 1.

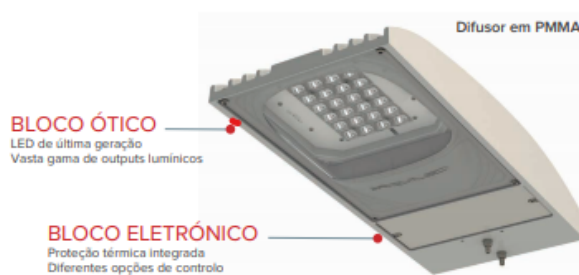


Figura 1: Arquiled ARQUICITY R1. Fonte: [1]

Características Luminária ARQUICITY R1	
Marca	Arquiled
Modelo	ARQUICITY
Tipo	R1
Potência	7 - 127 W
Iluminância - Fluxo luminoso	1073 - 15502 lm
Expectativa de vida útil (horas)	100 000
Manutenção de fluxo às 100 000h	80% (Segundo a norma IES LM-80 - TM-21)
Eficiência Luminosa	Até 163 lm/W
Temperatura cor	3 000 K - 4 000 K
Índice de Reprodução de Cor (IRC)	≥ 70

Tabela 1: Características luminária Arquiled ARQUICITY R1. Fonte: [1]

1.2 Objetivos da dissertação

O âmbito desta dissertação centra-se em estudar e explorar soluções que possibilitem melhorar a eficiência energética e que apresentem benefícios no controlo e monitorização da iluminação pública. O desenvolvimento desta dissertação tem em consideração os seguintes objetivos definidos:

- Análise e revisão do estado da arte;
- Análise e estudo de abordagens que possam contribuir para o domínio do consumo energético;
- Compreender as características operacionais de cada luminária e como elas afetam o seu tempo de vida e o consumo energético;
- Desenvolvimento de sistemas e modelos que permitam a gestão de manutenção e a gestão inteligente da intensidade luminosa;
- Validação e avaliação da performance dos modelos desenvolvidos;
- Preparação e escrita de documentos científicos.

1.3 Organização do documento

Este documento encontra-se subdividido em 5 Capítulos, sendo presente neste capítulo uma introdução do trabalho desenvolvido, no qual é apresentada a relevância do tema em estudo, bem como os principais objetivos e um enquadramento de todo o trabalho.

O **capítulo 1** diz respeito à introdução do trabalho, no qual é exposta a relevância do tema, bem como todo o enquadramento da dissertação e os objetivos a alcançar.

No **capítulo 2**, é analisado o panorama do consumo de energia da iluminação pública em Portugal, sendo apresentados alguns casos de sucesso de infraestruturas eficientes e ainda alguns planos e estratégias para melhoria da eficiência energética. Neste capítulo são ainda abordados os principais conceitos luminotécnicos e é feita uma comparação de algumas das fontes de luz existentes. É também abordada a tecnologia LED referindo as suas principais características e benefícios.

No **capítulo 3** é apresentada uma revisão do estado da arte, onde são apresentados diferentes casos de estudo de soluções para iluminação pública. São ainda apresentados e explicados os principais sistemas de controlo e gestão de iluminação pública.

O **capítulo 4** diz respeito ao trabalho desenvolvido, sendo partilhado e explicado todo o conhecimento obtido e todo trabalho desenvolvido ao longo da dissertação.

Por fim, no **capítulo 5**, são apresentadas as principais conclusões e melhorias que podem ser implementadas como trabalho futuro de forma a melhorar o trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

A iluminação pública é um componente essencial para o desenvolvimento social e económico da sociedade e para o ambiente de uma cidade, sendo importante na qualidade de vida dos cidadãos, assegurando o seu conforto durante os períodos noturnos e a sua segurança.

Ao longo desta secção vai ser explorado o tema iluminação pública sendo abordados diversos temas relacionados com o mesmo.

2.1 Métodos e Tipos de iluminação

2.1.1 Luminárias

As luminárias são aparelhos utilizados para fixar e proteger uma ou mais lâmpadas, tendo como principal objetivo assegurar a distribuição da luz, fluxo luminoso, emitida pelas lâmpadas com o melhor rendimento possível otimizando assim a sua utilização. As luminárias devem ainda garantir o conforto e segurança dos cidadãos, sejam eles condutores ou pedestres, prevenindo por exemplo encandeamentos e devem como indicado anteriormente assegurar a proteção das lâmpadas face às condições climatéricas.

Uma luminária para além de sustentar a fonte de luz deve [2]:

- Dirigir o fluxo luminoso, assegurando conforto visual com eficiência máxima;
- Prevenir encandeamentos;

- Satisfazer as especificações elétricas e mecânicas que garantam a segurança e o bom funcionamento;
- Proteger os dispositivos elétricos e óticos, bem como a fonte luminosa, das possíveis agressões exteriores, nomeadamente atmosféricas;
- Promover a dissipação de calor.

Na escolha de um determinado tipo de luminária deverão ser levados em consideração alguns aspetos relacionados com o plano técnico e económico.

No plano técnico, ponderar sobre [2]:

- Tecnologia e potência da fonte de luz;
- Rendimento luminoso;
- Natureza do dispositivo ótico;
- Resistência ao aquecimento, sujidade, corrosão, vibrações, clima;
- Dispositivo de fixação, peso e dimensões da luminária.

No plano económico, ponderar sobre [2]:

- Custo das luminárias e custo da instalação;
- Facilidade de substituição das lâmpadas e de componentes;
- Custos de manutenção.

Quando se procede à escolha de uma luminária, é necessário ter em consideração alguns aspetos técnicos e económicos como referido anteriormente, mas principalmente para que a luminária seja eficiente é necessário que a mesma produza uma boa iluminação. Uma boa iluminação deve focar o fluxo luminoso da luminária na superfície a iluminar (exemplo: objetos, no caso da iluminação pública nas vias rodoviárias e passeios) e evitar ao máximo a propagação do mesmo para a parte superior, ou seja, evitar ao máximo iluminar o céu, para evitar provocar poluição luminosa.

A poluição Luminosa pode ser definida como sendo qualquer efeito adverso causado ao meio ambiente pela luz artificial excessiva, ou mal direcionada, nomeadamente quando a luz artificial é emitida demasiadamente na forma horizontal e para hemisfério superior [5]. Uma luminária eficiente é aquela na qual o fluxo luminoso é emitido na forma vertical (para baixo) e minimamente na forma horizontal (para os lados), permitindo uma boa iluminação aos cidadãos ao passo que uma luminária ineficiente é aquela em que o fluxo está direcionado demasiadamente para a parte superior, iluminando apenas o céu, representando assim um desperdício de iluminação. Na Figura 2, à esquerda, é possível ver uma representação do que poderá ser uma luminária eficiente e à direita a representação e uma luminária ineficiente.



Figura 2: Representação de uma luminária eficiente (esquerda) e de uma luminária ineficiente (direita)

2.1.2 Tipos de Fontes de iluminação

Uma lâmpada é um conversor de energia, e embora possa realizar funções secundárias, a sua principal funcionalidade é a transformação da energia elétrica em radiação eletromagnética visível. Existem diversos tipos de lâmpadas que podem ser utilizados, mas para que seja possível obter uma boa iluminação e obter o máximo de desempenho de cada uma delas é necessário ter em conta tanto as especificações do local como as especificações da lâmpada. Cada tipo de lâmpada possui as suas próprias características técnicas, económicas e padrões de desempenho [12]. Para uma iluminação eficiente é necessário ter em consideração alguns parâmetros como o consumo de energia, rendimento luminoso e o tempo médio de vida das lâmpadas.

Neste tópico serão abordados e explicados algumas das fontes de iluminação existentes no mercado bem com a importância das luminárias na iluminação. Na Figura 3 é possível ver um esquema com os tipos de lâmpadas que será abordados.

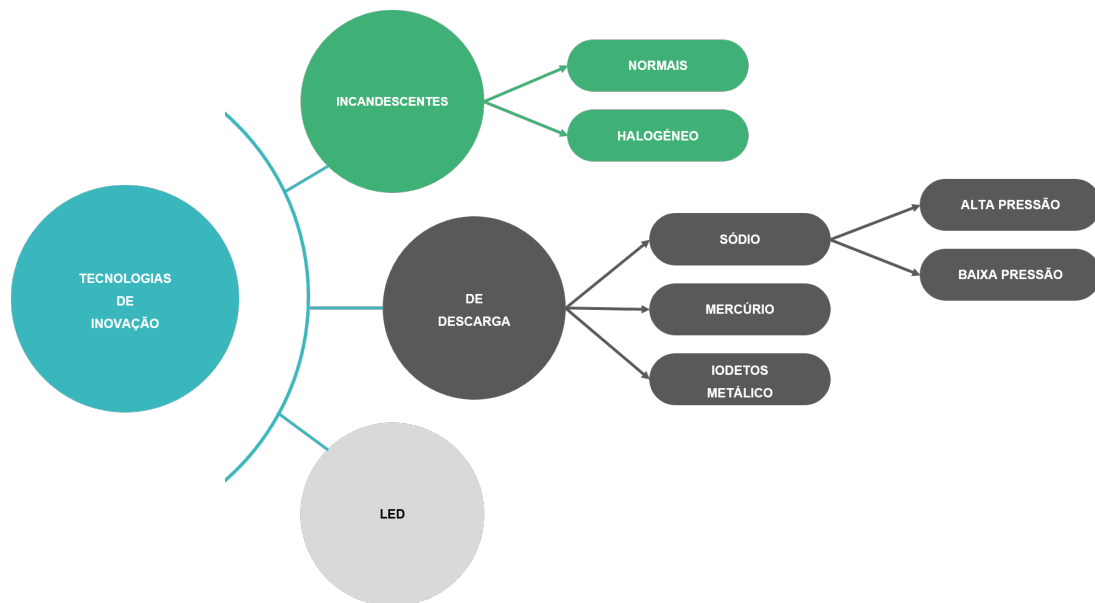


Figura 3: Esquema com os tipos de lâmpadas

2.1.2.1 Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes são um dos modelos de lâmpadas mais antigo e que já foram muito populares em tempos, mas têm vindo a ser substituídas devido à sua baixa eficiência e ao seu tempo de vida muito curto. São constituídas por um filamento de tungsténio alojado no interior de uma ampola de vidro preenchida com gás inerte. Aquando da passagem da corrente elétrica pelo filamento, com base no fenómeno de incandescência, há liberação de energia que se transforma em luz e calor (exatamente por isto este tipo de lâmpadas aquecem bastante) [13].

Este tipo de lâmpadas possui uma eficiência luminosa muito baixa, pois apenas uma pequena parte da energia consumida é convertida em luz visível, apenas aproximadamente 5% dessa energia é transformada em luz sendo os restantes 95% são desperdiçados sob a forma de calor.

As lâmpadas incandescentes eram muito populares pois possuem uma excelente reprodução de cores (ótima qualidade de luz) e devido ao seu baixo custo contudo é uma solução pouco aconselhável visto terem uma baixa eficiência luminosa, tempo médio de vida muito curto (cerca de 1000 horas) e um consumo e desperdício elevado.

2.1.2.2 Lâmpadas de Halogéneo

As lâmpadas de halogéneo são um tipo de lâmpada incandescente tendo um modo de funcionamento idêntico, ou seja, possuem um filamento que emite luz aquando da passagem de corrente elétrica, mas por possuírem halogéneo (geralmente bromo ou iodo) na sua constituição, são chamadas de Lâmpadas de halogéneo [13]. Este tipo de lâmpadas possui uma redução de aproximadamente 40% no consumo de energia em relação às incandescentes, oferecendo mais luz com menor potência e a ainda possuem uma vida útil mais longa, variando entre as 2 000 e as 4 000 horas.

2.1.2.3 Lâmpadas de Descarga (HID)

As lâmpadas de descarga são um tipo de lâmpadas em que uma descarga (de alta pressão) elétrica entre os eletrodos (condutor de corrente elétrica) leva os componentes internos da mesma a produzirem luz. Levam entre 2 a 15 minutos a acender por completo, são lâmpadas com baixo consumo de energia e a luz produzida pelas mesmas é extremamente brilhante, possibilitando a iluminação de grandes áreas (como por exemplo iluminação de estádios). Existe diversos modelos de lâmpadas de descarga:

- Iodetos Metálicos;
- Vapor de Sódio;
- Vapor de Mercúrio;

2.1.2.4 Lâmpadas de Vapor de Sódio de Baixa Pressão (LPS – *Low Pressure Sodium*)

As lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão têm como princípio de funcionamento uma descarga elétrica num tubo de vidro em forma de U, contendo uma atmosfera composta de néon e argon, além do sódio, com um eletrodo (condutor de corrente elétrica) em cada extremidade, cujo objetivo é garantir uma temperatura suficientemente elevada para que seja possível a vaporização do sódio, permitindo assim a emissão de luz visível [12].

As LPS são um dos tipos de lâmpadas mais eficiente no que respeita aos consumos energéticos e iluminação produzida pois possuem a capacidade de manter um fluxo luminoso constante

ao longo da sua vida tendo um rendimento luminoso muito elevado. Emitem praticamente uma única cor amarelo/alaranjado e a sua vida útil é em média entre as 14 000 e as 16 000 horas. Este tipo de lâmpadas necessita de equipamentos auxiliares para o seu funcionamento (ex: arrancador).

2.1.2.5 Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão (HPS – *High Pressure Sodium*)

As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (HPS) têm um princípio de funcionamento idêntico às LPS, sendo que neste tipo de lâmpada é colocada uma pequena quantidade de sódio misturada com mercúrio numa cápsula de vidro contendo xénon no seu interior. Durante o processo de aquecimento da lâmpada, o sódio e mercúrio vaporizam-se gradualmente fazendo com que a luminosidade produzida vá aumentando até estabilizar. Este tipo de lâmpada possibilita a transformação de 30% de energia em radiação visível, sendo os restantes 70% repartidos entre perdas e radiação infravermelha [12].

A eficiência luminosa das lâmpadas HPS é ligeiramente menor que a das lâmpadas LPS, contudo, o seu tempo de vida é em média superior a 16 000 horas normalmente entre as 20 000 e as 28 000 horas. Este tipo de lâmpadas tal como as LPS necessita de equipamentos auxiliares para o seu funcionamento (ex: arrancador).

2.1.2.6 Lâmpadas Vapor de Mercúrio (HPM - *High Pressure Mercury Lamp*)

As lâmpadas de vapor de mercúrio são um tipo de lâmpadas de descarga, na qual a luz é produzida aquando da passagem da corrente elétrica através do vapor de mercúrio. Este tipo de lâmpada tem como princípio de funcionamento a descarga entre dois elétrodos, localizados no interior de um tubo no qual existe uma mistura de mercúrio, sob alta pressão, e árgon. Durante o processo de aquecimento, o mercúrio vaporiza-se gradualmente, sendo emitida luz [12].

Neste tipo de lâmpadas apenas 15% da energia é convertida em radiação visível, sendo os restantes 85% transformados em perdas. As HPM chegaram a ser populares nas instalações públicas, mas, no entanto, a sua utilização diminuiu principalmente por dois motivos, pela sua baixa eficiência e a pela quantidade de Mercúrio existente no seu interior que é bastante prejudicial para o meio ambiente [12]. O seu tempo médio de vida útil é de cerca de 20 000 horas. Este tipo de lâmpadas tal necessita de equipamentos auxiliares para o seu funcionamento.

2.1.2.7 Lâmpadas de Iodetos Metálicos

As Lâmpadas de Iodetos Metálicos são um aperfeiçoamento da lâmpada de vapor de mercúrio tendo essencialmente o mesmo princípio de funcionamento e a mesma constituição, diferenciando-se na mistura de substâncias contida no tubo de descarga, na qual nas lâmpadas de iodetos metálicos são adicionadas ao mercúrio misturas com emissores iônicos ou com emissores moleculares. Este tipo de lâmpadas possui um melhor rendimento luminoso e um melhor desempenho em termos do Índice de Restituição de Cor, no entanto possui um tempo médio de vida inferior, entre as 9 000 e as 10.000 horas. [12].

As lâmpadas de iodetos metálicos, não produzem instantaneamente a máxima potência luminosa, necessitando de um período de aquecimento e necessitam de equipamentos auxiliares para o seu funcionamento.

2.1.2.8 Tecnologia LED (*Lighting Emitted Diodes*)

Os LED são um tipo de lâmpadas recente e sua tecnologia consiste em converter energia elétrica diretamente em energia luminosa. O LED é baseado num componente eletrônico (díodo semiconductor) que permite a passagem de energia elétrica apenas num sentido, que quando polarizado/energizado emite luz visível aos olhos humanos realizando esta tarefa com baixo consumo de energia [14].

São considerados um produto ecológico por consumir pouca energia e possuir uma vida extremamente longa. Devido à alta eficiência e ao baixo consumo têm vindo a substituir os mais diversos tipos de lâmpadas. O fluxo luminoso emitido pelo LED depende da cor e da densidade de corrente elétrica que alimenta o LED, quanto mais corrente o chip semiconductor do LED conseguir administrar, mais fluxo luminoso será emitido [14]. No entanto uma limitação deste tipo de tecnologia é a temperatura de funcionamento pois o seu desempenho, quer o fluxo luminoso, quer o tempo de vida serão afetados com temperaturas mais elevadas a que o LED esteja sujeito. Isto obriga os fabricantes a ter especial atenção aos dissipadores de calor que associam às luminárias [15].

Em termos de comparação uma lâmpada LED de apenas 10W é equivalente a uma fluorescente de 15W ou uma incandescente de 60W e o seu tempo médio de vida é muito superior ao de ambas. Uma desvantagem em comparação é o preço de aquisição, mas sendo uma

tecnologia recente e em constante evolução os LED estão cada vez a preços mais acessíveis. Os LED possuem um tempo de vida médio entre as 50 000 as 100 000 horas, sendo este um tempo médio de vida bastante elevado em comparação a outros tipos de lâmpadas [14]. Assumindo este tempo médio de vida os LED poderão operar entre 3 a 11 anos continuamente (24 horas por dia). Não precisam de um período de aquecimento produzindo luz quase instantaneamente. Os LEDs possuem muitos benefícios, tanto em termos económicos, ecológicos e luminosos, como por exemplo [15]:

- Qualidade de iluminação;
- Não emitem radiação ultravioleta e infravermelha;
- Baixo consumo;
- Elevada eficiência energética;
- Resistência a impactos e vibrações: Utiliza tecnologia de estado sólido, portanto, sem filamentos e sem vidro, aumentando a sua robustez;
- Tempo médio de vida elevado.

Contudo e como todos os outros tipos de lâmpadas possuem também algumas desvantagens [15]:

- Custo de aquisição superior (sendo cada vez mais baratos com o desenvolvimento);
- Alguma inconsistência na cor reproduzida pelos LED;
- Necessidade de dispositivos de dissipação de calor.

Os LED devido a todas as suas vantagens têm vindo a ser utilizados nos mais diversos setores e equipamentos, tendo vindo a ser utilizados recentemente na iluminação pública, sendo abordado mais à frente alguns exemplos tanto a nível nacional como europeu de projetos com iluminação pública utilizando LED. Para a iluminação pública existem duas abordagens para a implementação de iluminação LED:

- Substituição de qualquer lâmpada existente num poste de iluminação por uma lâmpada LED, sendo que este método não irá tirar partido de todas as potencialidades da tecnologia LED e tanto o desempenho como a redução de consumo não vão ser os desejados;

Tipo de Lâmpada	Rendimento luminoso (lm/W)	Eficiência	Vida útil (horas)	Características
Incandescente	8 a 20	Muito Baixa	cerca de 1 000	Baixa eficiência; Tempo médio de vida muito curto; Apenas 5% da energia é convertida em luz sendo os restantes 95% perdas; Excelente reprodução de cores; Baixo custo.
Halogêneo	20 a 25	Baixa	2 000 a 4 000	Tempo médio de vida muito curto; Baixa eficiência; Redução de 40% no consumo de energia em relação às incandescentes.
Vapor de sódio de alta pressão (HPS)	70 a 150	Razoável	20 000 a 28 000	Tempo médio de vida elevado; Necessita equipamentos auxiliares.
Vapor de sódio de baixa pressão (LPS)	100 a 200	Alta	cerca de 16 000	Tempo médio de vida elevado, embora inferior às HPS; Rendimento luminoso bastante elevado; Necessita equipamentos auxiliares.
Vapor de mercúrio	35 a 65	Baixa	Cerca de 20 000	Baixa eficiência; Contém mercúrio que é prejudicial à saúde; Apenas 15% da energia é convertida em luz sendo os restantes 85% perdas; Necessita equipamentos auxiliares.
Iodetos metálicos	65 a 120	Razoável	Cerca de 10 000	Contém mercúrio que é prejudicial à saúde; Possuem uma eficiência superior às de vapor de mercúrio; Necessita equipamentos auxiliares; Tempo médio de vida relativamente curto.
LED	120 a 200	Muito alta	50 000 a 100 000	Tempo médio de vida bastante elevado; Baixo consumo; Elevada eficiência energética; Custo de aquisição alto;

Tabela 2: Comparação dos diferentes tipos de lâmpadas.

- Desenvolvimento de uma luminária LED desenhada especialmente para acomodar as necessidades dos LEDs, para que seja possível maximizar o seu tempo de vida, eficiência e desempenho.

2.2 Iluminação Pública em Portugal

A iluminação pública está diretamente ligada à segurança e conforto dos cidadãos em períodos noturnos nas vias públicas, quer sejam pedestres ou condutores sendo essencial para o ambiente de uma cidade e qualidade de vida dos cidadãos, assegurando assim segurança e conforto dos cidadãos durante os períodos noturnos [16]. Como abordado anteriormente, existem diversas tecnologias que podem ser utilizadas na iluminação pública, devendo ser adotadas tecnologias mais eficientes e mais apropriadas aos diversos locais para que a iluminação seja realizada da forma mais eficiente possível.

