

M

MESTRADO
ÁREA DE ESPECIALIZAÇÃO

Ontologia para suporte à tomada de decisão
na gestão da Iluminação Pública
Daniel Filipe da Costa Teixeira

10/2021

Daniel Filipe da Costa Teixeira.

Ontologia para suporte à tomada de decisão na gestão da Iluminação Pública

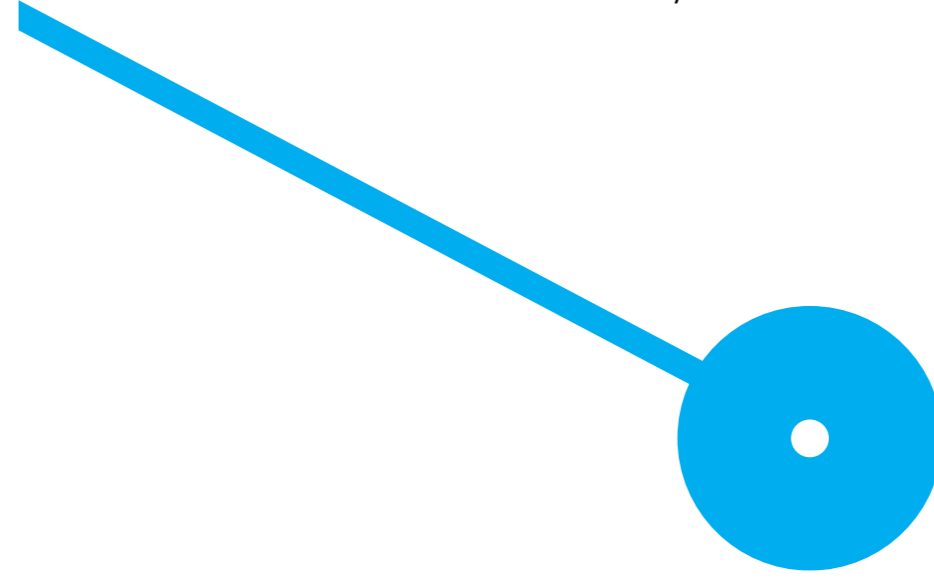
M

MESTRADO
Engenharia Informática

Ontologia para suporte à tomada de decisão na gestão da Iluminação Pública

Daniel Filipe da Costa Teixeira

10/2021



—
ESCOLA
SUPERIOR
DE TECNOLOGIA
E GESTÃO
POLITÉCNICO
DO PORTO

P.PORTO

M

—
MESTRADO
ÁREA DE ESPECIALIZAÇÃO

Ontologia para suporte à tomada de decisão na gestão da iluminação pública

Daniel Filipe da Costa Teixeira

Cristóvão Dinis Polido Sousa

Agradecimentos

Neste espaço quero agradecer a todas as pessoas que ao longo desta caminhada contribuíram direta ou indiretamente, nos bons momentos mas também nos momentos mais difíceis, para a conclusão desta dissertação.

Em primeiro lugar quero deixar um agradecimento especial ao meu professor e orientador Cristóvão Sousa por todo o apoio e suporte ao longo desta caminhada, sem ele não teria sido possível concluir esta dissertação.

Em segundo quero deixar um agradecimento à ESTG e a todos os professores com os quais me cruzei ao longo da minha vida académica.

Por último quero agradecer à minha família, amigos e a todos os que me acompanharam nestes anos académicos cheios de altos e baixos.

A todos deixo uma vez mais um OBRIGADO por tudo o que passamos e pelo que virá...

Resumo

O elevado consumo energético mundial é um tema em destaque na sociedade atual devido aos problemas que este causa, e, dessa forma surgem inúmeros projetos para diminuir os consumos e melhorar a eficiência energética.

A iluminação pública por sua vez é um dos setores com mais impacto nos gastos de energia, sendo responsável, por exemplo, em Portugal por cerca de 3% do consumo total de energia. Dessa forma é necessário criar melhorias procurando novas estratégias de eficiência energética para diminuir os consumos, com a consciência de que desligar a rede de iluminação pública não é solução devido à sua importância no dia-a-dia da vida dos cidadãos.

Com base neste problema têm surgido muitas abordagens para melhorar a eficiência das redes de iluminação pública sendo na sua maioria estratégias de substituição das luminárias obsoletas por luminárias mais modernas baseadas em tecnologias LED. Através desta simples substituição existem poupanças notórias, porém, ainda é insuficiente para resolver o problema da ineficiência energética, sendo portanto necessário apresentar abordagens complementares para levar essa eficiência para patamares maiores tendo por base o uso da tecnologia LED.

Neste trabalho apresentamos uma ontologia baseada numa metodologia sócio-semântica, incorporando alguns aspetos relacionados com Inteligência Artificial para definir artefactos que contribuam para apoiar à tomada de decisão na gestão das redes de iluminação pública.

Palavras-chave: Iluminação Pública, Eficiência Energética, Semântica, Apoio à Decisão; Ontologia

Abstract

The high global energy consumption is a prominent theme in today's society due to the problems it causes, and, in this way, numerous projects arise to reduce consumption and improve energy efficiency.

Public lighting, in turn, is one of the sectors with the greatest impact on energy consumption, being responsible, for example, in Portugal for about 3% of total energy consumption. Thus, it is necessary to create improvements to seek new energy efficiency strategies to reduce consumption, with the awareness that turning off the public lighting network is not a solution due to its importance in the daily lives of citizens.

Based on this problem, many approaches have emerged to improve the efficiency of public lighting networks, mostly strategies to replace obsolete luminaires by more modern luminaires based on LED technologies. Through this simple replacement there are notable savings, however, it is still insufficient to solve the problem of energy inefficiency, and it is therefore necessary to present complementary approaches to take this efficiency to higher levels based on the use of LED technologies.

In this work we present an ontology based on a socio-semantic methodology, incorporating some aspects related to Artificial Intelligence to define artefacts that contribute to support decision making in the management of public lighting networks.

Keywords: Street Lighting, Energetic efficiency, Semantics, Decision Support; Ontology

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras	vii
Glossário	viii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	5
1.2 Projeto 3slm – Smart System for Street Lightning Management	5
1.3 Estrutura do documento	7
2 Revisão da literatura	8
2.1 Visão geral sobre o panorama da iluminação pública em Portugal	10
2.2 Fatores influenciadores da iluminação pública	11
2.3 Regulamentação existente para a iluminação pública	12
2.4 Trabalhos relacionados	14

2.5	Conclusão	15
3	Modelo sócio-semântico para apoio à gestão da iluminação pública	18
3.1	Metodologia	19
3.2	Conceptualização do domínio	22
3.3	Formalização da Ontologia	24
4	Caso de estudo	28
4.1	Motor de inferência para a classificação dos dados	30
4.2	Discussão dos resultados	34
4.2.1	Resultados	35
4.2.2	Resultados científicos	39