A nível de iluminação pública em Portugal, como é possível verificar na Figura 4, as fontes de

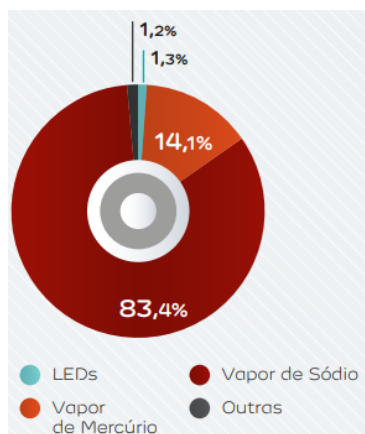


Figura 4: Tipos de fontes de luz utilizadas na iluminação pública (em percentagem). Fonte: [2]

iluminação mais utilizadas são as lâmpadas de vapor de mercúrio e de vapor de sódio tendo vindo a ser registado um aumento da iluminação pública utilizando tecnologia LED. Embora ainda sejam utilizadas na iluminação pública as lâmpadas de vapor de mercúrio estão proibidas no mercado da UE (União Europeia), não podendo ser utilizadas em novas instalações, devido principalmente à sua baixa eficiência energética e elevada toxicidade (devido à presença de elevadas quantidades de mercúrio). As lâmpadas mais utilizadas atualmente em Portugal são as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (HPS), possuindo a mesma um bom rendimento luminoso e um preço baixo comparativamente aos LEDs. Mais recentemente, e com o desenvolvimento da tecnologia, é cada vez mais utilizada a tecnologia LED que apresenta diversas vantagens e potencialidades comparativamente com as HPS, como por exemplo o baixo consumo e o elevado tempo média de vida.

2.2.1 Consumo energético da Iluminação pública em Portugal

O consumo de energia elétrica está relacionado com o aumento de qualidade de vida dos cidadãos e isso faz com que o consumo energético em Portugal seja elevado. Como é possível ver na Figura 5 a iluminação pública é responsável por cerca de 3% do consumo total de energia em Portugal, no ano 2017, sendo esta uma fatia bem significativa. Para a análise do consumo energético da iluminação pública em Portugal e para a realização dos gráficos das Figuras 5 e 6 foram utilizados os dados da plataforma PORDATA, disponíveis em [17].

Tendo em conta o aumento do número de infraestruturas de iluminação pública o consumo de energia nesta área revelou ao longo dos anos uma evolução. Como é possível ver no gráfico da Figura 6 entre os anos 1994 a 2009 ocorreu um grande crescimento, superior aos 50%, no

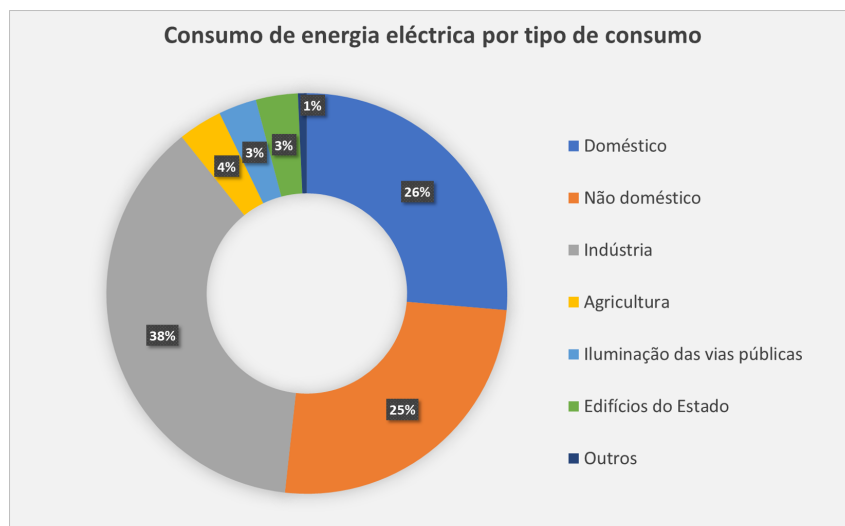


Figura 5: Consumo de energia eléctrica por tipo em Portugal (em percentagem)

consumo de energia devido à expansão do número de instalações de iluminação pública. Já entre 2009 e 2013 ocorreu uma pequena descida, descida esta que pode estar relacionada com as medidas tomadas nessa altura por conta do elevado consumo de energia, medidas estas relacionadas com a troca das fontes de luz por outras mais eficientes e o desligar de alguns postes de iluminação. Por fim, desde 2013 até ao momento o consumo de energia tem-se mantido constante.

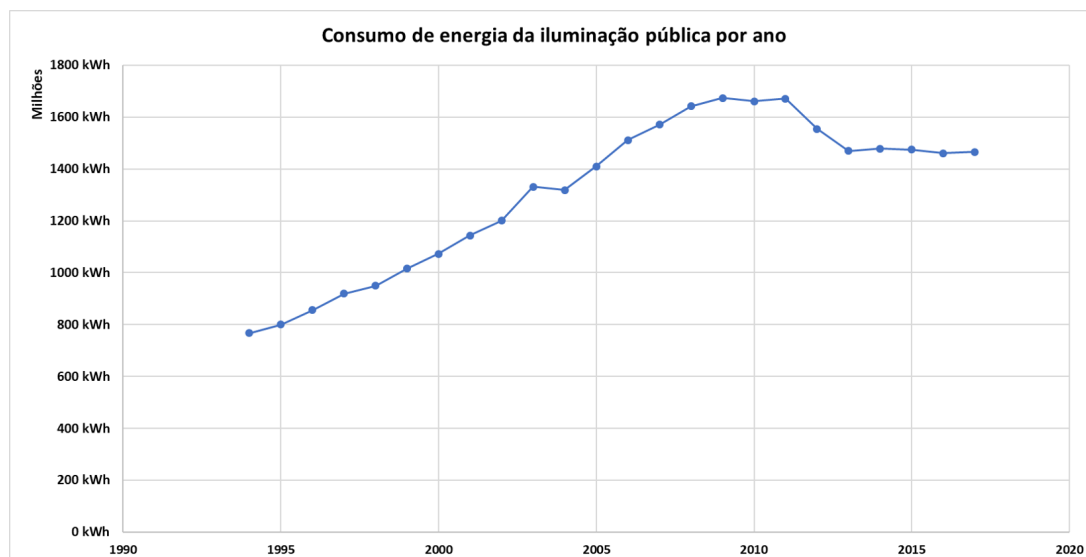


Figura 6: Consumo de energia (em kWh) da iluminação pública por ano em Portugal

Sendo a iluminação pública um setor com um consumo considerável de energia elétrica, e também com elevados gastos, é necessária uma ponderação sobre as soluções existentes no momento nas infraestruturas de iluminação pública.

Tendo em conta o consumo energético em Portugal e como consequência dos programas de

eficiência energética - como por exemplo o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) – existem metas a cumprir com o objetivo de melhorar a eficiência energética a nível Nacional, até 2020, na qual se pretende melhorar o nível de eficiência energética na ordem dos 20%, esta temática de estratégias para melhorar o consumo de energia é abordada em mais detalhe na secção 2.3. Visto a iluminação pública ser um dos setores com mais consumo de energia em Portugal serão necessárias alterações relativamente ao consumo de energia de modo a que seja possível aumentar a eficiência. Para se concretizar tais objetivos é necessário encontrar soluções e de momento existem algumas formas de tornar as infraestruturas de iluminação pública mais eficientes e com isso conseguir alcançar o objetivo, no entanto todas obrigam a algum investimento. As soluções que têm vindo a ser adotadas são [12]:

- **Substituição do tipo de lâmpadas:** substituição das antigas lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas mais eficientes, usualmente são utilizadas na substituição as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, no entanto, há situações em que é alterada toda a filosofia de iluminação, substituindo toda a luminária;
- **Implementação da tecnologia LEDs:** com a evolução da tecnologia LED e a diminuição do custo de implementação de luminárias deste tipo, esta é uma alternativa bastante credível para utilização na iluminação pública;
- **Regulação do fluxo luminoso:** esta é uma solução na qual se recorre à implementação de equipamentos que permitam a regulação do fluxo luminoso. Esta é uma forma de se conseguir reduzir os gastos com a energia elétrica, pois é conhecido que em muitos casos a iluminação pública está ligada no seu máximo durante o todo seu período de funcionamento desnecessariamente, podendo levar-nos à conclusão sobre um possível desperdício de energia [18]. A possibilidade de se reduzir o fluxo luminoso durante determinados períodos noturnos garante economias no consumo de energia elétrica, conservando sempre um nível de segurança para os cidadãos.

2.3 Medidas e Planos que visam melhorar o consumo de energia

Encontrarmo-nos numa época em que a energia se tornou num fator essencial para o desenvolvimento e progresso das nações. Contudo continuam ainda a existir inúmeras falhas quanto à eficiência no consumo energético e também o seu uso intensivo, nas mais diversas formas,

revelando-se na destruição progressiva do meio ambiente e na degradação da qualidade de vida. O consumo de energia elétrica é bastante elevado a nível europeu e esse mesmo consumo está na origem de 80% das emissões de gases com efeito de estufa na União Europeia (UE). Como referido anteriormente em Portugal a iluminação pública é responsável por aproximadamente 3% do consumo total de energia elétrica sendo este um consumo bastante elevado e por diversas vezes ineficiente. Tendo em consideração os problemas apresentados é necessário apresentar, desenvolver e praticar medidas que permitam reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, diminuir o consumo de energia e aumentar a eficiência de consumo [5]. É nesta ótica que surgem estratégias na UE como a “Estratégia 20-20-20” e no caso de Portugal, o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE).

2.3.1 Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE)

A União Europeia face aos problemas relativos à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos existentes determinou que os Estados Membros deveriam atingir algumas metas relacionadas com a economia de energia e o uso de energias renováveis até 2020. Nesse âmbito, os Estados Membros comprometeram-se a cumprir essas mesmas metas, em Portugal foi definido um Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) no sentido de dar resposta às preocupações relativas à redução de energia para o horizonte de 2020 [19].

Neste contexto o PNAEE é essencialmente executado através de medidas regulatórias e apoios financeiros provenientes de fundos que disponibilizam verbas para programas de eficiência energética, tais como [19]:

- Pacote “Energia-Clima” (ou Estratégia “20-20-20”): metas definidas para atingir pelos Estados Membros até 2020;
- Fundo de Eficiência Energética (FEE): destinado a apoiar especificamente as medidas do PNAEE;
- Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica (PPEC), promovido pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) e que tem como missão prover a implementação de medidas que visam melhorar a eficiência no consumo de energia elétrica.

2.3.2 Fundo de Eficiência Energética (FEE)

O Fundo de Eficiência Energética (FEE), constitui um instrumento financeiro capaz de financiar programas e medidas previstas no PNAEE, sendo este o principal objetivo do mesmo. A atividade do FEE encontra-se alinhada com todas as outras políticas definidas no sentido de cumprir as metas estabelecidas pela união europeia para eficiência energética, como a redução em 20% do consumo de energia até 2020; O FEE pode ainda apoiar projetos não previstos no PNAEE, mas que comprovadamente contribuam para a eficiência energética [20].

2.3.3 Estratégia 20-20-20

Em 2007 com o objetivo de contribuir para a luta contra as alterações climáticas e simultaneamente melhorar situação relacionada com a energia a União Europeia (UE) definiu um conjunto de metas a atingir até 2020, denominada Pacote Estratégia "20-20-20". Este plano pretende que os estados-membros da União Europeia consigam atingir até 2020 três metas [21]:

- reduzir 20% as emissões de gases com efeito de estufa (a partir dos níveis de 1990);
- 20% da energia da UE proveniente de energias renováveis;
- reduzir 20% do consumo de energia (aumentar a eficiência energética).

2.3.4 Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica (PPEC)

O reconhecimento das falhas e problemas existentes no setor da energia justifica a implementação de medidas de promoção da eficiência no consumo energético. Reconhecendo toda esta situação a ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos) lançou em 2006 o PPEC (Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica). O PPEC tem como missão promover a implementação de medidas que visam melhorar a eficiência no consumo de energia elétrica, economicamente viáveis, e que conduzam a ganhos em poupança e redução de emissões. Estas medidas são destinadas aos consumidores dos diferentes segmentos de mercado. Desde 2006 foram implementadas diversas edições: PPEC 2007, PPEC 2008, PPEC 2009-2010, PPEC 2011-2012, PPEC 2013-2014 e PPEC 2017-2018 [22].

No âmbito do PPEC são promovidos dois tipos de medidas [22]:

- medidas tangíveis: consistem na instalação de equipamento com um nível de eficiência superior ao *standard* de mercado, conseguindo-se assim reduções de consumo;
- medidas intangíveis: consistem na divulgação de informação sobre boas práticas para um uso eficiente de energia elétrica, visando promover mudanças de comportamento nos utilizadores.

Nas edições do PPEC de 2013-2014 e 2017 - 2018 foi promovida e financiada a substituição de sistemas de iluminação pouco eficientes por tecnologia LED. Na Figura 7 é possível verificar o resultado esperado de energia consumida evitada por setor ao longo do tempo, da edição do PPEC 2013-2014.

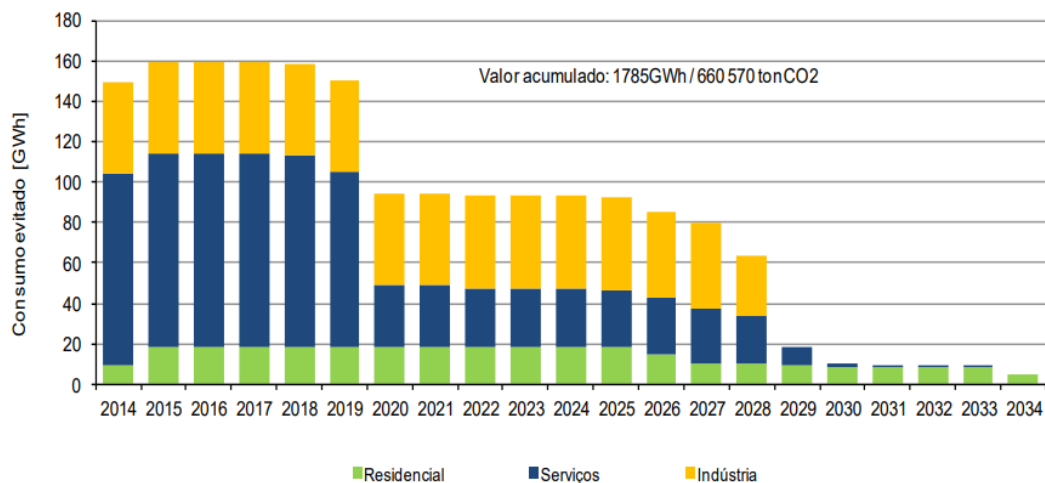


Figura 7: Estimativa do consumo de energia evitado ao longo dos anos, PPEC 2013-2014. Fonte: [3]

2.3.4.1 PPEC 2017-2018

A 6.^a edição PPEC tem como objetivo prioritário apoiar financeiramente iniciativas que promovam a eficiência e redução do consumo de eletricidade nos diferentes segmentos de consumidores. O PPEC 2017-2018 aprovou 75 medidas que serão implementadas por 33 promotores. Estas medidas foram selecionadas, por intermédio de concursos, de um universo de 224 medidas apresentadas por 79 promotores. O valor total das medidas propostas a concurso foi de 61,9 milhões de euros [22].

A ERSE estima que os benefícios sociais a alcançar com a implementação das medidas aprovadas (cerca de 111 milhões de euros) são muito superiores aos custos (23 milhões de euros).

Os efeitos benéficos das medidas permanecerão até 2037, representando cerca de 1 470 GWh de consumo evitado acumulado [22].

2.3.5 Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC)

Em 2015, com o Acordo de Paris, ocorre uma mudança de paradigma com o reconhecimento de que apenas com o contributo de todos é possível ultrapassar o desafio das alterações climáticas e travar o aquecimento global. Em 2016 a Comissão Europeia apresentou o Pacote Energia Limpa para todos os Europeus, um conjunto de medidas com o objetivo de promover a transição energética nos anos 2021-2030, tendo em vista o cumprimento do Acordo de Paris. Este pacote prevê que todos os Estados-Membros elaborem e apresentem à Comissão Europeia um Plano Nacional integrado de Energia e Clima (PNEC) para o horizonte 2021-2030 que será o principal instrumento de política energética e climática para esse mesmo período [21]. O PNEC pretende a definição de metas e objetivos relacionados com emissões de gases com efeito de estufa, energias renováveis, eficiência energética, segurança energética, mercado interno e investigação, inovação e competitividade, bem como abordagens para o alcance dessas mesmas metas e objetivos. Enquanto Portugal se prepara para cumprir o seu desafio para 2020 é importante definir novas ambições para 2021-2030. O PNEC define os contributos nacionais e principais abordagens com vista a alcançar os compromissos impostos, incluindo redução de emissões de gases com efeito de estufa, energias renováveis, eficiência energética [4]. Na Figura 8 é possível verificar as principais metas que se pretendem atingir em Portugal com implementação deste plano nacional.

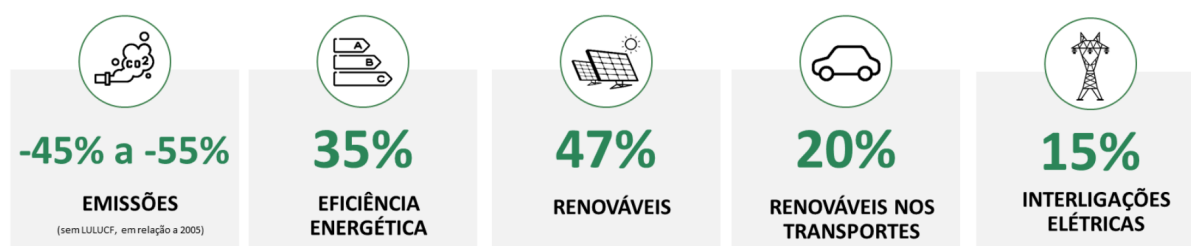


Figura 8: Metas energia e clima de Portugal para o horizonte 2030. Fonte: [4]

Para dar cumprimento à visão estratégica de Portugal e garantir o cumprimento das metas definidas, foram definidos no PNEC oito principais objetivos numa lógica de integração energia e clima [4]:

- Descarbonizar a economia nacional;

- Dar prioridade à eficiência energética;
- Promover a mobilidade sustentável;
- Garantir a segurança de abastecimento;
- Promover uma agricultura sustentável e potenciar o sequestro de carbono;
- Desenvolver uma indústria inovadora e competitiva;
- Garantir uma transição justa, democrática e coesa;
- Reforçar a aposta nas energias renováveis e reduzir a dependência energética do país.

2.4 Projetos de infraestruturas Iluminação Pública eficientes

Com o reconhecimento das falhas e problemas existentes no setor da energia e a implementação de estratégias e medidas de promoção da eficiência energética, houve um aumento de interesse nesta área que fez com se começassem a desenvolver diversos estudos e projetos para melhorar o setor da energia. A principal meta a atingir com estes estudos é melhorar a eficiência energética e se possível diminuir os gastos associados com a mesma.

Nesta secção, serão enumerados alguns projetos implementados com a finalidade de obter um melhor desempenho energético, e que obtiveram resultados positivos com poupanças significativas e diminuição de custos.

2.4.1 Portugal

2.4.1.1 Regeneração urbana na cidade de Águeda

Em 2012, foi realizado um projeto de regeneração urbana na cidade de Águeda. No âmbito deste projeto foram implementadas luminárias com tecnologia LED no centro da cidade, substituindo as antigas de vapor de sódio. A implementação consistiu na instalação de luminárias LED de 90 e 60W que substituíram luminárias de vapor de sódio de 70 e 150W. Em conjunto com as luminárias LED, foi implementado um sistema de controlo que permite a regulação de fluxo, nos períodos noturnos, gestão e monitorização da iluminação. A implementação do projeto permitiu uma redução no consumo de energia de aproximadamente 63% [9]. Na tabela

Dados	Antes da Renovação	Depois da Renovação
Tipo fonte de luz	Vapor de sódio	LED
Consumo total	34 012 kWh	12 695 kWh
Poupança anual de energia	-	21 317 kWh
Poupança anual CO2	-	1 091 kg CO2/kWh

Tabela 3: Dados relacionados com o projeto de renovação na cidade de Águeda. Fonte: [9]

3 é possível avaliar os consumos antes e depois da renovação e as poupanças relacionadas com a implementação deste projeto.

2.4.1.2 Iniciativa "Premium light Pro"

A iniciativa internacional Premium light Pro centra-se na implementação de soluções inovadoras para sistemas de iluminação eficiente, esta iniciativa é financiada pelo programa de investigação e inovação da Comissão Europeia, Horizonte 2020 e reúne vários centros de investigação de vários países incluindo Portugal. O principal objetivo desta iniciativa é apoiar a implementação de soluções LED de elevada qualidade e eficiência utilizando os instrumentos e serviços apropriados.

2.4.1.3 Projeto EDPinovGrid

Associado aos programas e projetos existentes na procura de aumentar a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental em Portugal, a EDP iniciou 2007 o Projeto Inovgrid, em virtude da crescente necessidade de otimização energética e de novos modelos de gestão de energia, cada vez mais eficientes e fiáveis. Consiste na implementação de um conjunto de novas tecnologias e sistemas baseados em redes inteligentes promovendo um aumento da eficiência e melhoria na qualidade de serviço [23]. As redes inteligentes são redes elétricas que recorrem a tecnologia digital, para suportar a sua gestão e operação. Designam-se 'inteligentes' porque oferecem soluções inovadoras para a resolução de problemas tradicionais nas redes elétricas. Um sistema de rede inteligente permite, por exemplo, detetar avarias, gerir a potência de energia distribuída ou diminuir o tempo de interrupção do serviço, remotamente e em tempo quase real.

A implementação do projeto InovGrid permitiu desenvolver novos conceitos [23]:

Microprodução: Possibilita a maximização da produção de energia e a otimização dos sistemas públicos de iluminação e abastecimento. Neste conceito o consumidor é considerado produtor e vendedor de energia.

Telegestão: Permite monitorizar à distância o consumo de energia e, conseqüentemente, gerir a qualidade do serviço de forma mais eficaz.

Os objetivos relacionados com a implementação do projeto:

- Introduzir na rede elétrica informação e equipamentos capazes de automatizar a gestão das redes;
- melhorar a qualidade de serviço;
- diminuir os custos de operação;
- promover a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental;
- potenciar as energias renováveis.

2.4.2 Projetos Europeus

Devido à falta de desenvolvimento significativo relacionado com o desempenho energético foi lançado o projeto *Streetlight-EPC*, financiado pelo Programa *Intelligent Energy Europe*. Este projeto tem como objetivo melhorar o consumo de energia e garantir o suporte aos municípios através da renovação das infraestruturas de iluminação. O projeto foi realizado em 9 regiões num total de 47 projetos inseridos no projeto principal *Streetlight-EPC*. Este projeto representa um investimento total de 29 milhões de euros, contudo os resultados apresentam uma poupança anual de mais de 28 000 MWh e mais de 3.5 milhões de euros em custos de eletricidade e manutenção [10].

De seguida serão apresentados dois dos 47 projetos realizados no Projeto principal *Streetlight-EPC* sendo um deles na Áustria e outro em Espanha.

2.4.2.1 Município de Bad Schallerbach, Áustria - Projeto de iluminação pública

O município austríaco de Bad Schallerbach, na Áustria, é um município comprometido com a proteção do clima, procurando continuamente melhorar sua eficiência energética. O objetivo

Dados do Projeto	Antes da Renovação	Depois da Renovação
Número total de lâmpadas	1 946	793
Número de pontos de iluminação	791	793
Tipo lâmpada	Vapor de Mercúrio	LED
Consumo anual de eletricidade	227 300 kWh	96 400 kWh
Custo anual de eletricidade	34 000 €	14 500 €
Redução CO2	-	60 tons/ano

Tabela 4: Factos do projeto no Município de Bad Schallerbach, Áustria. Fonte: [10]

original era reformar apenas as secções do sistema de iluminação pública que precisavam ser substituídas. No entanto devido ao envelhecimento do seu sistema atual de iluminação pública e à eliminação gradual das lâmpadas de mercúrio do mercado, todo o sistema de Iluminação Pública foi renovado. O facto de todo o sistema ser renovado permitiu aproveitar todo o potencial do projeto a favor da eficiência energética [10]. Todo o sistema de iluminação pública do município foi renovado tendo sido investidos neste projeto um total de 354 600 €, sendo 196 400 € financiados pelo projeto *Streetlight-EPC*. Na tabela 4 é possível verificar os resultados da implementação deste projeto.

2.4.2.2 Cidade de Santander, Espanha - Projeto de iluminação pública

A cidade portuária de Santander está localizada na costa norte de Espanha e nos últimos anos, a cidade entrou na vanguarda das cidades inteligentes. A cidade lançou um ambicioso projeto de converter todo o seu sistema de iluminação pública, quase 23 000 lâmpadas, em tecnologia LED. Os objetivos do projeto eram aumentar a eficiência energética do sistema de iluminação, adaptar os níveis de iluminação à densidade do tráfego e aos parâmetros das ruas (sem comprometer a segurança e conforto dos seus cidadãos), e em geral, melhorar a qualidade de vida dos cidadãos e visitantes. Está prevista uma economia de 80% de energia com o projeto. Todo o sistema de iluminação pública foi renovado para LED tendo sido investido neste projeto um total de 11 000 000 € [10]. Na tabela 5 é possível verificar os resultados da implementação deste projeto.

Dados do Projeto	Antes da Renovação	Depois da Renovação
Número total de lâmpadas	22 915	22 842
Número de pontos de iluminação	22 700	22 700
Tipo lâmpada	-	LED
Consumo anual de eletricidade	21 400 000 kWh	4 300 000 kWh
Custo anual de eletricidade	2 100 000 €	600 000 €
Custo anual de manutenção	1 000 000 €	700 000 €
Redução CO2	-	7 866 tons/ano

Tabela 5: Factos do projeto Cidade de Santander, Espanha. Fonte: [10]

2.5 Regulamentação/Legislação Iluminação Pública

No processo de desenvolvimento de um projeto relacionado com iluminação pública existe regulamentação e normas que devem ser cumpridas. A nível europeu foi desenvolvida uma Norma para a Iluminação Pública – EN 13201 – que apresenta os *standards* para a iluminação pública, esta norma encontra-se dividida em quatro secções chave:

- EN 13201-1: Escolha das classes de iluminação;
- EN 13201-2: Parâmetros fotométricos recomendados;
- EN 13201-3: Cálculo dos parâmetros fotométricos;
- EN 13201-4: Métodos de medida das performances fotométricas.

Em Portugal foi elaborada e lançada a segunda edição do Documento de Referência para a Eficiência Energética na Iluminação Pública (DREEIP), que tem por base a Norma Europeia para a Iluminação Pública, EN 13201. O DREEIP tem como objetivo estabelecer como referência uma série de parâmetros técnicos para o desenvolvimento de um projeto de Iluminação Pública de modo a obter uma maior eficiência energética das instalações e, conseqüentemente, permitir diminuição das emissões de CO2 durante o período de utilização das mesmas. O documento encontra-se dividido em duas partes sendo a Parte I – conceitos de luminotecnica [5] e a Parte II – Projeto de Iluminação Pública – Especificações [24].

2.6 Manutenção

O tópico da manutenção da Iluminação Pública é muito importante e é um desafio devido à complexidade de uma infraestrutura de Iluminação Pública. A manutenção em si está associada à mudança das lâmpadas e/ou luminárias, mas a manutenção de uma rede de iluminação pública não se pode basear apenas nisso pois todos os componentes irão deteriorar-se progressivamente a partir da sua instalação pelo que uma manutenção regular é extremamente importante para manter a eficiência. Sendo uma fase importante é necessário minimizar os processos de manutenção por causa dos custos, sendo uma ferramenta importantíssima a definição correta do fator de manutenção. Ao considerar a manutenção na iluminação pública existem duas abordagens possíveis:

- **manutenção preventiva:** o objetivo é visitar regularmente a infraestrutura para realizar atividades de rotina, e em relação à vida útil das luminárias, a manutenção preventiva defende a substituição das mesmas após um determinado período de tempo, se esta duração for estimada em excesso as luminárias poderão não operar com eficiência até ao final do período estimado, se for estimado um período muito curto luminárias em boas condições serão substituídas;
- **manutenção reativa:** a alteração e as atividades de rotina na infraestrutura apenas acontecem quando se sabe que ocorreu uma falha. Este tipo de manutenção não é adequado para luzes LED uma vez que elas não falham no sentido tradicional.

Existem alguns fatores que podem levar à diminuição do desempenho das infraestruturas de iluminação como por exemplo a acumulação de poeiras e lixo em todas as superfícies expostas das fontes de luz e/ou das luminárias, a diminuição do fluxo luminoso da fonte de luz ou avarias na mesma, a idade dos componentes e a sua degradação [2].

2.7 Conceitos

Nesta secção são abordados e explorados alguns dos conceitos luminotécnicos mais relevantes.

Fonte de luz: Pode ser definido como sendo o elemento físico, sólido ou gasoso que, quando

alimentado por energia elétrica, emite radiações visíveis ao olho humano, luz. Um exemplo de fontes de luz são as lâmpadas [2].

Ponto de luz: Define-se como um elemento que permite a iluminação de uma área, sendo constituído por um aparelho de iluminação (fonte de luz e apoio). Um exemplo pode ser uma luminária LED que já incorpora os LED, todos os componentes necessários para o seu funcionamento e que garante as condições de funcionamento adequadas [2].

Tempo de Vida: O tempo médio de vida pode ser definido como o número de horas que uma lâmpada irá emitir fluxo luminoso. Esta é uma das características mais relevantes, pois influencia quer os custos de manutenção quer do custo de aquisição de lâmpadas.

Poluição Luminosa: A poluição luminosa é definida como qualquer efeito adverso causado ao meio ambiente pela luz artificial em excesso, refletida ou mal direcionada. No domínio da iluminação pública pode ocorrer os seguintes tipos de poluição luminosa [2]:

- Luz emitida para o céu (*sky glow*): é definida como o brilho do céu a noite que resulta da radiação que é emitida diretamente para cima e da radiação refletida pelas diversas superfícies;
- Luz intrusiva (ilumina locais indevidamente): é definida como a luz emitida por uma instalação para fora dos limites da área ou propriedade que deveria iluminar.

Fluxo luminoso (Φ): É a quantidade de luz emitida em todas as direções por uma fonte de luz. A unidade é o lúmen (lm) [5].

Iluminância (E): A iluminância tem como unidade o lux (lx). É o quociente entre o fluxo luminoso incidente num elemento da superfície e a área desse mesmo elemento (Figura 9). Ou seja, é a quantidade de fluxo luminoso recebido pela unidade de área iluminada [5].

Intensidade luminosa (I): É o fluxo luminoso (quantidade de luz) emitido por uma fonte de luz numa determinada direção [5].

Luminância (L): A luminância (L) é uma medida da densidade da intensidade da luz refletida numa dada direção, que descreve a quantidade de luz que atravessa ou é emitida de uma superfície, segundo um determinado ângulo (Figura 10). É a perceção da luz refletida numa determinada superfície numa dada direção [5].

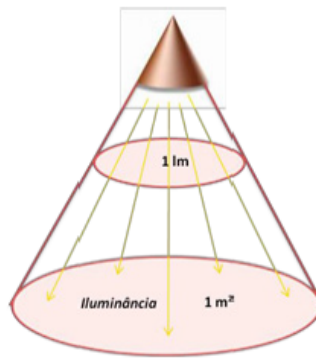


Figura 9: Iluminância. Fonte: [5]

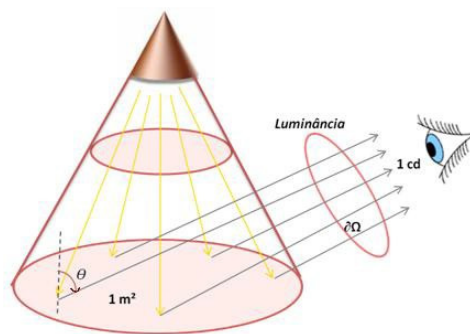


Figura 10: Luminância. Fonte: [5]

Eficiência luminosa: A eficiência luminosa de uma fonte é a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência por ela absorvida. A unidade é o lm/W (lúmen por Watt) [5].

Temperatura de cor (K): A cor não é uma propriedade intrínseca dos objetos, isoladamente os objetos não possuem cor, posto isto a temperatura de cor é, então, uma característica da luz visível, determinada pela comparação da sua saturação cromática com a de um corpo negro radiante ideal. Ou seja, é a temperatura a que um corpo negro irradiaria a mesma cor da fonte luminosa. Expressa a aparência de cor da luz emitida pela fonte de luz. A Figura 11 mostra a variação de cor conforme o valor. É medida em graus de kelvin (K) numa escala de 1000 a 10 000 [2]:

- 0 K a 3 300 K: Quente (branco alaranjado);
- 3 300 K a 5 000 K: Intermédio (branco);
- 5 000 K a 10 000K: Fria (branco azulado).

Índice de reprodução de cor (IRC): É a capacidade de reprodução cromática do objeto iluminado por uma fonte de luz, ou seja é um valor percentual que indica a capacidade de uma



Figura 11: Variação da temperatura de cor. Fonte: [2]

determinada fonte de luz na reprodução de cores com precisão, considerando a luz do sol como referência de qualidade. Este índice varia entre 0 (nenhuma fidelidade) e 100 (máxima fidelidade) [2].

Fator de Manutenção (FM): As instalações e sistemas de iluminação com o passar do tempo e utilização, de forma natural começam a obter desgaste e degradação devido a vários fatores, sejam eles sujeidade, fenômenos meteorológicos, perdas do fluxo luminoso ou mesmo envelhecimento dos seus componentes, sendo por isso importante o calculo do Fator de Manutenção (FM) para que seja possível garantir os níveis de iluminação necessários ao longo da vida útil da instalação. O FM é um fator decisivo e que influencia o nível de iluminação inicial e o número de luminárias necessárias de modo a garantir o nível de iluminação necessário [25].

O fator de manutenção de uma instalação pode ser calculado através do produto entre os fatores de manutenção da luminosidade da lâmpada (FM_{LL}), sobrevivência da lâmpada (FSL) e manutenção da luminária (FML):

$$FM = FM_{LL} \times FSL \times FML$$

O valor do fator de manutenção poderá afetar significativamente a potência da fonte de luz (lâmpada) a instalar, bem como o número de luminárias necessárias para alcançar os valores de iluminância/luminância especificados.

Fator de Manutenção da Luminosidade da Lâmpada (FM_{LL}): O fator de manutenção da luminosidade da lâmpada (fonte de luz) é obtido através do rácio entre o fluxo luminoso da lâmpada num dado momento da sua vida e o fluxo luminoso inicial.

Fator de Sobrevivência da Lâmpada (FSL): O fator de sobrevivência da lâmpada é definido pela fração do número total de lâmpadas que continuam a funcionar num dado momento e sob determinadas condições. O fator de sobrevivência de uma lâmpada depende da quantidade de horas de funcionamento. É obtido através do rácio entre o número total de lâmpadas, que continuam a funcionar num dado momento e o número de lâmpadas iniciais.

Fator de Manutenção da Luminária (FML): O fator de manutenção da luminária é o rácio do

LOR (Rácio de Saída do Fluxo Luminoso, do inglês *Light Output Ratio*) de uma luminária num dado momento, com o LOR dessa mesma luminária no seu início de vida. O LOR é entendido como o quociente entre o fluxo luminoso total de uma luminária e a soma dos fluxos luminosos individuais das suas lâmpadas.

Capítulo 3

Estado da arte

Atualmente a energia é um vetor essencial para o desenvolvimento das nações sendo um dos motores que alimenta o progresso. Posto isto, o acesso à energia é fundamental, no entanto a maior parte da energia utilizada atualmente provém de combustíveis fósseis cujas reservas são cada vez mais escassas. O uso intensivo de energia, para além da diminuição das reservas de combustíveis fósseis, contribui para o aquecimento global (através do aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera) revelando-se através da destruição progressiva do meio ambiente e da degradação da qualidade de vida [26].

A iluminação pública é um dos setores com maior consumo de energia pois é um componente essencial para o ambiente de uma cidade, sendo importante para as várias atividades realizadas na mesma, durante os períodos noturnos [6]. Este facto faz com que a iluminação pública seja responsável por cerca de 19% do uso global de energia elétrica e representa cerca de 6% do total de emissões de gases com efeito estufa [27]. Existem fatores que podem explicar a ineficiência e o consumo elevado do sistema atual utilizado em muitas das infraestruturas de iluminação, como por exemplo [7]:

- O sistema é ativado e/ou desativado através do uso de temporizadores o que muitas vezes pode ser inconveniente pois o amanhecer/anoitecer não acontece sempre de igual forma;
- O Sistema está ligado continuamente durante toda a noite, estando muitas vezes ligado desnecessariamente, uma vez que existem períodos de menor atividade em que não é necessária iluminação;

- Aumento substancial do número de infraestruturas de iluminação exterior, mas em contrapartida não houve alterações no processo de gestão de energia.

Tendo em conta as consequências que advêm do uso intensivo de energia é cada vez mais necessária a procura por novas soluções para gestão eficiente de energia. Mas então o que é a Eficiência Energética? A Eficiência Energética de uma forma muito simples pode definir-se como fazer mais utilizando menos energia, ou seja, pretende melhorar-se o uso das fontes de energia através de uma utilização responsável das mesmas. Deve ser promovido o uso responsável e moderado de energia e ainda a aposta nas fontes de energia renováveis como o sol, o vento ou a água [26].

As cidades inteligentes desempenham um papel cada vez mais importante rumo à sustentabilidade energética. O conceito de cidade inteligente está em constante revisão, mas a maioria dos autores concorda que uma cidade inteligente é aquela que integra a tecnologia no mundo físico sendo esta tecnologia utilizada para melhorar a qualidade de vida dos cidadãos. Devem ter em conta tanto os cidadãos como os objetivos e visão da cidade. Esta integração entre a tecnologia e o mundo físico permite que o conceito de cidade inteligente assente em pilares como a conectividade (exemplo: edifícios autônomos), segurança, mobilidade (exemplo: rede de transportes e mobilidade inteligentes) e sustentabilidade (exemplo: gestão de energia) potenciando o aumento da qualidade de vida [7].

A gestão de energia é um dos desafios mais significativos numa cidade tendo em consideração o objetivo de melhorar o uso das fontes de energia e o modo como a mesma é utilizada. Para tal, existem sistemas que permitem atingir esses objetivos, designados de sistemas de gestão e controlo de energia (em inglês, *Energy Management Systems* - EMS). Os sistemas de gestão de energia elétrica são sistemas computacionais que oferecem ferramentas para monitorização, controlo e otimização inteligente do desempenho da rede de energia em tempo real, tanto para serviços públicos como para particulares. Estes sistemas fazem a gestão de informação do sistema de energia elétrica com o objetivo de otimizar o consumo e os custos de energia, ou seja, aumentar o desempenho da rede [28]. Explicando o processo de uma forma simplificado, é realizada uma recolha de dados relacionados com o consumo de energia, através de sensores ou outros aparelhos de medição. Os dados são monitorizados e processados pelo sistema e, caso seja possível aumentar o desempenho, é feito um ajuste em tempo real na rede de energia. Para que seja feita uma monitorização eficaz do sistema devem ser indicados os valores operacionais aceitáveis para a rede, para que o sistema possa

alertar os operadores assim que existirem indícios de falhas [28].

Os EMS são sistemas de gestão e controlo autónomos e inteligentes. A área de controlo inteligente é ainda um campo em desenvolvimento, bastante complexo, mas com muito potencial. Estes sistemas de controlo inteligente emergiram da inteligência artificial e são sistemas de controlo autónomo capazes de processar e extrair conhecimento com o objetivo de encontrar formas racionais para atingir as metas [29]. Este tipo de sistemas pode incluir um sistema de suporte à decisão (em Inglês *Decision Support System* - DSS) que são um componente indispensável no processo de tomada de decisão. São sistemas informáticos capazes de recolher, armazenar, organizar e analisar dados de forma a facilitar o processo de tomada de decisão [30].

Considerando os benefícios do uso destes sistemas é fácil perceber a sua importância para a eficiência energética, numa altura em que se pretende atingir os objetivos e metas no setor de energia no que respeita à redução da intensidade energética e carbónica, bem como à melhoria da sustentabilidade. Estes sistemas são uma mais valia no que toca à eficiência energética.

3.1 Métodos e sistemas de controlo de Iluminação Pública

No âmbito da iluminação pública existem métodos e sistemas de controlo e gestão que regulam, gerem e monitorizam as infraestruturas de iluminação pública. Estes sistemas automáticos têm como objetivo otimizar a utilização das instalações de iluminação pública tendo sempre em conta o conforto e segurança dos cidadãos. A utilização destes sistemas resulta normalmente numa economia significativa de energia. Existem diversos sistemas que permitem o controlo da iluminação pública e que são utilizados diariamente, e podem ser classificados como:

- **Sistemas rudimentares** (simples, “sem inteligência”): sistemas que fazem o controlo da iluminação tendo por base parâmetros predefinidos, não permitindo um grande controlo sobre a mesma, e que permitem uma poupança de energia embora baixa quando comparada a outros. Um exemplo deste tipo de sistemas são os relógios astronómicos;
- **Sistemas autónomos inteligentes**: permitem o controlo total da rede de iluminação e assim maximizar a performance e a eficiência da rede.

Na iluminação pública estes sistemas podem ser implementados através de uma abordagem individual, abordagem esta que tem por base a gestão de forma independente para cada ponto de iluminação, ou através de uma abordagem centralizada em que diversos pontos de iluminação estão interligados e são geridos em conjunto.

3.1.1 Sistemas ON/OFF (Sistemas Rudimentares)

3.1.1.1 Relógio Astronómico

Os relógios astronómicos são uma solução de comando ON/OFF. São equipamentos que efetuam o cálculo diário, com base em fórmulas astronómicas, do número de horas de sol, desde o nascer do sol ao pôr do sol, para determinado lugar da Terra. A grande vantagem em relação a um sistema horário antigo é o facto de adaptarem o horário de funcionamento à altura do ano, ou seja, ao passo que num sistema antigo de horário, caso o mesmo não fosse ajustado manualmente, a iluminação ligava e/ou desligava sempre à mesma hora, com um relógio astronómico a ação ON/OFF é determinada pelas coordenadas geográficas e o período do ano.

Os relógios astronómicos são sistemas que permitem a economia de energia, mas este controlo não pode ser efetuado de forma totalmente eficaz utilizando temporizadores, uma vez que, em dias de chuva ou nevoeiro intenso, pode ser necessário ativar o sistema de iluminação por razões de segurança, podendo ser utilizado para isso Sensores crepusculares. O relógio astronómico pode funcionar isoladamente, ou então, auxiliar reguladores de fluxo ou sistemas de telegestão, transmitindo o sinal ON/OFF do sistema para os pontos de iluminação.

3.1.1.2 Sensores Crepusculares

Os sensores crepusculares são uma solução de comando ON/OFF que permitem saber quando a iluminação natural já não é suficiente e é necessária iluminação artificial. Estes sensores são importantes para detetar quando a iluminação natural não é suficiente nos períodos diurnos como nos casos de chuva forte ou nevoeiro intenso, em que pode ser necessária iluminação artificial. Isto é uma vantagem em relação aos relógios astronómicos uma vez que os mesmos apenas conseguem detetar a hora de nascer e pôr do sol através de fórmulas astronómicas.

O seu funcionamento é relativamente simples e o sistema possui uma célula fotoelétrica que reage à mudança de luminosidade, ligando ou desligando a iluminação conforme os limites estipulados.

3.1.2 Sistemas Autónomos Inteligentes

3.1.2.1 Reguladores de Fluxo

Os Reguladores de Fluxo são dispositivos que permitem a regulação da intensidade luminosa em períodos de menor atividade. São um mecanismo que diminui automaticamente o fluxo luminoso (quantidade de luz) emitido pela fonte de luz e que origina uma redução do consumo de energia durante esse mesmo período. Para tornar este sistema mais eficiente, podem ser incorporados sensores de deteção de movimento ou de presença para detetar os períodos de menor atividade, ou seja, os períodos em que é possível diminuir o fluxo luminoso, de forma mais eficaz. A regulação do fluxo luminoso pode ser conseguida através de balastros eletrónicos (reguláveis) ou através de reguladores de tensão (autotransformadores). Os reguladores de fluxo podem também ser incorporados em sistemas de telegestão.

3.1.2.2 Sistemas de telegestão

Os sistemas de telegestão são ferramentas usadas para controlo e supervisão das redes de Iluminação Pública. Estes sistemas permitem gerir remotamente as luminárias fazendo uso dos parâmetros operacionais e oferecem uma nova forma de uso de energia de forma eficiente. Um sistema de telegestão pode incluir todos os outros sistemas abordados anteriormente. Este tipo de sistema tem como ponto negativo os custos de implementação, mas possui muitos benefícios:

- Redução dos custos de exploração;
- Uso racional e eficiente de energia;
- Melhor qualidade de serviço;
- Maior eficiência na rede com possibilidade de adaptação às necessidades de cada momento;

Comparação sistemas de controlo e gestão iluminação pública				
Característica	Relógio Astronómico	Sensores Crepusculares	Reguladores de Fluxo	Sistemas de telegestão
Função ON/OFF	✓	✓	✓	✓
Programação (horário funcionamento)	✓		✓	✓
Validação iluminação natural (saber se é necessário ligar ou desligar)		✓		✓
Controlo da intensidade luminosa			✓	✓
Uso racional de energia				✓
Recolha de informação				✓
Adaptação às necessidades de cada momento		✓	✓	✓
Diminuição das emissões de CO2	✓	✓	✓	✓
Deteção de falhas			✓	✓
Economia de energia	✓	✓	✓	✓
Tipo de Economia de energia	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto

Tabela 6: Comparação sistemas de controlo e gestão iluminação pública.

- Capacidade de adaptação do fluxo luminoso em função da iluminação natural;
- Controlo do tempo de vida dos pontos de luz e localização de falhas;
- Diminuição das emissões de CO2.

3.2 Casos de estudo

A modernização das infraestruturas e sistemas relacionados com as redes de distribuição de iluminação pública são um ponto fulcral para atingir as metas estipuladas. Posto isto o controlo inteligente da iluminação na área de iluminação pública é então um elemento-chave para alcançar a sustentabilidade através da redução e uso responsável de energia e redução dos gases de efeito estufa. As soluções de iluminação inteligente tornaram o controlo da iluminação mais dinâmico, interativo e adaptável às circunstâncias e a introdução da tecnologia LED na iluminação pública permitiu uma revolução no controlo da mesma. O uso de soluções de controlo de iluminação inteligente baseados na tecnologia LED possui 3 grandes benefícios em comparação com outros sistemas de iluminação tradicionais [27]:

- Maior eficiência: a combinação de soluções de controlo inteligente de iluminação com tecnologia LED permite obter economias de energia entre 40% e 70% em comparação com as tecnologias convencionais, e uma redução semelhante em termos da taxa de carbono;

- Maior controlo da rede e gestão aprimorada: controlo total da rede de iluminação com benefícios para o desempenho da mesma, permitindo adaptação às necessidades de cada momento (exemplo: adaptação do fluxo luminoso em função da iluminação natural);
- Durabilidade: a tecnologia LED possui um tempo médio de vida entre 50 000 e 100 000 horas, podendo ser prolongada aquando do uso conjunto com sistemas de controlo inteligentes.

Em teoria estes sistemas possuem grandes benefícios, mas para a sua implementação prática é necessário ter em consideração algumas características relacionadas com o consumo de energia, a interação com o sistema e o orçamento para desenvolvimento. Na procura de novas soluções é ainda preciso ter em conta a segurança e o conforto dos cidadãos (sejam eles pedestres ou condutores). Por outro lado, também é necessário ter em consideração, o ambiente físico em que o sistema deve ser implementado. Ainda relacionado com o ambiente deve ser tido em consideração as condições de iluminação, sistema de iluminação artificial ou a luz natural, e as condições climatéricas. Como já referido anteriormente, existe ainda legislação que deve ser cumprida como por exemplo a norma EN 13201 que apresenta os standards para a iluminação pública [11].

Tendo em consideração toda a relevância desta área para um uso eficiente das fontes de energia, o interesse pela mesma aumentou tendo sido realizados diversos estudos relacionados com a implementação de sistemas de controlo inteligente na iluminação com diferentes abordagens. O objetivo principal de todos os estudos passa por reduzir o consumo de energia elétrica utilizada pela iluminação pública e reduzir a poluição causada pelo consumo da mesma. A grande variedade de casos de estudo faz com que diferentes estudos tenham diferentes prioridades:

- Em [6, 8, 31] a prioridade é o custo de implementação onde é avaliado o custo e o benefício do sistema implementado;
- Em [7, 11, 32, 33] é priorizada a otimização do consumo.

Além disso os casos de estudo diferem nas abordagens apresentadas para atingir os mesmos objetivos:

- Em [34] é apresentada uma solução de um sistema de iluminação baseado em energia

solar como fonte primária, e baterias como fonte secundária, utilizando tecnologia LED como fonte de iluminação.

- Em [31] foi projetado um dispositivo de iluminação para adaptar as infraestruturas de iluminação existentes para implementação de tecnologia LED;
- Em [33] o controlo é realizado através de um relógio astronómico. O sistema permite regular até 4 períodos horários com diferentes níveis de luminosidade, tendo em conta o momento da noite. A programação é controlada através de um relógio astronómico que abre e/ou fecha o circuito automaticamente tendo em conta o local da infraestrutura. Este controlo permite alguma economia, mas inferior comparativamente com outros;
- Em [32] é apresentada uma solução de alteração de fluxo luminoso por horários;
- Em [6–8, 11] são utilizados sensores para monitorização e controlo, como por exemplo sensores de deteção de movimento e de luminosidade.

Além dos objetivos, outro fator em comum entre a maioria das abordagens, [6–8, 11, 31, 33, 34], é a utilização de tecnologia LED como fonte de luz devido a todos os seus benefícios relacionados com a eficiência e maior tempo de vida. Este tipo de tecnologia de iluminação apresenta desempenho e benefícios a favor dos objetivos, sendo uma forma de iluminação extremamente eficiente e duradoura.

Como referido anteriormente, diferentes estudos possuem diferentes abordagens para atingir os mesmos objetivos. Em [31] foi projetado um dispositivo de iluminação para adaptar as infraestruturas de iluminação existentes para implementação de tecnologia LED. A principal razão para o desenvolvimento desta abordagem foi o facto de a tecnologia LED obter muitas vantagens em relação a outras fontes de iluminação, mas a tecnologia LED devido a características próprias (por exemplo, a necessidade de um dissipador de calor) não pode ser implementada nas infraestruturas existentes. Tendo em conta estes fatores e de modo a baixar os custos de implementação é desenvolvido um dispositivo que permita adaptar as estruturas existentes ao uso da tecnologia evitando assim gastos na implementação de um sistema de iluminação completo.

A abordagem apresentada em [32] propõe uma solução de economia de energia baseada na gestão de *dimming* da iluminação pública. Esta gestão consiste na alteração do Fluxo luminoso, ou seja, consiste no escurecimento da fonte de luz. Baseia-se na análise da densidade de tráfego em momentos anteriores, sendo o fluxo luminoso ajustado de acordo

com os níveis e horários predefinidos. Nesta solução é ainda integrado um relógio astronômico para ligar e/ou desligar a iluminação de forma automática de acordo com o número de horas de sol. É ainda utilizada uma câmera de vídeo para fazer a monitorização em tempo real, podendo ser visualizadas falhas na iluminação através da mesma.

As abordagens [6–8, 11] apresentam soluções onde são utilizados sensores para o controlo e monitorização do sistema de iluminação. As soluções apresentadas por [6, 7, 11] são semelhantes sendo utilizados sensores de deteção de movimento e de luminosidade. O sistema deverá adaptar de forma inteligente e dinâmica a luminosidade com base no tráfego, utilizando para o efeito os sensores de deteção de movimento, nesta solução a iluminação deverá ligar e/ou desligar de forma autónoma conforme a luminosidade ambiente, através dos sensores de luminosidade.

Em [6, 7] a solução apresentada segue as regras verificadas na figura 12. O sistema desenvolvido possui um microcontrolador que é responsável pelos dispositivos ligados a si. O sensor de luminosidade é responsável por verificar a luminosidade ambiente e caso seja necessário a iluminação artificial deverá ser ativada. Com a iluminação ativada entram em ação os sensores de deteção de movimento que são responsáveis pela deteção de veículos ou pedestres. Quando este sensor deteta algum movimento, a iluminação é adaptada. Foi definida a variável n para referir o sensor atual, sendo $n-1$ o sensor anterior e $n+1$ o sensor seguinte. Posto isto, a iluminação é adaptada de seguinte forma:

- Sensor n obstruído: 100% brilho nos pontos de luz que contêm os sensores n e $n+1$
- Sensor n obstruído: 25% brilho no ponto de luz que contêm o sensor $n-1$

A solução proposta pretende introduzir um sistema no qual as luzes LED sejam ativadas sempre que a luminosidade ambiente se encontre abaixo de um certo limite (como por exemplo, fenómenos meteorológicos, ou em alturas de nevoeiro intenso) e sejam desativadas caso contrário, e que seja possível identificar períodos de menor atividade para que seja possível realizar a alteração do fluxo luminoso de modo a economizar energia [6, 7].

Em [8] é apresentada uma solução idêntica à anterior, mas é utilizado apenas um sensor de deteção de movimento, ou seja, o sistema deverá adaptar a luminosidade com base na presença ou não de veículos ou pedestres, mas desta vez apenas utilizando sensores de deteção de movimento. Este tipo de solução apresenta um baixo custo de implementação e

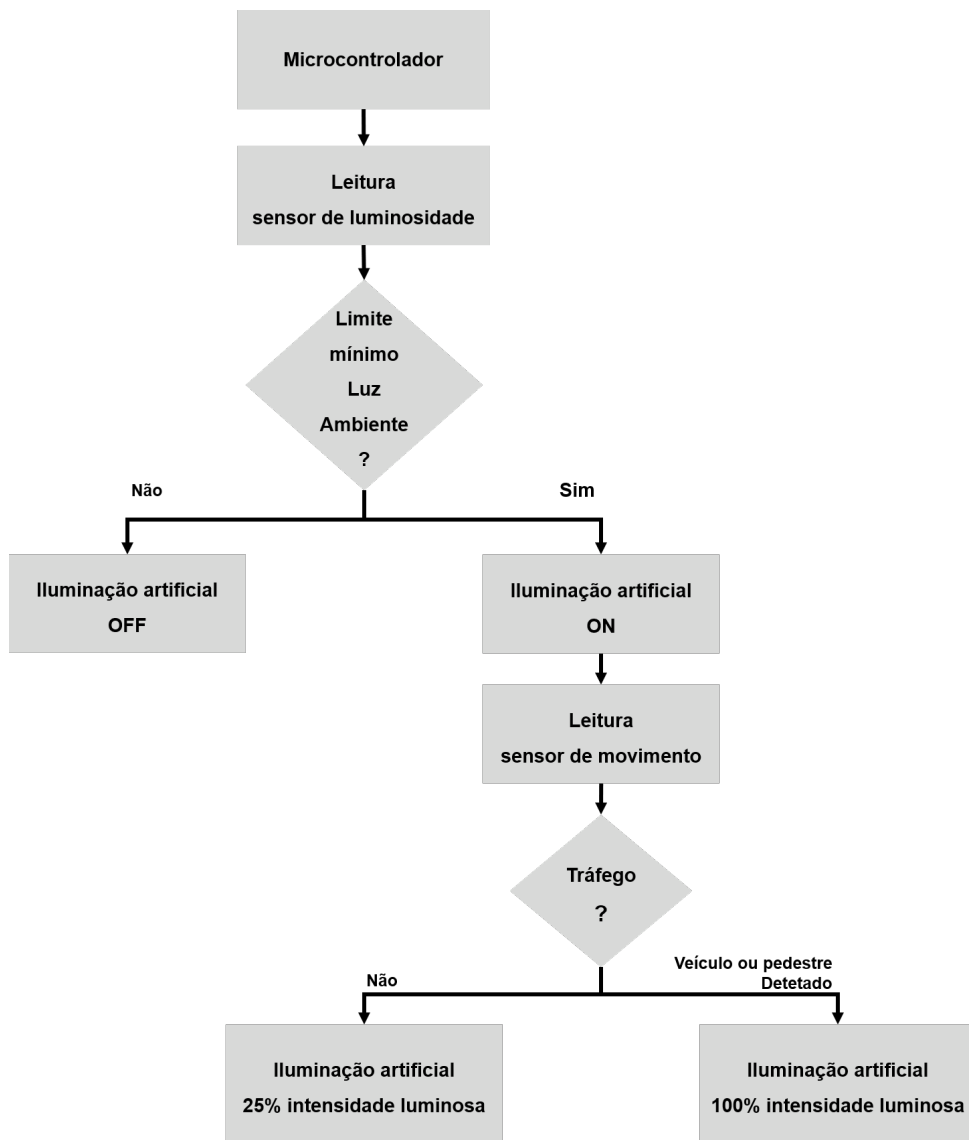


Figura 12: *Workflow* das abordagens apresentadas em [6,7]. Fonte: [6]

permite reduzir o desperdício de energia em períodos de menor atividade, no entanto, não permite que sejam detetadas situações em que é necessária iluminação artificial como por exemplo em períodos de nevoeiro, sendo este facto uma desvantagem para a abordagem apresentada anteriormente. A solução desenvolvida segue as regras verificadas na Figura 13, onde o sensor de deteção de movimento que é responsável pela deteção de veículos ou pedestres, para que seja possível realizar a alteração do fluxo luminoso.

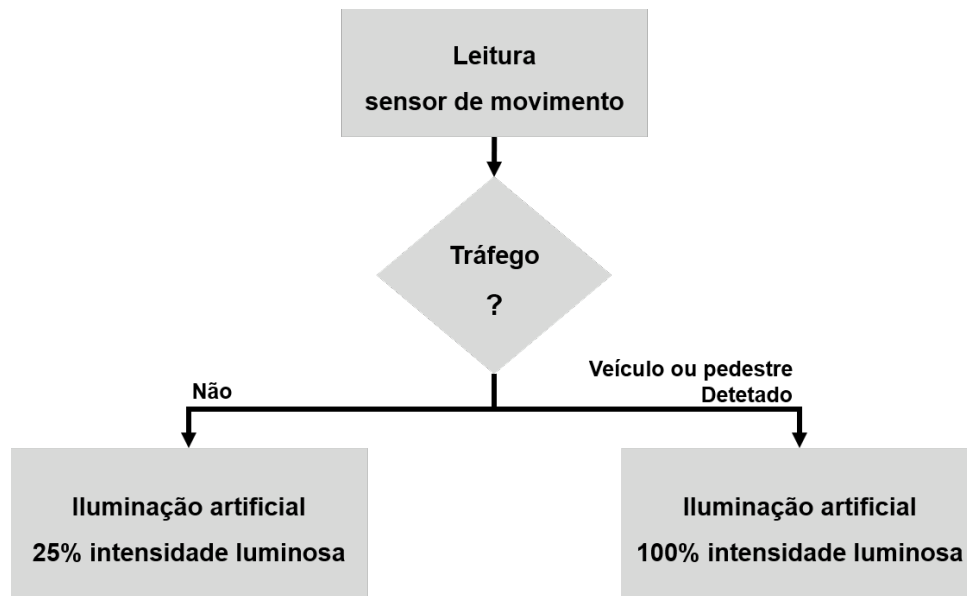


Figura 13: *Workflow* da abordagem apresentada em [8]. Fonte: [8]

Em termos de poupanças e resultados, e tendo em consideração as diferentes abordagens analisadas em [11] e verificadas na tabela 7, é possível concluir que o combinar dos dois sensores: luminosidade e movimento, para deteção de tráfego (pedestres ou veículos) é a abordagem mais eficiente. Todas as abordagens permitem melhorar a eficiência embora algumas consigam obter melhores resultados do que outras. Através da análise da tabela 7, é possível concluir que a abordagem de combinação de sensores permite obter uma maior economia de consumo enquanto que a abordagem de gestão e controlo autónoma, através da utilização de um relógio astronómico, permite uma menor economia de consumo. Os resultados presentes na tabela 7 resultam da análise das abordagens e dos cenários realizados no caso de estudo apresentado em [11]:

- Controlo autónomo através da utilização relógio astronómico (primeira linha da tabela);
- Controlo através de um sensor de luminosidade, permitindo luminosidade adaptável de forma automatizada que permite ter o mínimo necessário de iluminação artificial, melhor do que o modo baseado em relógio (segunda linha da tabela);

Abordagem	Consumo (W/dia)
Controlo autónomo utilizando relógio astronómico	278.1900
Iluminação artificial adaptável – sensor de luminosidade	196.000
Iluminação artificial adaptável – sensor de deteção de movimento	0.0042
Iluminação artificial adaptável – combinação sensor de luminosidade e movimento	0.0012

Tabela 7: Resultados da análise das abordagens e dos cenários realizados no caso de estudo [11]

- Controlo através de um sensor de deteção de movimento com o objetivo de detetar pedestres ou veículos, que permite que a iluminação artificial se adapte à presença ou não de tráfego, regulando o fluxo das luminárias (terceira linha da tabela);
- Combinação dos dois sensores: luminosidade e movimento, sendo esta a abordagem mais eficiente de todas (quarta linha da tabela).

As soluções apresentadas anteriormente apresentam economias significativas de poupança de energia, mas todas elas são soluções globais que não têm em consideração as particularidades individuais de cada luminária nem as características do ambiente onde a mesma está localizada.

Capítulo 4

Trabalho Desenvolvido

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação enquadra-se na bolsa de investigação no âmbito do projeto 3SLM, projeto este que tem como objetivo desenvolver um sistema inteligente de gestão de energia elétrica a fim de garantir uma gestão adequada e a otimização dessa mesma energia.

Após a análise do estado de arte foi possível retirar algumas lições e orientações de possíveis abordagens que podiam ser implementadas para atingir os nossos objetivos. Com esta análise, foi possível verificar que na prática, a implementação de abordagens de gestão inteligente de iluminação contribui para uma economia de energia e conseqüentemente para uma diminuição dos custos associados ao consumo.

Uma outra conclusão que foi possível retirar é que as abordagens por mais diferentes que possam ser, apresentam soluções globais que não têm em consideração as particularidades individuais de cada luminária, nem as características do ambiente onde a mesma está localizada, ou seja apresentam soluções onde todas as luminárias do sistema de iluminação artificial são geridas da mesma forma. No entanto, acreditamos que a economia de energia pode ser superior através de uma gestão individual de cada luminária, tendo em conta as suas características e o meio em que está inserida (por exemplo, iluminação ambiente e iluminação natural), ou seja, ajustar a iluminação artificial individualmente por luminária. Por exemplo, no caso de existência de luminárias em áreas com grande luminosidade por parte de terceiros, como por exemplo *outdoors* de anúncios com iluminação, ou mesmo em dias de lua cheia, nestes casos a iluminação pode ser ajustada nessas luminárias para permitir economizar energia. Tudo isto tendo sempre em consideração as condições mínimas necessárias para uma boa

iluminação e a segurança e conforto dos cidadãos.

Posto isto, a nossa solução para gestão de iluminação pública segue uma abordagem centrada no ser humano e baseada na gestão inteligente. A solução abrange diferentes aspetos sociais e económicos, se por um lado pretendemos reduzir o consumo e conseqüentemente os custos associados, por outro é necessário ter em consideração a segurança e conforto dos cidadãos bem como as normas e regulamentação existente. A solução que apresentamos é um sistema de gestão de iluminação pública capaz de:

- Recolher dados em tempo real do funcionamento das luminárias;
- Monitorizar o consumo e prever o consumo de energia de cada luminária;
- Ligar e/ou desligar a rede de iluminação de forma autónoma tendo em consideração a iluminação ambiente (possível através da utilização de um sensor de luminosidade);
- Controlar o fluxo luminoso, *dimming*, das luminárias tendo em consideração a iluminação ambiente (possível através da utilização de um sensor de luminosidade);
- Detetar falhas nas luminárias.

4.1 Aquisição dos dados

Ao longo do estudo foram utilizados dados recolhidos de duas infraestruturas de iluminação pública diferentes. O primeiro *dataset* é proveniente de uma rede de iluminação pública de 305 luminárias localizadas no município de Cascais. Os dados foram armazenados com uma frequência de 5 minutos, todos os dias das 17:00 às 08:00 durante um período de quatro meses, entre 5 de setembro de 2017 e 3 de janeiro de 2018. O segundo *dataset* resulta da recolha de dados de duas luminárias instaladas na nossa instituição, Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG, P.Porto), sendo esta uma instalação para desenvolvimento e testes. Este conjunto de duas luminárias podem ser controladas pela equipa de pesquisa e desenvolvimento e permitem recolher dados de diferentes cenários e testar diferentes modelos de gestão.

Todos os dados utilizados e recolhidos ao longo desta dissertação são provenientes de luminárias fabricadas pela ARQUILED mais especificamente o modelo ARQUICITY R1, a informação

sobre esta luminária pode ser encontrada na secção 1.1. Este modelo de luminárias permite a coleção de diferentes tipos de dados relacionados com a operação da mesma em tempo real. Ambos os *datasets* possuem informação sobre a operação das luminárias e são armazenadas em intervalos de 5 minutos, estes dados incluem tensão instantânea (V), temperatura da luminária (°C), potência instantânea (W), energia acumulada (Wh), tempo de atividade (s) ou *dimming* (0% - 100%). A figura 15 apresenta os dados recolhidos.

Para que fosse possível obter conhecimento sobre a operação das luminárias, era necessário realizar uma análise visual dos dados. Antes da realização da análise dos dados foi necessário realizar uma limpeza ao *dataset*. Para que da análise pudesse resultar a maior variedade de conhecimento possível foi utilizado o *dataset* que contém os dados da rede de 305 luminárias do município de Cascais pois os mesmos descrevem uma configuração real de iluminação. Foi então realizada uma limpeza inicial aos dados deste dataset, e esta limpeza foi necessária pois o modelo de luminárias utilizadas neste estudo têm um tempo de aquecimento de 1 a 4 minutos, período este em que os valores lidos não correspondem à sua operação regular. Também existem casos em que os dados foram recolhidos de luminárias que se encontravam desligadas (por exemplo, estavam desligadas para manutenção) sendo estas instâncias removidas pois também não representavam a operação normal dessas luminárias.

Ainda no processo de limpeza, foi possível reparar que os dados relacionados com a operação das luminárias foram recolhidos com a frequência de 5 minutos, no entanto a cada nova leitura era gerada e armazenada uma nova instância para cada uma das variáveis recolhidas por cada luminária, como se pode verificar na figura 14 (cima). No formato em que os dados se encontravam armazenados existia uma elevada redundância de informação desnecessária, e que tornava a análise destes dados, de forma a descobrir possíveis relações entre as variáveis, muito difícil e complexa. Foi então realizada uma transformação na forma como os dados se encontravam armazenados, de forma a que os dados recolhidos no mesmo momento ficassem armazenados no mesmo documento, tal como ilustrado na figura 14 (baixo).

Após a limpeza inicial e transformação do dataset, ou seja, limpeza das instâncias com dados inválidos e/ou dados em falta e alteração da forma como os dados se encontravam armazenados, resultou um *dataset* descrevendo mais de 100 000 horas de operação das luminárias.

Os dados recolhidos e armazenados relacionados com a operação das luminárias, localizadas na nossa organização, para efeitos de testes passaram também pelo mesmo processo de limpeza e transformação.

id	data_utc	log_dt	gateway_id	gateway_id_decimal	logical_gateway_id	object_member	value	unit_measure_id
5a7030c89bdb7c6b606f4be7	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	uptime	57010	58
5a7030c89bdb7c6b606f4be6	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	energy	18516	1
5a7030c89bdb7c6b606f4be5	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	pfactor	977	9
5a7030c89bdb7c6b606f4be4	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	led_usage	194722	6
5a7030c89bdb7c6b606f4be3	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	voltage	23383	4
5a7030c89bdb7c6b606f4be2	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	time_usage	136812	57
5a7030c89bdb7c6b606f4be1	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	temperature	32	3
5a7030c89bdb7c6b606f4be0	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	dimming	80	6
5a7030c89bdb7c6b606f4bdf	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	signal	100	6
5a7030c89bdb7c6b606f4bde	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	power	1100	2
5a7030c89bdb7c6b606f4bdd	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	led_average	83	6
5a7030c89bdb7c6b606f4bdc	1514968836	2018-01-03T08:40:36.000Z	71	0	91	energy_usage	273482	1
5a7030c89bdb7c6b606f4bf3	1514968829	2018-01-03T08:40:29.000Z	71	0	91	power	1099	2
5a7030c89bdb7c6b606f4bf2	1514968829	2018-01-03T08:40:29.000Z	71	0	91	led_usage	207261	6
5a7030c89bdb7c6b606f4bf1	1514968829	2018-01-03T08:40:29.000Z	71	0	91	temperature	33	3

id	log_dt	device_id	voltage	temperature	power	acc_energy	uptime	dimming	meteo
5af17fde81fcb9cb8fb02768	2017-09-05T18:53:11.000Z	201700240	22702	28	1114	108	1812	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb0276c	2017-09-05T18:53:11.000Z	201700440	22556	28	1098	108	1812	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02770	2017-09-05T18:53:12.000Z	201700218	23129	30	1109	110	3122	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02771	2017-09-05T18:53:14.000Z	201700263	21331	28	1129	120	1810	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02772	2017-09-05T18:53:16.000Z	201700226	22794	28	1110	108	2108	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02773	2017-09-05T18:53:16.000Z	201700333	22625	28	1093	108	2108	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02774	2017-09-05T18:53:16.000Z	201700435	23969	28	1120	120	2108	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02775	2017-09-05T18:53:18.000Z	201700371	23563	28	1110	108	2110	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02776	2017-09-05T18:53:18.000Z	201700465	23323	27	1113	99	2110	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02777	2017-09-05T18:53:19.000Z	201700223	22984	29	1108	108	2112	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02778	2017-09-05T18:53:19.000Z	201700317	23993	29	1107	108	2110	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb02779	2017-09-05T18:53:19.000Z	201700322	23275	28	1114	120	1868	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb0277a	2017-09-05T18:53:19.000Z	201700327	22451	28	1115	120	1868	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb0277b	2017-09-05T18:53:19.000Z	201700360	22787	29	1105	110	2110	80	{ 12 fields }
5af17fde81fcb9cb8fb0277c	2017-09-05T18:53:19.000Z	201700422	23535	28	1119	120	2112	80	{ 12 fields }

Figura 14: Exemplo estrutura dos dados antes da transformação (cima) e exemplo da estrutura dos dados depois da transformação (baixo).

Por fim, com o objetivo de estudar a influência climática na eficiência, também foram recolhidos dados de uma estação meteorológica local. Os dados incluem temperatura do ar (°C), humidade (%), velocidade do vento (m/s), direção do vento (graus), rajada de vento (m/s), pressão (mbar), radiação solar (W/m2) e chuva (mm/h). Assim, para cada instância de dados de cada luminária, há um dado meteorológico associado, o que permitirá estudar a influência de fatores externos. Os dados meteorológicos foram integrados nos dados que contêm a informação das luminárias tendo em conta o momento em que ambos foram recolhidos. A figura 15 apresenta os dados armazenados.

Foi então elaborada uma análise visual dos dados que permitiu a aquisição de conhecimentos sobre a operação da rede de iluminação, esta análise será descrita na seção a seguir.

4.2 Análise Exploratória

Após toda a fase de limpeza e transformação dos dados recolhidos, foi realizada uma análise detalhada dos mesmos. Como referido anteriormente, um dos principais objetivos desta solução é determinar se há vantagens na gestão das luminárias de forma individual, princi-

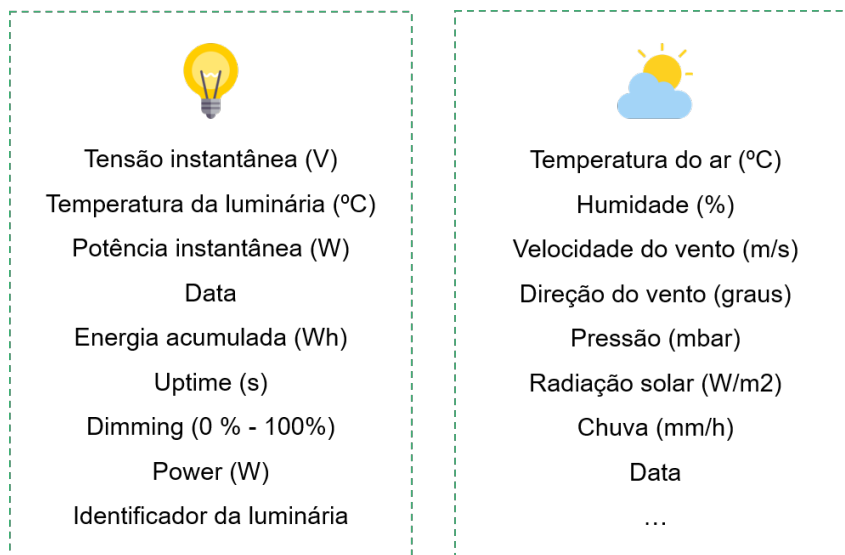


Figura 15: Dados recolhidos das luminárias (esquerda) e dados meteorológicos (direita).

palmente relacionadas com a eficiência energética, mas também com a redução de consumo e custos. Nesse sentido foi então elaborada uma análise visual dos dados que permitiu a aquisição de conhecimento sobre a operação da rede e onde foram observadas diferenças na operação das luminárias, as quais nos focamos, pois, as condições de operação das luminárias influenciam a sua vida útil.

Começamos por analisar o *dataset* que contém os dados da rede de 305 luminárias do município de Cascais pois estes dados descrevem uma configuração real de iluminação pública.

A Figura 16 apresenta a distribuição da variável *power* de 47 das 305 luminárias, durante os 4 meses em que os dados foram recolhidos. Na figura apenas são apresentados dados de 47 das luminárias para facilitar a legibilidade e perceção da mesma visto que se na figura fossem apresentados os dados de todas a luminárias seria impossível a visualização da figura. No entanto, através da análise da distribuição dos dados é possível verificar a existência de diferenças na operação das diferentes luminárias.

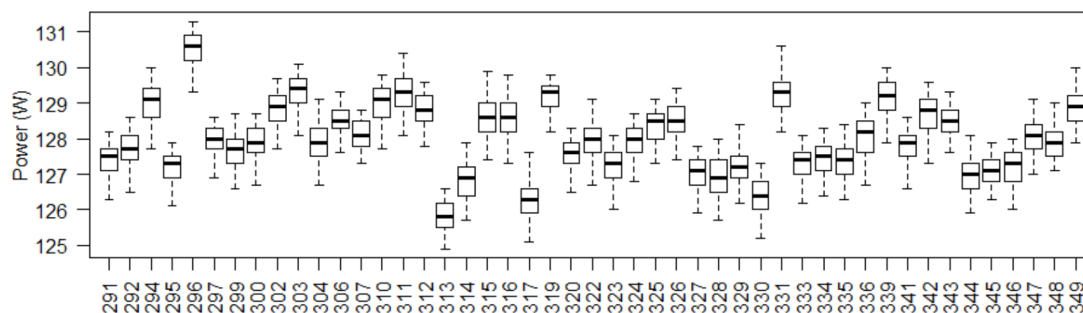


Figura 16: Distribuição da variável *power* em 47 das luminárias (15%, seleccionadas aleatoriamente) ao longo dos 4 meses de recolha de dados (os *outliers* foram removidos para maior clareza).

Numa abordagem semelhante de análise dos dados foi realizada a análise da variação da temperatura de operação das luminárias que apresenta resultados semelhantes. A Figura 17 mostra como a temperatura de trabalho varia entre as diferentes luminárias com algumas luminárias específicas a registar temperaturas significativamente mais alta. Essas luminárias possuem um risco maior de falha e/ou podem ter uma vida útil mais curta. Por exemplo, e como já referido anteriormente, a temperatura do *chip* do LED tem uma proporção inversa com a vida útil do mesmo, ou seja, uma temperatura de trabalho elevada temporária ou prolongada (por exemplo, devido a um dissipador de calor defeituoso) pode causar problemas ao LED ou mesmo a sua falha por completo.

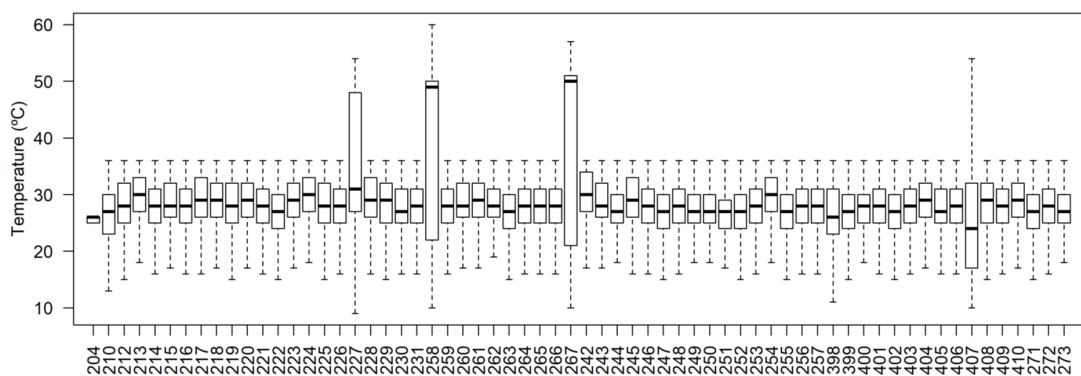


Figura 17: Distribuição da temperatura de trabalho de 65 luminárias (21%, seleccionadas aleatoriamente) ao longo dos 4 meses de recolha de dados (os *outliers* foram removidos para maior clareza).

A Figura 18 apresenta uma visualização diferente dos dados, através da combinação de diferentes variáveis, *dimming*, temperatura e consumo de energia (com código de cores). A primeira conclusão que se pode tirar é que o consumo de energia aumenta juntamente com o aumento do *dimming* (ou seja, de baixo para cima na Figura). No entanto, é interessante notar que o consumo de energia não depende apenas do *dimming*. Ou seja, para o mesmo valor de *dimming*, há variações no consumo de energia, isto acontece nos vários intervalos, mas de uma forma mais acentuada entre os 80% e 90% de *dimming*. Neste intervalo, parece que valores mais altos de temperatura estão associados a menores consumos de energia, o que pode ser relevante para a otimização do consumo de energia, uma vez que cerca de 90% dos dados que foram recolhidos são de luminárias configuradas com *dimming* nessa faixa, ou seja, este é o cenário mais frequente nessas luminárias.

Outro fator que pode influenciar a temperatura de operação das luminárias é a temperatura ambiente, e visto que os dados relacionados com a operação das luminárias foram integrados com dados meteorológicos, é possível verificar se existe alguma relação. Através da análise desses dados é possível verificar que a temperatura ambiente é um fator que influencia a temperatura de operação das luminárias. De acordo com os dados, a correlação entre a

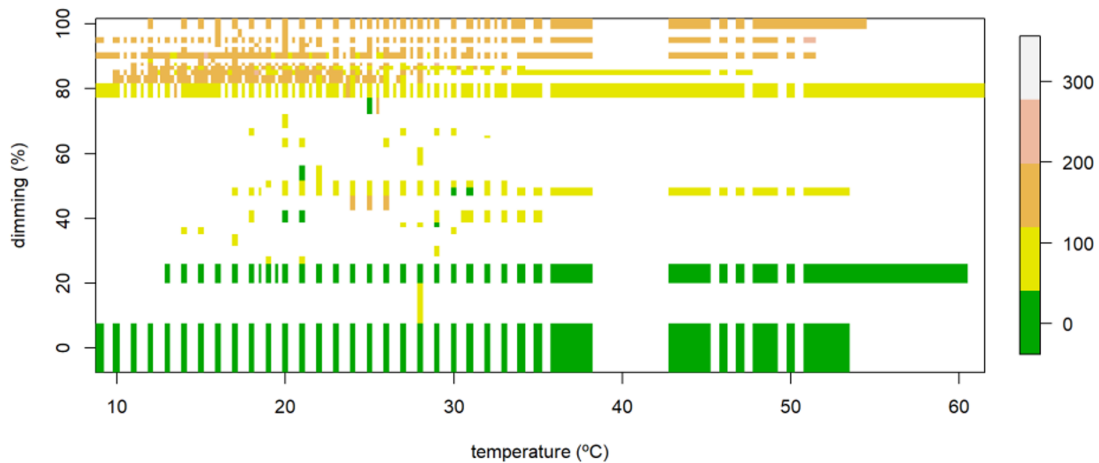


Figura 18: *Heatmap* que mostra a relação entre *dimming*, temperatura de trabalho e consumo de energia.

temperatura ambiente e a temperatura de trabalho das luminárias é 0,72. A mesma correlação pode ser visível na Figura 19.

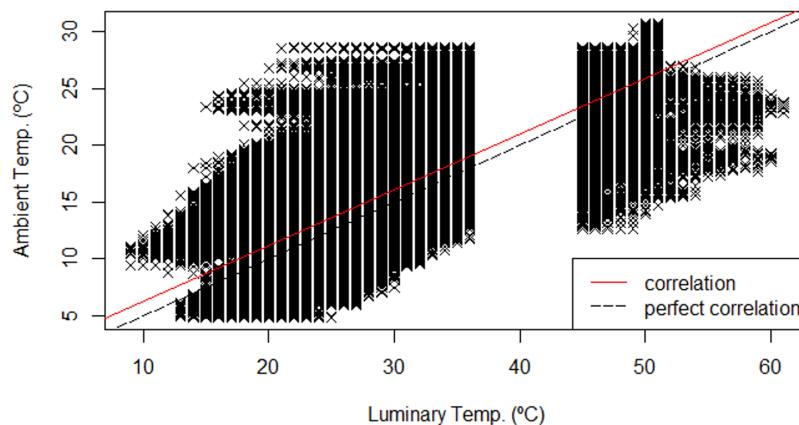


Figura 19: Gráfico de dispersão da temperatura ambiente (°C) em relação com temperatura de operação da luminária (°C).

Após a análise dos dados relacionados com a operação das luminárias da configuração real do município foi realizada a análise dos dados das duas luminárias utilizadas para teste. Começamos pela análise do consumo de energia durante vários dias, para as duas luminárias no cenário de teste. A Figura 20 mostra a evolução do consumo de energia em cada uma das luminárias durante as 10 horas em que esteve, em três dias consecutivos, entre 3 de maio de 2018 e 6 de maio de 2018. Uma primeira conclusão que é possível extrair da análise da figura é que o consumo de energia em cada um dos ciclos não é constante para cada luminária nem é semelhante entre as luminárias (embora o *dimming* seja constante).

A Figura 21 mostra a distribuição dos dados para as mesmas luminárias durante o período de uma semana, entre 1º de maio de 2018 e 8 de maio de 2018. Mostra que o consumo de energia da luminária com o id 8383 é consistentemente maior do que a outra luminária ao

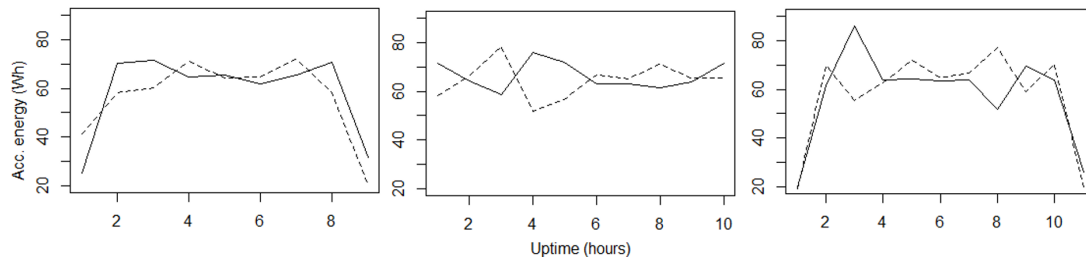


Figura 20: Consumo de energia das duas luminárias da configuração de testes, localizadas na nossa escola, das três noites entre 3 e 6 de maio de 2018, respectivamente da esquerda para a direita.

Luminária	média	mediana	desvio padrão
8380	6.30	6	1.03
8383	6.42	6.6	1.38

Tabela 8: Diferenças entre o consumo das duas luminárias (em Watt-Hora) na configuração de teste.

longo desse período. A Tabela 8 mostra que os valores da média, mediana e desvio padrão são também superiores nesta luminária. As diferenças na distribuição dos dados são estatisticamente significativas (p -value = 0.000143). O teste que permitiu concluir esta diferença foi o teste de *Kolmogorov–Smirnov*. O teste de *Kolmogorov–Smirnov* é um teste não paramétrico que tenta determinar se dois conjuntos de dados diferem significativamente. Este teste tem como objetivo averiguar se uma amostra pode ser considerada como proveniente de uma população com uma determinada distribuição.

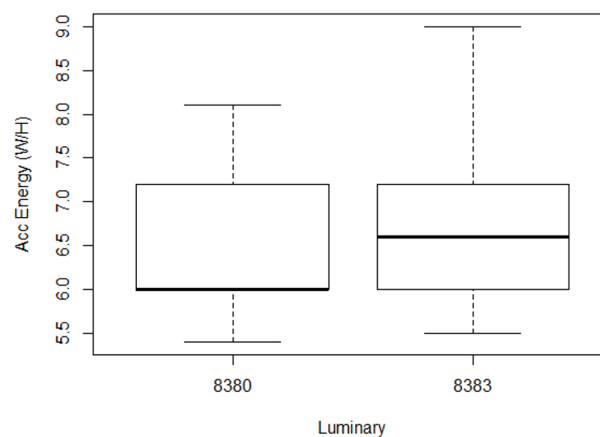


Figura 21: Distribuição do consumo de energia durante uma semana, entre maio, para as duas luminárias no cenário de teste.

Embora, até certo ponto, as diferenças verificadas possam ser atribuídas às propriedades físicas de cada luminária ou até mesmo a algum defeito de fabrico das mesmas, não é propósito deste trabalho explicar essas diferenças ou entender o como e/ou porquê de acontecerem. Pelo contrário, reconhecemos a existência dessas diferenças e propomos um método para a deteção de comportamentos operacionais anormais, que tem em consideração o comportamento normal das luminárias, bem como o de cada luminária em específico, que será abordado

de forma mais detalhada nas seções abaixo.

4.3 Análise e Previsão de parâmetros de operação

Com o objetivo de prever o consumo de energia, foi treinado um modelo de previsão de consumo tendo o mesmo o consumo de energia como variável de resposta. O objetivo deste modelo é prever o consumo de energia para uma determinada luminária, sob determinadas circunstâncias (por exemplo, condições meteorológicas, tempo de atividade, *dimming*). Durante esta análise e para o treino dos modelos foi utilizado para o efeito o *dataset* com os dados de operação das luminárias de Cascais.

Na Figura 22 está representada a importância relativa de cada variável na previsão do consumo de energia. De acordo com os resultados, a variável com maior importância na previsão do consumo de energia é o identificador único da luminária (*device_id*), seguido pelo *dimming*, tempo de atividade (*uptime*), data e temperatura (tanto a temperatura de operação como temperatura do ar). Primeiro, é importante observar que a alta importância da data poderá estar relacionada com a temperatura, provavelmente pela temperatura ser superior durante o dia em relação à temperatura durante a noite. Através destes resultados podemos concluir que o consumo de energia varia de luminária para luminária. No entanto estes resultados devem ser interpretados com precaução pois não era esperada uma relevância tão alta da variável *device_id*, especialmente quando comparada ao *dimming*. Um facto que pode explicar este fenómeno é a baixa variação da variável de *dimming*: como já identificado anteriormente 90% dos dados que foram recolhidos apresentam valores de *dimming* entre 80% e 90%.

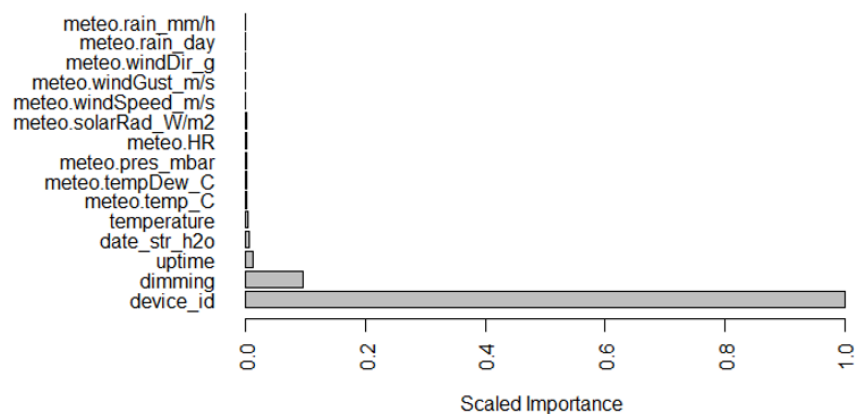


Figura 22: Importância relativa de cada uma das variáveis na previsão do consumo de energia.

Foram ainda definidos e treinados outros modelos, como o modelo de previsão de tempera-

tura de trabalho da luminária. A Figura 23 mostra as variáveis mais importantes para este modelo. É possível verificar que as variáveis mais importantes são a data e a temperatura ambiente. Como afirmado e referido anteriormente, essa importância da variável da temperatura ambiente já era esperada, pois as duas variáveis estão relacionadas. Os resultados também apontam que outras variáveis ambientais têm alguma importância. É interessante notar novamente que o identificador único de cada luminária é uma das variáveis relevantes para determinar neste caso a temperatura de trabalho das luminárias. Isto mostra mais uma vez a importância das características individuais das mesmas e acreditamos que isso se deve a fatores como o posicionamento de cada luminária (por exemplo, localização, orientação para o sol).

Com esta análise inicial destes dois modelos podemos comprovar alguns dos conhecimentos retirados do tópico de análise de dados. Especificamente, estes resultados mostram que o consumo de energia varia de luminária para luminária e que o mesmo pode ser influenciado por fatores externos, como a temperatura ambiente. A utilização destes modelos em conjunto com o conhecimento adquirido, podem apoiar o desenvolvimento de estratégias de gestão mais refinadas e detalhadas, de forma a otimizar o consumo de energia de cada luminária.

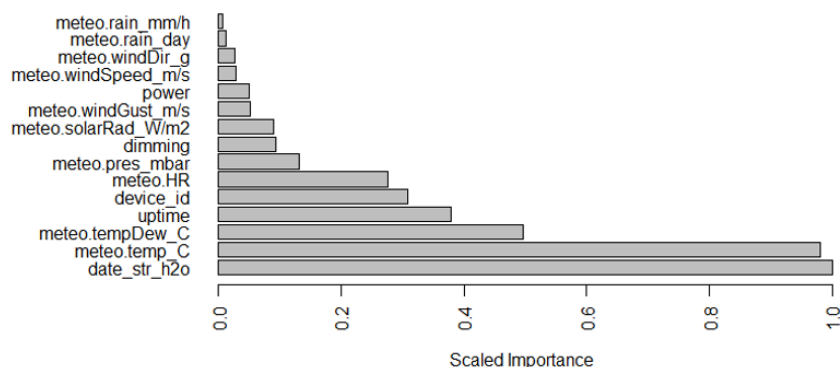


Figura 23: Importância relativa de cada uma das variáveis na previsão da temperatura de operação da luminária.

4.4 Manutenção preventiva

Entendida a abordagem geral da solução proposta, finalizados os processos de limpeza e estruturação dos dados e obtido o conhecimento sobre a operação das redes, estava na altura de explorar esse conhecimento e colocar em prática toda a teoria. Com o conhecimento adquirido, definimos as metodologias e abordagens que deveríamos seguir para alcançar os objetivos e exploramos tudo isso para treinar modelos com o intuito de detetar falhas na operação

das luminárias, tendo em consideração o nível individual de cada luminária. Isto permite uma gestão otimizada e autónoma da rede pública tendo em consideração as características e o ambiente de cada luminária, permitindo ainda identificar as luminárias que aumentaram os custos, de modo a definir estratégias de iluminação mais eficientes para reduzir custos, consumos e ainda as emissões de CO₂ associadas à iluminação pública.

Todos os processos desenvolvidos ao longo do trabalho bem como todas as abordagens, modelos e resultados obtidos serão descritos e explicados de forma mais detalhada nas secções seguintes.

4.4.1 Categorização dos Dados

Para atingir os objetivos delineados foi necessário treinar um modelo capaz de categorizar a operação das luminárias como normal ou anormal. Esta categorização das luminárias como normal ou anormal significa por outras palavras que o modelo deverá ser capaz de identificar se uma luminária está a operar de forma correta ou não. Dessa forma, no caso de uma operação normal, a luminária encontra-se a operar de forma correta e sem qualquer tipo de falha, em caso anormal a luminária apresenta o oposto, operando de forma incorreta ou apresentando algum tipo de falha.

Para isso era necessário um *dataset*, já com os dados categorizados, no entanto o *dataset* original com os dados recolhidos não possui essa informação, uma vez que as luminárias não fornecem informação sobre o seu estado de funcionamento (normal ou anormal). Posto isto era necessário realizar a categorização dos dados que tinham sido recolhidos das luminárias.

Para a categorização dos dados foram idealizadas duas abordagens diferentes, a primeira delas uma abordagem que tem por base os valores normativos das luminárias, sendo definidas regras por um especialista de domínio que definiu os limites para cada variável. A segunda abordagem uma categorização de acordo com o funcionamento normal das luminárias através do cálculo do intervalo interquartil (IQR, do inglês *Interquartile Range*). De seguida ambas as abordagens serão explicadas em mais detalhe.

De novo foi utilizado o *dataset* resultante do processo de limpeza que continha os dados relacionados com a recolha de dados relacionados com a operação das luminárias da iluminação pública do município de Cascais pois os mesmos representam um caso real de iluminação.

Para a primeira abordagem poderia ter sido efetuada uma categorização manual dos dados com a ajuda de especialistas, no entanto, e tendo em consideração a dimensão dos dados recolhidos esta abordagem não era viável. Sendo assim foi pedido a um especialista que definisse regras para facilitar a categorização dos dados. Assim, tendo por base os valores normativos das luminárias fornecidos pelo fabricante, o especialista definiu os limites para cada variável recolhida. Foram ainda identificados alguns pormenores relacionados com a operação das luminárias, como por exemplo momentos em que a operação da rede não era normal (como períodos de manutenção diurna) e ainda os primeiros 5 minutos de dados recolhidos de cada luminária, pois, de acordo com o mesmo, há um pequeno período de aquecimento no qual os valores lidos podem variar de forma anormal.

A categorização relacionada com esta abordagem resultou num total de 55 645 instâncias categorizadas como anormais (cerca de 3% dos dados).

Embora esta abordagem resolva, em parte, o problema não é suficiente pois não considera flutuações de variáveis que diferem significativamente da operação considerada normal de uma luminária. Por exemplo, uma temperatura de 35 °C fica dentro dos limites definidos para esta variável, no entanto este valor pode ser considerado anormal se observado numa luminária que geralmente opera a 30 °C.

Visto a abordagem definida anteriormente não ter em consideração esses pormenores identificados, foi idealizada uma nova abordagem, onde foram adicionadas a cada instância três novas variáveis, duas das quais descrevem se a operação da luminária é considerada normal ou anormal para as variáveis potência e temperatura. A terceira variável é uma disjunção lógica das duas primeiras, ou seja, se as ambas tiverem o valor normal, a terceira variável terá o mesmo valor. Esta terceira variável representa a nova abordagem e se a luminária está a funcionar corretamente ou não. De forma a encontrar os *outliers*, ou seja, encontrar os valores de funcionamento anormal, foi calculado o intervalo interquartil (IQR) para as duas variáveis (potência e temperatura). Utilizando a Regra Interquartil para *outliers* os valores abaixo de $Q1 - 1.5 \times IQR$ e os valores acima de $Q3 + 1.5 \times IQR$ foram categorizadas com o valor anormal [35]. Posto isto, dado uma instância de dados, a mesma pode ser considerada como funcionamento “normal” ou não dependendo do número de variáveis que respeitem os limites superiores e inferiores do que é considerado normal.

Como resultado desta abordagem 94 125 instâncias foram categorizadas como anormais para a variável temperatura e 2 516 foram categorizadas como anormais considerando a potência.

Finalmente, 96 478 instâncias são globalmente marcadas como anormais (ocorre quando qualquer uma das duas variáveis tem o valor anormal), o que representa cerca de 5% dos dados. Esta percentagem, como esperado, é superior à percentagem de instâncias categorizadas como anormais no método anterior.

4.4.2 Treino dos Modelos

Dando continuação ao processo realizado e às abordagens acima demonstradas foram treinados dois modelos de deteção do normal funcionamento das luminárias, explicados com mais detalhe ao longo desta secção.

Foi utilizado o algoritmo *Distributed Random Forest* (DRF) para o treino de ambos os modelos, este é um algoritmo normalmente muito preciso e que lida de forma eficiente com grandes conjuntos de dados. O algoritmo DRF gera um grupo de árvores de decisão (*forest*), em vez de uma única árvore (*tree*). Embora cada uma dessas árvores separadas apresenta uma aprendizagem fraca, o uso combinado das mesmas permite melhores resultados do que o uso de uma única. Para cada modelo foram treinadas cinquenta árvores, cada uma com uma profundidade máxima de 20 níveis. Cada árvore foi treinada com 60% das variáveis, selecionadas aleatoriamente. O resultado final da classificação é a previsão média de todas as árvores [36]. Como resultado da previsão ambos os modelos produzem um valor numérico entre 0 e 1. Caso este valor seja superior ou igual a 0.5 os dados são categorizados como funcionamento normal, caso contrário (inferior a 0.5) os dados são categorizados como funcionamento anormal. A utilização destes modelos permite detetar falhas na operação das luminárias.

Para estimar o desempenho dos modelos foi utilizado o método *K-Fold Cross Validation*, com $K=5$, mas com diferentes variáveis de resposta. O método Cross Validation é um método estatístico para validar a performance de um modelo. Este método utiliza dois tipos de dados - os dados de treino (*training data*) e os dados validação (*validation data*). Neste método a precisão do modelo é validada através da comparação das previsões realizadas pelo modelo com os valores conhecidos. O método Cross Validation está dividido em várias etapas:

1. Dividir o *dataset* em 2 partes:
 - *dataset* treino;
 - *dataset* validação.

2. Treinar o modelo com os dados do dataset treino;
3. Executar o modelo para os dados do *dataset* validação.
4. Validar a performance/precisão do modelo comparando os valores já conhecidos com os valores previstos pelo modelo.

O método *K-Fold Cross Validation* é um tipo de método de Cross Validation, neste método todas as instâncias do *dataset* de treino são utilizadas tanto no treino do modelo como na sua validação. O método *K-Fold Cross Validation* está dividido em várias etapas. Em primeiro lugar o *dataset* deverá ser dividido em K *subdatasets*. A título de exemplo, ao usar $K = 3$, significa que primeiramente o *dataset* será dividido em 3 *subdatasets*. Após a divisão do *dataset* e na primeira iteração, o primeiro *subdataset* é usada para testar o modelo e os restantes são usados para treinar o modelo. Na segunda iteração, o segundo *subdataset* é usado para validação, enquanto os restantes servem como o conjunto de treino. Este processo é repetido até que todos os *subdatasets* tenham sido usados como conjunto de testes, como demonstrado na figura 24. A precisão do modelo resulta do cálculo da média de precisão ao longo das várias iterações.

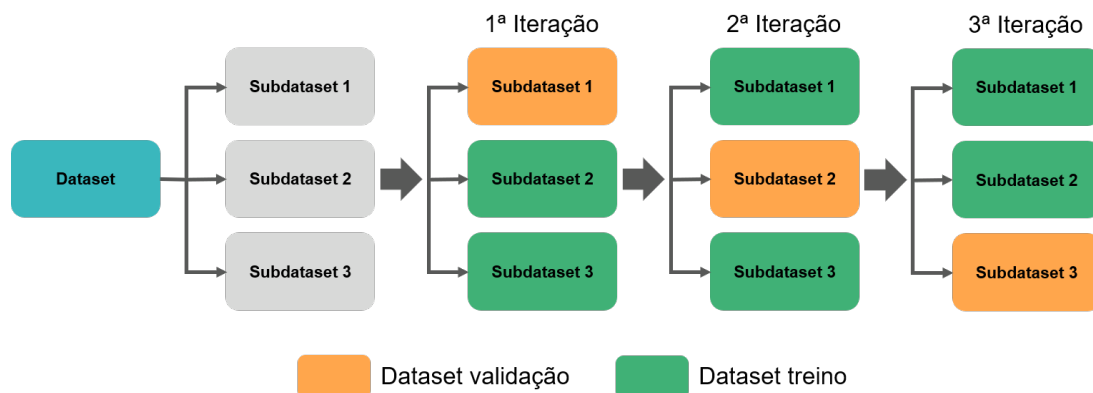


Figura 24: Exemplo do método *K-Fold Cross Validation*, com $K=3$.

Por fim, foi calculada a importância de cada variável no modelo, sendo determinada calculando a sua influência relativa. A metodologia acima descrita foi tida em conta no treino e validação de cada um dos modelos.

Dando continuação às abordagens acima demonstradas relacionadas com a categorização dos dados, secção 4.4.1, foram treinados dois modelos de deteção do normal funcionamento das luminárias. O primeiro modelo foi treinado com os dados categorizados de acordo com regras e os valores normativos das luminárias, sendo este o modelo da abordagem tendo por base regras e valores normativos das variáveis relacionadas com a operação das luminárias

Modelo	accuracy	precision	recall	AUC
baseado em regras	0.9999	1.0	1.0	1
iqr	0.9993	0.9996	0.9996	0.999929

Tabela 9: Métricas de *Cross validation* para cada modelo.

(modelo baseado em regras). Já o segundo modelo, foi treinado utilizando os dados categorizados de acordo o cálculo interquartil (modelo IQR), este modelo diz respeito à abordagem que tem por base as características individuais de operação das luminárias. Como resultado da previsão ambos os modelos produzem um valor numérico entre 0 e 1. Caso este valor seja superior ou igual a 0.5 os dados são categorizados como funcionamento normal, caso contrário (inferior a 0.5) os dados são categorizados como funcionamento anormal. A utilização destes modelos permite detetar falhas na operação das luminárias aquando da recolha dos dados.

No treino de ambos os modelos todas as variáveis foram consideradas, incluindo as variáveis referente aos dados meteorológicos. Os dados meteorológicos não têm diretamente grande relevância no primeiro modelo, uma vez que o mesmo foi classificado de acordo com regras específicas, mas estes dados afetam na mesma a operação das luminárias. Já para o segundo modelo, estes dados devem possuir uma grande relevância. Considere-se, por exemplo, a correlação positiva entre a temperatura ambiente e a temperatura de funcionamento da luminária, desviando-a do seu estado de funcionamento normal. Ambos os modelos realizam previsões precisas, na Tabela 9 é possível verificar métricas de Cross Validation para cada um dos modelos.

A importância relativa de cada variável para cada um dos modelos é apresentada na figura 25. Como é possível verificar o tempo de atividade, *uptime*, (mede o tempo de atividade da luminária) e a temperatura de operação da luminária são as duas variáveis mais relevantes em ambos os modelos, embora com importância relativa diferente nos dois modelos. É ainda interessante notar que no modelo iqr o top três das variáveis mais relevantes inclui tanto a temperatura de operação da luminária quanto a temperatura ambiente. Também é interessante notar que o *device_id* (identificador único de cada luminária) é a quarta variável mais importante no modelo iqr (enquanto é a segunda variável menos importante no modelo baseado em regras). Isto revela uma característica importante do modelo iqr visto o mesmo captar tanto a influência do meio ambiente como as características individuais de cada luminária.

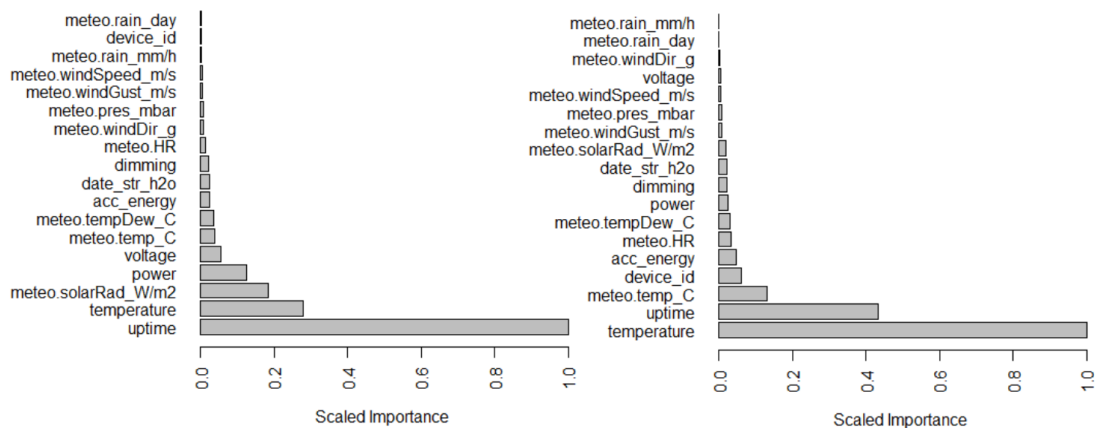


Figura 25: Importância relativa de cada variável nos modelos baseado em regras (esquerda) e iqr (direita).

4.4.3 Resultados e Ferramentas

Com os modelos finalizados, foi realizada uma análise aos mesmos e nesta secção os dois modelos treinados são analisados com o objetivo de avaliar as diferenças e semelhanças e, eventualmente, apoiar a seleção de um ou outro para a criação de uma plataforma de apoio. Nesta secção serão ainda explicadas algumas ferramentas desenvolvidas e onde ambos os modelos foram incorporados.

Dessa forma, foram utilizadas 200 000 instâncias, selecionadas aleatoriamente, do *dataset* que possui os dados relacionados com a operação das luminárias no município de Cascais. Cada modelo realizou a previsão para cada uma das instâncias, atribuindo assim um valor entre 0 e 1, representando o grau de certeza na normalidade da operação da luminária. O modelo baseado em regras classificou 193 924 das instâncias como tendo uma operação normal (cerca de 97%) enquanto o modelo iqr classificou 186 827 (cerca de 93%). Isto pode indicar que há instâncias descartadas pelo modelo baseado em regras uma vez que o mesmo só considera valores normativos, enquanto o modelo iqr tem em conta aspetos de como é a operação normal de cada luminária ao longo do tempo.

No modelo baseado em regras 99,88% das previsões são previsões de alta confiança. Ou seja, previsões em que output é superior 0,85 (alta confiabilidade numa operação normal) ou menor que 0,15 (alta confiabilidade numa operação anormal). No modelo iqr o valor é de 99,60%, um valor ligeiramente inferior, no entanto muito elevado.

É importante ainda analisar a concordância dos modelos, ou seja, o grau em que ambos os modelos concordam nas suas previsões. De acordo com os resultados, cerca de 190 000 (95%) instâncias de dados são classificadas de igual forma por ambos os modelos, isto indica

uma concordância muito alta entre os modelos, o que aumenta a confiança em ambos. A Figura 26 mostra como as previsões de cada modelo se relacionam entre si. Através da análise da imagem é possível verificar que quando ambos os modelos possuem a mesma previsão, a sua confiança nessa mesma previsão é maior, uma vez que os valores estão significativamente menos dispersos nos quadrantes de concordância. A correlação entre as duas previsões é também um aspeto importante, e ao considerar todos os dados, a correlação é de 0,58, o que não é particularmente alto, devido à influência das instâncias em que não há concordância. Ao considerar apenas os casos em que há concordância, a correlação aumenta para 0,99 e diminui para -0,95 apenas nos casos de discordância.

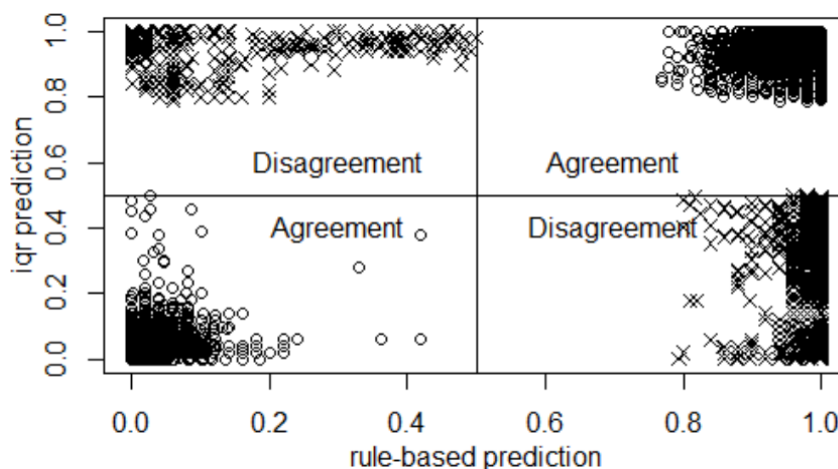


Figura 26: Concordância das previsões de ambos os modelos: os quadrantes de concordância contêm 95,71% das instâncias.

Após a análise decidimos usar ambos os modelos, uma vez que acreditamos que ambos fornecem uma visão diferente, válida e relevante para o problema. Como referido, ambos os modelos possuem elevadas taxas de previsões de alta confiança e os dois complementam-se podendo para isto ter em consideração o caso em que uma das luminárias está a operar de forma anormal desde o início, ou seja, para esta luminária o que geralmente era anormal seria considerado normal, daí a importância das duas abordagens. Exemplificando, uma luminária poderia estar desde o seu início a funcionar a uma temperatura demasiado elevada, neste caso, para o modelo baseado em regras o mesmo indicaria que a mesma se encontra com falhas e com razão pois a temperatura de operação está demasiado elevada. Em contrapartida e como a mesma se encontra a funcionar assim desde o início para o modelo iqr para a mesma luminária iria identificar como uma operação normal de forma incorreta. Tendo isto em conta o uso conjunto dos modelos será a melhor abordagem.

Sendo assim ambos os modelos podem ser utilizados de forma separada, mas a abordagem que achamos mais indicada é a utilização de ambos os modelos sendo que o resultado final é

a soma ponderada das respostas de ambos os modelos.

Para utilização foi desenvolvida uma *dashboard*, figuras 27 e 28, utilizando Kibana e ElasticSearch, uma vez que a utilização dos mesmos permite uma boa integração com o tipo de bases de dados utilizadas na dissertação e permitem desenvolver uma *dashboard* de forma rápida e mais simples, em contrapartida estamos limitados às funcionalidades que dispõem.

A mesma permite visualizar todos os dados associados às luminárias, mas principalmente permite verificar os dados depois da previsão dos modelos. Permite por exemplo ao utilizador ver a evolução da operação de uma luminária ao longo do tempo, ver dados relativos ao funcionamento normal ou anormal de uma luminária como a percentagem total ou por dia de casos anormais por luminária. Possibilita ainda a realização de pesquisas nos dados, ajustando de forma automática os gráficos, e permite ainda a adição de novos gráficos à mesma de uma forma rápida e simples. No entanto, a funcionalidade em mais destaque é que a mesma permite detetar falhas na operação das luminárias após a recolha dos dados.

Como indicado a *dashboard* é alimentada com os dados recolhidos das luminárias, sendo assim todo o processo está dividido em várias fases. Primeiro os dados são recolhidos das luminárias, sendo posteriormente limpos e transformados conforme detalhado anteriormente. Após os dados estarem prontos os mesmo são processados por ambos os modelos e incorporados na *dashboard*.

Foi ainda desenvolvido um serviço, através de *Spring Boot*, para classificar o funcionamento de uma luminária, este serviço utiliza ambos os modelos e o resultado da previsão resulta de uma soma ponderada de ambos os modelos. O cliente envia para o serviço os valores relativos à operação das luminárias (como exemplo, temperatura funcionamento) e ainda os dados meteorológicos. Deve ainda ser enviado um peso, peso este que será atribuído ao modelo iqr. A título de exemplo, assumiremos que o peso é X , então o resultado da previsão dos modelos será $RES = previsao_modelo_iqr \times X + (1 - X) \times previsao_modelo_regras$. Ao enviar o peso o cliente pode determinar qual a importância que pretende atribuir a cada modelo. Isto resulta novamente num valor entre 0 e 1, e tendo em conta o limite de 0.5, caso o valor seja superior a 0.5 é classificado como normal, se for abaixo é classificado como anormal. Como resposta o serviço retorna a previsão final e a previsão feita por ambos os modelos, como é possível verificar na figura 29, sendo que no exemplo apresentado na imagem os modelos retornam uma resposta final de 0.99, ou seja, a luminária encontra-se a funcionar sem qualquer problema. Na resposta são também apresentadas as previsões individuais bem como o peso



Figura 27: Exemplo de informação presente na *dashboard*, como exemplo gráfico de previsão de temperatura ou informação da temperatura funcionamento em comparação à temperatura ambiente.

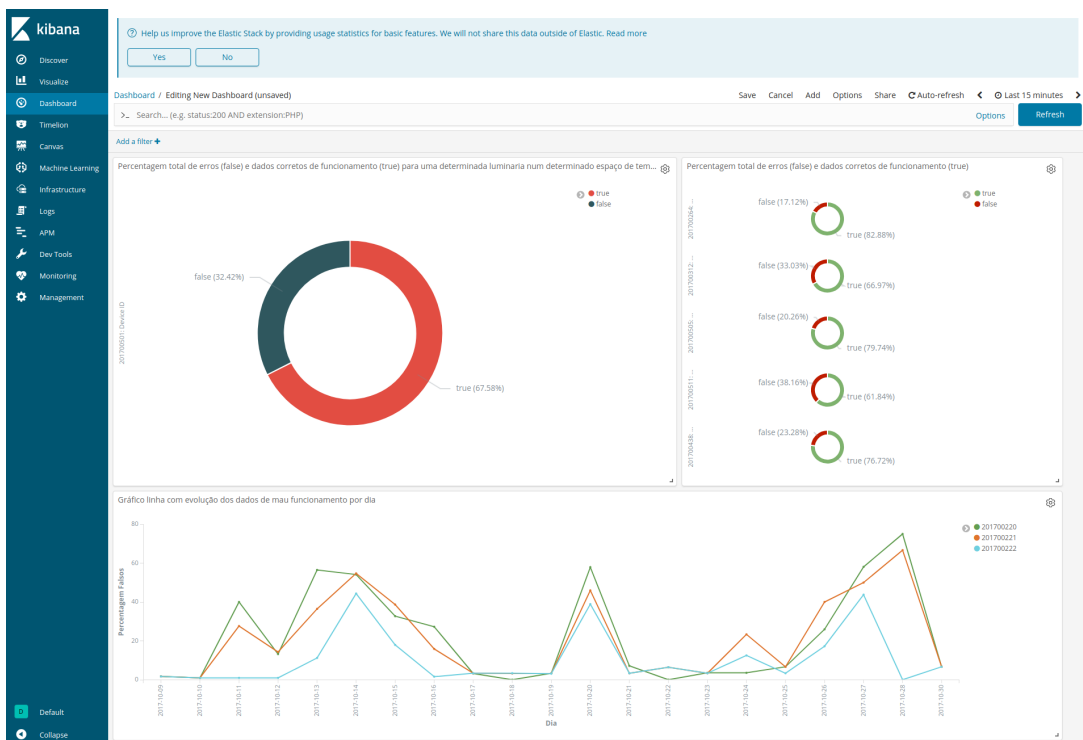


Figura 28: Exemplo de informação presente na *dashboard*, como exemplo informação relacionada com a deteção de falhas na operação das luminárias.

atribuído a cada modelo.

```
{
  - Rule_Based:: {
    weight:: 0.25,
    classification:: "true",
    perc_classification:: 0.9999178762059637
  },
  - IQR:: {
    weight:: 0.75,
    classification:: "true",
    perc_classification:: 0.9992207363544093
  },
  - Classification:: {
    classification:: 0.999395021317298,
    perc_classification:: "true"
  }
}
```

Figura 29: Exemplo de resposta do serviço online por parte dos modelos.

4.5 Otimização do fluxo luminoso

Após a revisão do estado de arte ficou comprovado que uma abordagem com muitas vantagens para otimização do consumo seria a regulação do fluxo luminoso através da utilização de sensores em luminárias. Esta abordagem possibilita várias vantagens que contribuem para a sustentabilidade de uma cidade, nomeadamente em termos de menores consumos de energia bem como menores emissões de dióxido de carbono e ainda ajuda na redução de custos relacionados com o consumo de energia.

Tendo em conta estas e outras vantagens, pensamos numa abordagem utilizando sensores de luminosidade nas luminárias com o objetivo de otimizar o fluxo luminoso da iluminação pública durante os períodos noturnos, enquanto a mesma se encontra ligada. O objetivo desta fase do estudo era então otimizar o fluxo luminoso, *dimming*, ou seja, encontrar o valor de *dimming* ideal para determinado momento tendo em consideração a luminosidade ambiente e o limite mínimo de luminosidade possível.

4.5.1 Recolha dos dados

Concluído o processo de desenho da abordagem, chegamos à conclusão que seria necessária uma nova recolha de dados sobre a operação das luminárias, uma vez que, já como indicado anteriormente, os dados recolhidos sobre a operação das luminárias no município de Cascais contêm pouca diversidade de valores para a variável *dimming*. Perante isto, foi então realizada uma nova recolha de dados utilizando para o efeito as luminárias de teste localizadas na nossa escola, esta recolha foi realizada entre 31 de julho de 2018 e 4 de outubro de 2018, exceto nas duas primeiras semanas do mês de agosto (pausa das atividades letivas), aproximadamente dois meses. Nesta nova recolha, e para que fosse possível obter maior diversidade nos dados, foi desenvolvido uma nova configuração de iluminação em que a cada 20 minutos as luminárias alteravam a sua percentagem de *dimming*, ou seja, o seu fluxo luminoso.

Juntamente com esta recolha, foi ainda realizada uma outra recolha de dados relacionada com os dados das leituras dos sensores de luminosidade. Uma vez que as luminárias na sua forma original não contêm sensores para a recolha de luminosidade ambiente, foi necessário realizar também a sua recolha. Para esta recolha foi utilizado Arduino (modelo Arduino Uno Wifi) equipado com um sensor de luminosidade. Como o objetivo passava por otimizar o fluxo luminoso em função do valor da luminosidade ambiente foi necessário recolher este valor com a ajuda do sensor (em LUX). Porém, para termos uma ideia do real valor de luminosidade que chega ao solo proveniente da luminária, foi utilizado outro Arduino para a recolha do valor de luminosidade que chega ao solo proveniente da luminária (em LUX). Resumidamente, e como podemos observar na figura 30, nesta recolha foram utilizados dois Arduino, um para recolher o valor de luminosidade ambiente e outro para recolher o valor de luminosidade por baixo da luminária. Ambos os sensores realizam leituras e armazenam dados de minuto a minuto. A recolha foi realizada no mesmo período, entre 31 de julho de 2018 e 4 outubro de 2018.

Sendo assim, este processo de recolha de dados resultou na obtenção de dois *datasets* distintos, um com os dados de operação das luminárias e outro com os dados provenientes da leitura dos sensores do Arduino. Posto isto, seria então necessário realizar uma integração dos dados de modo a obter apenas um *dataset*. Inicialmente foi realizada uma limpeza e transformação dos dados do dataset relacionado com a operação das luminárias seguindo todos os passos do processo já descritos na secção 4.1. Após esta limpeza dos dados foi realizada a junção dos mesmos, através da data e hora de recolha tendo sido adicionadas duas novas colunas ao dataset com os dados de operação. Estas duas novas colunas continham os



Figura 30: Esquema do posicionamento dos sensores de luminosidade na recolha de dados.

dados que descreviam os valores recolhidos pelos Arduino, valor de luminosidade ambiente e o valor de luminosidade por baixo da luminária

Foi realizada uma pequena análise aos dados onde foram retiradas duas conclusões que eram esperadas. A primeira conclusão que foi possível retirar, é como era esperado, quanto maior a percentagem de *dimming* da luminária maior o valor de luminosidade lido por baixo da mesma, como é possível ver pela figura 31, através da distribuição dos dados de luminosidade por percentagem de *dimming*. A outra conclusão já esperada é que a evolução da luminosidade durante a noite varia de noite para noite, como é possível verificar na figura 32. A figura mostra a evolução da luminosidade ao longo de três noites diferentes, onde é possível verificar ligeiras diferenças na evolução da mesma. Isto pode indicar que a luminosidade varia de noite para noite com fatores como a nebulosidade ou a luz da lua.

4.5.2 Desenvolvimento do modelo

Tendo sido finalizadas as fases de recolha, limpeza e integração dos dados estava na altura de desenvolver um modelo capaz de dar resposta aos objetivos definidos. Antes de desenvolver o modelo era necessário definir um limite mínimo de luminosidade a cumprir. Tendo em consideração que existem normas e regulamentações foi definido 20 LUX como limite mínimo desejado para peões e veículos. Este valor foi definido tendo em consideração a norma EN-13201 e a tipologia da via.

Visto termos os dados relacionados com *dimming*, luminosidade ambiente e a luminosidade

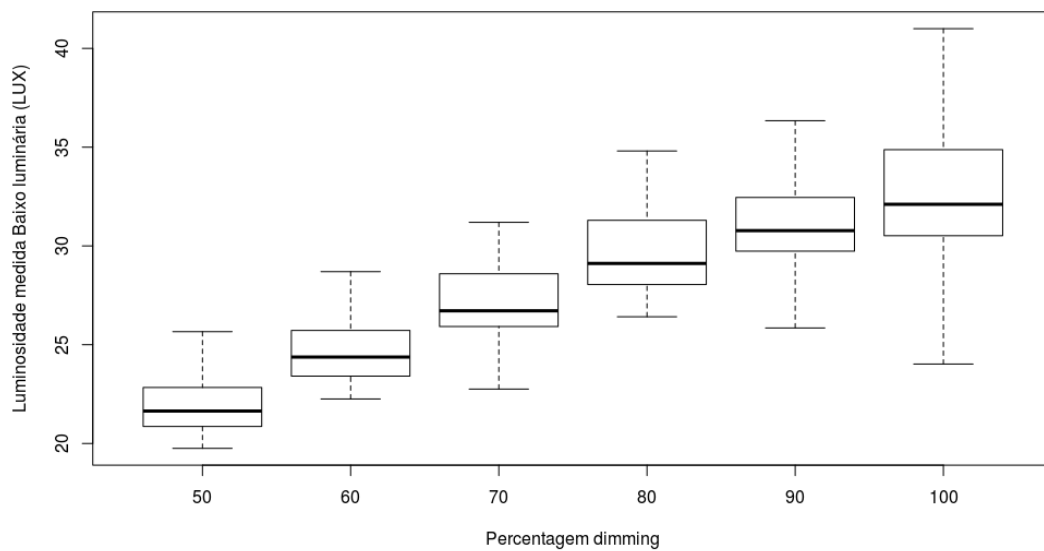


Figura 31: Distribuição da luminosidade medida por baixo da luminária por porcentagem de *dimming*.

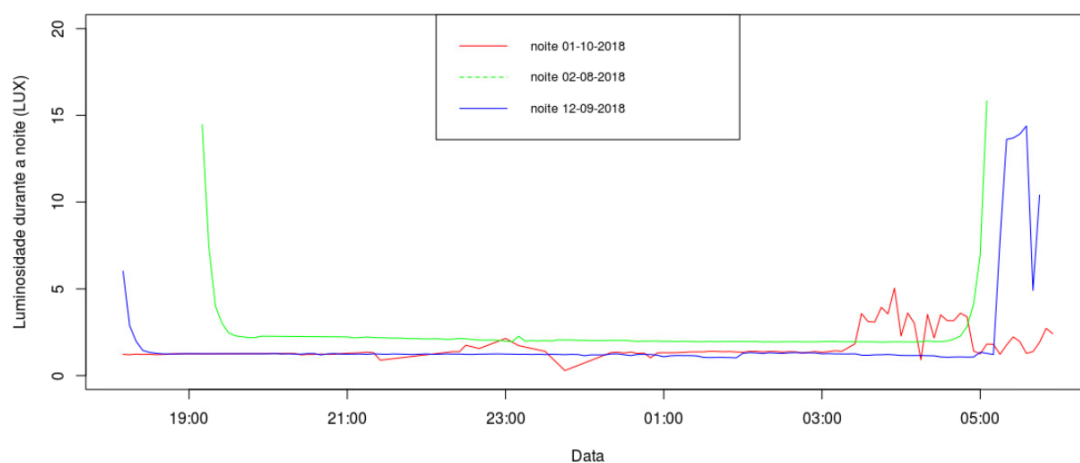


Figura 32: Variação da luminosidade ao longo de três noites diferentes, escolhidas aleatoriamente.

resultante por baixo da luminária a nossa abordagem foi a seguinte: desenhar e desenvolver um modelo capaz de prever a luminosidade por baixo da luminária através do *dimming* e da luz ambiente. Assim, com este valor e através de pesquisa binária era possível encontrar o valor ótimo de *dimming* de modo a cumprir o limite definido. Para a realização deste processo de pesquisa foi desenvolvida uma aplicação Java capaz de aceder a um serviço online, onde se encontra o modelo, e que tendo em consideração um valor de luminosidade ambiente faz a pesquisa e devolve a percentagem de *dimming* que otimiza o consumo e mantendo o limite mínimo necessário de luminosidade.

Definida a estratégia foi treinado um modelo capaz de prever a luminosidade por baixo da luminária tendo em consideração o *dimming* e a luminosidade ambiente. Foi utilizado o algoritmo *Gradient Boosting Machine* (GBM) para o treino do modelo. O GBM é uma técnica utilizada para treino de modelos, relacionados com problemas de regressão e classificação, que produz um modelo de previsão na forma de um conjunto de modelos de previsão fracos, geralmente árvores de decisão. Para perceber melhor esta técnica é necessário entender o que é *Boosting*. O termo *Boosting* está relacionado com um método para melhorar as previsões de um modelo, onde a ideia é treinar os modelos mais “fracos” sequencialmente, com o objetivo de corrigir o seu antecessor. Sendo assim, o objetivo do GBM é melhorar as previsões de cada uma das árvores anteriores, de forma a que as árvores seguintes apresentem melhores previsões. As previsões do modelo final são, portanto, a soma ponderada das previsões feitas pelos modelos anteriores.

No treino deste modelo foram treinadas 46 árvores, cada uma com uma profundidade máxima de 9 níveis. Cada árvore foi treinada com 70% das variáveis, selecionadas aleatoriamente. Este modelo foi treinado tendo como variável de resposta a luminosidade por baixo da luminária, e as variáveis utilizadas nessa previsão são o *dimming* e a luminosidade ambiente, na figura 33 é possível verificar a importância relativa de cada variável do modelo. Na tabela 10, são apresentadas as métricas de validação do modelo, sendo uma delas a métrica MSE (do inglês, *Mean Squared Error*), que mede a média dos erros ou desvios ao quadrado. Esses erros ou desvios são a distância dos pontos até a linha de regressão.

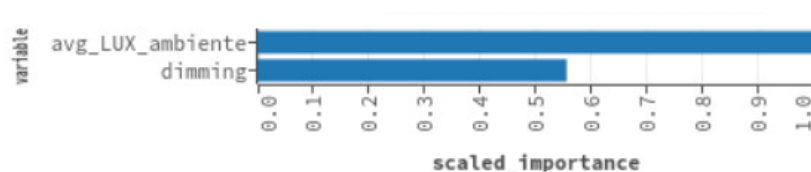


Figura 33: Importância relativa de cada variável do modelo de previsão de luminosidade.

MSE (<i>Mean Squared Error</i>)	RMSE (<i>Root Mean Squared Error</i>)	r2
13,524995	3,677634	0.530955

Tabela 10: Métricas de validação do modelo de previsão de luminosidade.

Na figura 34 é possível verificar um gráfico com a distribuição da luminosidade ambiente e a previsão do modelo para os valores de percentagem de *dimming* (ente 50 e 100, em intervalos de 10) tendo em conta o valor de luminosidade ambiente ao longo da noite. O gráfico foi gerado para uma noite selecionada aleatoriamente, e tendo em consideração o facto de cumprir o limite mínimo de 20 LUX de iluminação durante essa mesma noite, a percentagem ótima de *dimming* deveria variar entre os 50% e os 60%.

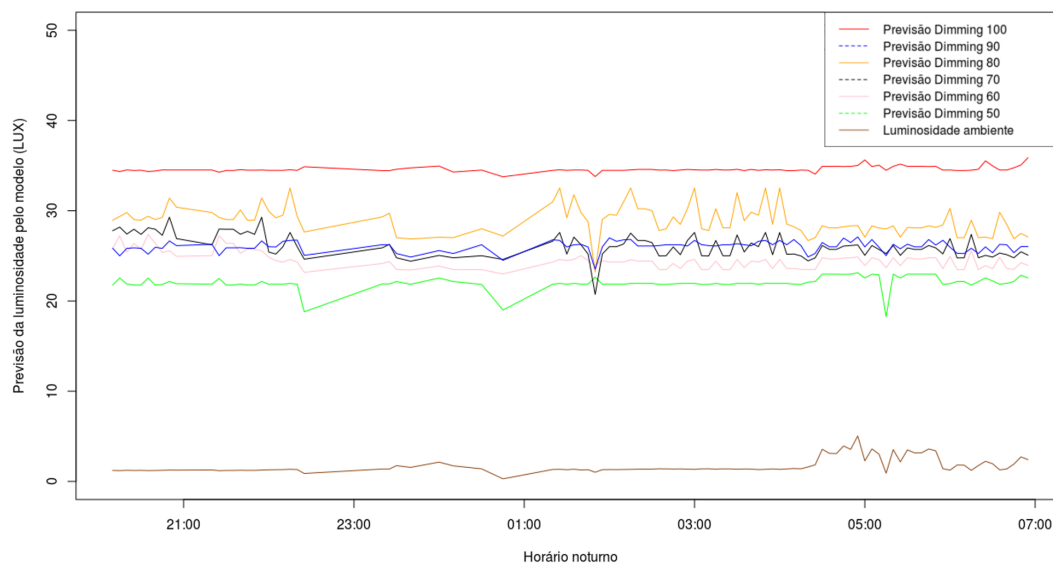


Figura 34: Diferentes previsões do modelo para um valor de luminosidade ao longo de uma noite, selecionada aleatoriamente.

Um dos objetivos após o treino do modelo era o desenhar e desenvolver um sistema inteligente de apoio ao utilizador capaz de criar e ajustar as configurações de iluminação em tempo real. O sistema deveria ser capaz de, em tempo real, receber as leituras sobre a luminosidade ambiente e ajustar fluxo luminoso, *dimming*, das luminárias de forma a otimizar o mesmo.

Não foi possível desenvolver este sistema a tempo, no entanto foi desenvolvida uma simples aplicação Java capaz de aceder a um serviço online onde se encontra o modelo, que tendo em consideração um valor de luminosidade ambiente devolve o mínimo de *dimming* ótimo para satisfazer as necessidades. Como indicado, o modelo encontra-se num serviço online, desenvolvido utilizando *Spring Boot*, que retorna as previsões realizadas conforme os valores enviados referentes às variáveis. Na figura 35 é possível verificar um exemplo de resposta deste serviço, no caso se for enviado um valor de luminosidade ambiente de 1.1 e a percen-

tagem de *dimming* for 60% o sistema faz uma previsão de cerca de 24 LUX por baixo da luminária.

```
{  
  - Dados recebidos: {  
    LUX Ambiente: "1.1",  
    Dimming: "60"  
  },  
  - Previsão: {  
    Previsão LUX:: 24.828777850455463  
  }  
}
```

Figura 35: Exemplo de resposta do serviço online por parte dos modelo.

4.5.3 Teste do modelo

De modo a validar as previsões do modelo e se o mesmo representa alguma otimização no consumo e custos foi idealizada uma abordagem que permitiu simular e obter uma estimativa das possíveis poupanças utilizando o modelo. A abordagem definida tinha como objetivo processar os dados recolhidos no início, relativos à operação das luminárias do município de Cascais, no modelo treinado, de modo a otimizar o valor de *dimming*, e por fim comparar o valor real recolhido com a previsão realizada. Esta abordagem não é a ideal mas dadas as circunstâncias foi a possível de realizar, numa situação real e para resultados mais detalhados deveria ter sido realizada uma nova recolha desta feita utilizando o modelo para ajustar a configuração de iluminação, e no fim comparar os resultados desta recolha com a anterior. Porém, esta nova recolha não foi possível por não nos ser permitido gerir a rede de iluminação pública que está em funcionamento, por motivos de segurança e outros, optando por fazer uma abordagem com os dados já recolhidos.

No entanto, no conjunto de dados recolhidos no início da dissertação os valores da luminosidade ambiente não estavam presentes uma vez que as luminárias não possuem sensores para a recolha dos mesmos. Sendo assim, a nossa abordagem consistiu em adicionar a esse *dataset* os dados relacionados com a luminosidade ambiente que foram recolhidos entre 31 de julho de 2018 e 4 de outubro de 2018. Embora estes não sejam os valores reais que se verificaram durante a recolha original dos dados do município de Cascais, possibilitava o cálculo de uma estimativa. Posto isto, adicionamos ao *dataset* (que contém os dados de operação

das luminárias no município de Cascais) uma nova variável que continha o valor de luminosidade ambiente, selecionando aleatoriamente para cada noite do *dataset* uma noite de dados recolhidos entre 31 de julho de 2018 e 4 outubro de 2018.

Com os dados integrados foi possível processar os dados pelo modelo e encontrar o valor mais ajustado para o *dimming*. Para finalizar e poder validar se existiam economias com o uso do modelo, apenas faltava prever qual seria o consumo tendo em conta o valor *dimming* previsto. Para tal foi treinado um modelo de regressão quadrática para prever a potência necessária para esse novo valor. O modelo foi treinado para prever a potência (*power*) em função do *dimming*.

Para este modelo, inicialmente foram treinados dois modelos um utilizando regressão linear e outro utilizando regressão quadrática, mas após uma análise de ambos os modelos foi possível verificar que o modelo de regressão quadrática se ajustava melhor ao conjunto de dados, como é possível verificar pela figura 36. Na figura estão presentes ambos os modelos, o modelo de regressão linear (à esquerda) e o modelo de regressão quadrática (à direita), sendo possível verificar a distribuição gráfica dos dados e as retas de equação dos modelos. Após a análise das métricas de validação dos modelos foi possível perceber que no modelo quadrático o valor da métrica *MSE* era inferior ($MSE = 3,803041$) ao da mesma métrica para o modelo linear ($MSE = 13,59494$). Assim, o modelo escolhido foi o quadrático pois possui uma regressão que se ajusta melhor ao conjunto de dados.

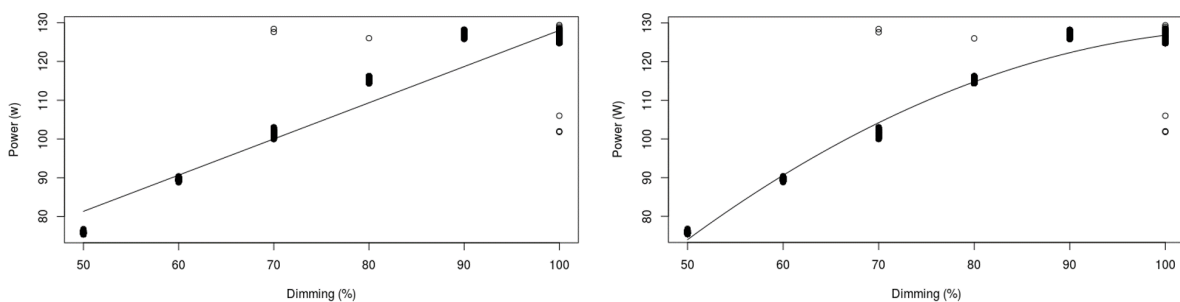


Figura 36: Distribuição gráfica dos dados e as retas de equação dos modelos, modelo regressão linear (à esquerda) e o modelo regressão quadrática (à direita).

Por fim, era necessário calcular uma estimativa de poupanças no consumo através das diferenças entre os valores reais recolhidos e os valores previstos. Neste processo poderiam existir duas abordagens visto que os dados estão armazenados em intervalos de 5 minutos, como já indicado anteriormente. Uma delas era calcular as diferenças utilizando para o efeito o valor médio de potência por cada hora e a outra seria calcular o custo do consumo por cada 5 minutos,

visto os dados estarem armazenados nesse intervalo de tempo. A abordagem seguida foi a segunda pois uma luminária pode não estar ligada durante uma hora por completo, assumindo assim que quando não existem dados a luminária estava desligada nesse momento.

A abordagem explicada e definida acima foi implementada para selecionar o *dimming* ideal para uma determinada luminária a qualquer momento. De forma resumida e simples, como indicado é utilizado um esquema de pesquisa binária para o intervalo entre 50 % - 100 % de *dimming*. Sendo assim, a pesquisa começa com um valor de 75 %. Para esse *dimming*, e dado um determinado valor de luz ambiente, estima-se o consumo de energia e o nível de luminosidade por baixo da luminária, ao nível dos pedestres: o primeiro usando a regressão quadrática, o último usando o modelo treinado. Se a luminosidade prevista estiver abaixo do limite de 20 Lux estabelecido, a pesquisa continuará à direita, ou seja, com um *dimming* de 87,5 %. Caso contrário, continua à esquerda, com um *dimming* de 62,5 %. A cada etapa, as estimativas de consumo de energia e luminosidade são atualizadas. O processo continua até ser encontrado um valor de *dimming* que represente o mínimo definido, 20 Lux, ou então quando um valor menor que 20 Lux é alcançado e não é possível pesquisar mais à direita. Neste caso, o valor anterior de *dimming* é selecionado.

Esta abordagem foi usada para todas as instâncias de dados do dataset com os dados referentes à iluminação do município de Cascais, a fim de simular a operação de um sistema de regulação de fluxo luminoso, tendo em consideração os dados de operação das luminárias e a luminosidade ambiente

Os resultados finais mostram uma poupança de cerca de 28%. Estes resultados são obtidos pela comparação do valor total de energia acumulada (MW, *MegaWatts*) real recolhida, 95,728, em comparação com o valor total de energia acumulada prevista, 69,5854, o que perfaz uma redução de cerca de 28%, figura 37. Com estes resultados, foi possível validar a nossa abordagem e verificar que o modelo além de válido, possibilita a economia de energia. Estes reforçam que uma abordagem de otimização do fluxo luminoso possui vantagens para otimizar o consumo permitindo economizar energia e os custos associados à mesma. Tendo em consideração o estado de arte poderia ter sido ainda mais vantajoso utilizar em conjunto com o sensor de luminosidade, um sensor de deteção de movimento para detetar períodos de menor atividade, em que é possível baixar a luminosidade abaixo do limite definido.

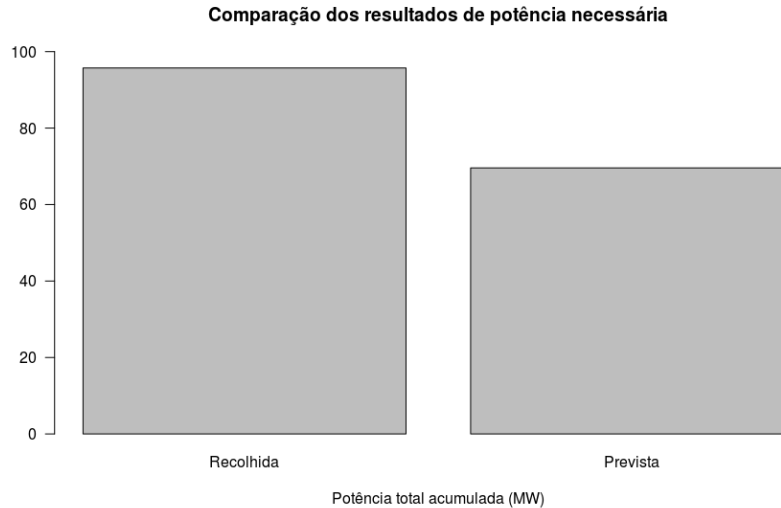


Figura 37: Comparação dos valores de potência (MW) real recolhida com o valor previsto.

4.6 Resultados científicos

Um papel importante da elaboração de projetos de dissertação é a partilha de todo o trabalho e conhecimento obtido ao longo do desenvolvimento do mesmo. Assim, com o objetivo de contribuir e partilhar o nosso trabalho tivemos o cuidado de preparar e submeter artigos científicos em conferências. O artigo publicado durante este trabalho:

- Carneiro D., **Nunes D.**, Sousa C. (2020) A Decision-Support System for Preventive Maintenance in Street Lighting Networks. In: Madureira A., Abraham A., Gandhi N., Varela M. (eds) Hybrid Intelligent Systems. HIS 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 923. Springer, Cham

DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-14347-3_26

Indexing DBLP, SCOPUS, ISI

Abstract An holistic approach to decision support systems for intelligent public lighting control, must address both energy efficiency and maintenance. Currently, it is possible to remotely control and adjust luminaries behaviour, which poses new challenges at the maintenance level. The luminary efficiency depends on several efficiency factors, either related to the luminaries or the surrounding conditions. Those factors are hard to measure without understanding the luminary operating boundaries in a real context. For this early stage on preventive maintenance design, we propose an approach based on the combination of two models of the network, wherein each is representing a different but complementary perspective on the classifying of the operating conditions of the lu-

minary as normal or abnormal. The results show that, despite the expected and normal differences, both models have a high degree of concordance in their predictions.

- **Nunes D.**, Teixeira D., Carneiro D., Sousa C. (2020) Decision Intelligence in Street Lighting Management. Submitted to WorldCist

Abstract The European Union has been making efforts to increase energy efficiency within its member states, in line with most of the industrialized countries. In these efforts, the energy consumed by public lighting networks is a key target as it represents approximately 50% of the electricity consumption of European cities. In this paper we propose an approach for the autonomous management of public lighting networks in which each luminary is managed individually and that takes into account both their individual characteristics as well as ambient data. The approach is compared against a traditional management scheme, leading to a reduction in energy consumption of 28%.

Capítulo 5

Conclusão e trabalho futuro

No início desta dissertação foi-nos proposta a apresentação e desenvolvimento de uma solução de gestão de energia na iluminação pública. Apesar de parecer um tema simples e com o qual lidamos no dia a dia, ao longo de toda a dissertação foi perceptível que este era um tema bem mais complexo e no qual era necessário muito conhecimento. Posto isto, procuramos ao máximo obter todo o conhecimento possível sobre iluminação, e mais detalhadamente sobre iluminação pública, para que fosse possível desenvolver uma solução que cumprisse todos os objetivos. Iniciamos esta dissertação com o grande objetivo, de entre outros, de tentar contribuir para uma melhor gestão de energia, procurando sempre encontrar as melhores abordagens para resolver o problema do grande consumo de energia. Com a conclusão da mesma conseguimos atingir as metas propostas.

A dissertação tinha como tema principal a gestão de iluminação pública com o objetivo de desenvolver um sistema de gestão de energia a fim de garantir uma gestão adequada e a otimização de energia elétrica. O desenvolvimento desta dissertação teve por base a utilização de luminárias equipadas com tecnologia LED, sendo esta uma tecnologia uma grande diversidade de benefícios relacionados com eficiência energética.

Numa fase inicial fizemos o levantamento da fundamentação teórica para obter mais conhecimento sobre a temática do mesmo. Foram explorados os principais conceitos luminotécnicos, comparadas as principais fontes de iluminação artificial e ainda alguns tópicos como o panorama nacional de consumo de energia. Com esta revisão foi possível concluir que a iluminação pública representa cerca de 3% do consumo total de energia em Portugal.

Nesta revisão, foi possível identificar e conhecer os diferentes tipos de sistemas e métodos de controlo que permitem o controlo e monitorização da iluminação pública. Estes, podem ser divididos em 2 categorias: os sistemas mais simples, ou seja, sistemas “sem inteligência” e os sistemas autónomos inteligentes.

Posteriormente foram analisados vários casos de estudo sobre projetos onde foram desenvolvidas abordagens e solução para gestão de iluminação pública. Com esta análise foi possível validar como esperado que a implementação de métodos e/ou sistemas de controlo de gestão permitem economizar energia, embora uns mais que outros. Foi também verificado que todos os estudos e projetos apresentavam soluções em que todas as luminárias da rede eram geridas de forma igual. No entanto com os conhecimentos obtidos na revisão inicial, sabíamos que era possível aumentar a eficiência das luminárias através de uma gestão individual.

Com todos os conhecimentos retirados da fundamentação teórica e da revisão dos casos de estudo, desenhamos e desenvolvemos a nossa solução para gestão de iluminação pública tendo por base as características individuais das luminárias. Com as limitações encontradas e complexidade decidimos dividir o trabalho em duas grandes fases: a primeira fase diz respeito ao desenvolvimento de uma solução de manutenção preventiva através da deteção do normal funcionamento das luminárias. Já na segunda fase, foi desenvolvida uma solução de otimização do fluxo luminoso.

Inicialmente desenvolvemos uma solução para deteção do normal funcionamento das luminárias (manutenção preventiva). Esta primeira fase desenvolvida tinha como objetivo identificar falhas no funcionamento das luminárias. Foram desenhadas duas abordagens, uma com base em regras e valores normativos das variáveis relacionadas com a operação das luminárias e outra tendo por base as características individuais de operação das luminárias calculando o seu normal funcionamento através do cálculo do intervalo interquartil (IQR).

Após a análise de ambos os modelos decidimos que a abordagem mais indicada seria a utilização de ambos os modelos, uma vez que ambos fornecem uma visão diferente, válida e relevante para o problema. Sendo assim, o resultado final é a soma ponderada das respostas de ambos os modelos. Nesta fase foi desenvolvida uma dashboard e um serviço online, em ambas as ferramentas foram utilizados os dois modelos treinados. Com o trabalho desenvolvido nesta fase, é possível identificar aquando da recolha de dados falhas na operação das luminárias.

Nesta primeira fase da dissertação foram identificadas duas melhorias e/ou limitações que podem ser realizadas:

- Melhorar a limitação do modelo que apenas permite identificar uma falha na operação da luminária aquando da recolha dos dados. Estudar e desenvolver um novo modelo para que o mesmo possa no futuro prever possíveis falhas na operação da luminária com antecedência e não aquando da recolha dos dados;
- Desenhar e desenvolver uma plataforma de raiz, para substituição da dashboard implementada, que permita integrar todo o processo de recolha e processamento dos dados, e que permita por exemplo lançar alertas para os utilizadores.

Por fim foi desenvolvida uma solução de otimização do fluxo luminoso, nesta última fase do trabalho desenvolvemos uma abordagem de regulação do fluxo luminoso através da utilização de sensores de luminosidade nas luminárias. O objetivo era otimizar o fluxo luminoso da iluminação pública durante os períodos noturnos. Foi treinado um modelo tendo em consideração a abordagem desenhada, e foi desenvolvido um serviço online com o mesmo. Esta fase segundo os resultados obtidos permitiu uma poupança de cerca de 28%. A utilização do sensor nas luminárias permite ainda detetar quando a luminosidade ambiente ultrapassa o limite mínimo e é necessário ligar a iluminação artificial.

Como melhoria e trabalho futuro seria vantajoso integrar na nossa solução de otimização do fluxo luminoso um sensor de deteção de movimento, para detetar períodos de menor atividade em que é possível baixar a luminosidade abaixo do limite definido. Esta abordagem de uso combinado de sensores foi a que permitiu mais economia de todos os casos de estudo analisados no estado da arte.

Com o desenvolvimento desta dissertação as principais metas foram atingidas, mas mesmo assim foram identificadas algumas limitações e melhorias que podem ser estudadas e desenvolvidas como trabalho futuro de forma a complementar o trabalho desenvolvido e obter uma melhor eficiência energética. Os resultados finais obtidos do desenvolvimento desta dissertação permitem validar a nossa abordagem e verificar que além de válida, possibilita economizar energia e os custos associados ao uso da mesma.

Bibliografia

- [1] Arquiled, “Arquicity r1 efficiency,” 2018, [Acedido: 02-Out-2019]. [Online]. Available: <https://www.arquiled.com>
- [2] EDPDistribuição, “Manual de iluminação pública,” Oct. 2016, [Acedido: 23-Set-2019]. [Online]. Available: <https://www.edpdistribuicao.pt>
- [3] ERSE, “PPEC 2013-2014 - Quadros de apoio,” Jul. 2014, [Acedido: 30-Set-2019]. [Online]. Available: <http://www.erse.pt>
- [4] PNEC, *Plano nacional energia-clima*, May 2019.
- [5] RNAE, DGEG, OET, OE, ANMP, and CPI, “Documento de referência para a eficiência energética na iluminação pública – parte i – conceitos de luminotecnia,” 2018.
- [6] A. K. Soni, N. K. Bind, and R. K. Gupta, “Smart street lighting,” *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 148–150, 2016.
- [7] D. K. Srivatsa, B. Preethi, R. Parinitha, G. Sumana, and A. Kumar, “Smart street lights,” in *2013 Texas Instruments India Educators’ Conference*. IEEE, 2013, pp. 103–106.
- [8] Y. Jagadeesh, S. Akilesh, S. Karthik *et al.*, “Intelligent street lights,” *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 547–551, 2015.
- [9] lightenjin., “Sistemas de gestão inteligente - gesluce,” [Acedido: 24-Out-2019]. [Online]. Available: <http://lightenjin.pt>
- [10] “The Streetlight-EPC project,” [Acedido: 01-Out-2019]. [Online]. Available: <http://www.streetlight-epc.eu>
- [11] J.-J. Sáenz-Peñafiel, J.-L. Poza-Lujan, and J.-L. Posadas-Yagüe, “Smart cities: A taxonomy for the efficient management of lighting in unpredicted environments,” in *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence*. Springer, 2019, pp. 63–70.
- [12] R. F. M. Brandão, “Eficiência energética na iluminação pública,” *Neutro à Terra*, no. 12, pp. 55–60, 2013.
- [13] D. Macisaac, G. Kanner, and G. Anderson, “Basic physics of the incandescent lamp (light-bulb),” *The Physics Teacher*, vol. 37, pp. 520–525, 12 1999.
- [14] T. Khan, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, and H. Winkler, *LED lighting: technology and perception*. John Wiley & Sons, 2015.
- [15] V. A. Scopacasa, “Introdução à tecnologia de led,” *Revista LA.PRO, São Paulo, ed*, vol. 1, pp. 5–10, 2008.

- [16] X. Yao, J. Guo, C. Ren, and X. Wang, "The influence of urban road lighting on pedestrian safety," *International Journal of Engineering Innovation & Research*, vol. 7, no. 2, 2018.
- [17] PORDATA. Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo. [Acedido: 20-Ago-2019]. [Online]. Available: <https://www.pordata.pt>
- [18] A. Peña-García, A. Hurtado, and M. Aguilar-Luzón, "Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being," *Safety science*, vol. 78, pp. 142–148, 2015.
- [19] "PNAEE," [Acedido: 30-Set-2019]. [Online]. Available: <http://www.pnaee.pt/pnaee>
- [20] "FEE," [Acedido: 30-Set-2019]. [Online]. Available: <http://www.pnaee.pt/fee>
- [21] S. Angélica Saraiva, "Governança climática europeia: Pacotes 2020 e 2030 e o acordo de paris." *Análise Europeia - Revista da Associação Portuguesa de Estudos Europeus*, no. 5, p. 150, 2018.
- [22] ERSE, "PPEC 2017-2018," Apr. 2016, [Acedido: 30-Set-2019]. [Online]. Available: <http://www.erse.pt>
- [23] P. G. Matos, P. R. Daniel, A. M. Veiga, A. A. Messias, M. S. M. Oliveira, and P. L. Monteiro, "Inovgrid, a smart vision for a next generation distribution system," 2013.
- [24] RNAE, DGEG, OET, OE, ANMP, and CPI, "Documento de referência para a eficiência energética na iluminação pública – parte ii – projeto de iluminação pública – especificações," 2018.
- [25] C. Mehmet Sait and C. ÇIĞDEM, "Numerical analysis of tunnel led lighting maintenance factor." *International Islamic University Malaysia Engineering Journal*, no. 2, 2018.
- [26] EDP, "Guia prático da eficiência energética o que saber & fazer para sustentar o futuro," 2006.
- [27] M. Castro, A. J. Jara, and A. F. Skarmeta, "Smart lighting solutions for smart cities," in *2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. IEEE, 2013, pp. 1374–1379.
- [28] V. A. da Silva Gonçalves and F. J. M.-H. dos Santos, "Energy management system iso 50001: 2011 and energy management for sustainable development," *Energy Policy*, vol. 133, p. 110868, 2019.
- [29] S. Vassilyev, A. Y. Kelina, Y. Kudinov, and F. Pashchenko, "Intelligent control systems," *Procedia Computer Science*, vol. 103, pp. 623–628, 2017.
- [30] M. Matthies, C. Giupponi, and B. Ostendorf, "Environmental decision support systems: Current issues, methods and tools," 2007.
- [31] E. Vadai, A. Shefi, and T. Herbst, "Efficient illumination system for legacy street lighting systems," Sep. 2015, uS Patent 9,131,557.
- [32] M. Popa and C. Cepișcă, "Energy consumption saving solutions based on intelligent street lighting control system," *UPB Sci. Bull., Series C*, vol. 73, no. 4, pp. 297–308, 2011.
- [33] CIRCUTOR., "Sistema de gestão inteligente da iluminação pública - caso de sucesso," [Acedido: 11-Out-2019]. [Online]. Available: http://circuitor.com/docs/CE_Alumbrado_PT.pdf

- [34] M. A. Costa, G. H. Costa, A. S. dos Santos, L. Schuch, and J. R. Pinheiro, "A high efficiency autonomous street lighting system based on solar energy and leds," in *2009 Brazilian Power Electronics Conference*. IEEE, 2009, pp. 265–273.
- [35] J. W. Tukey, *Exploratory data analysis*. Reading, Mass., 1977, vol. 2.
- [36] L. Breiman, "Random forests," *Machine learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.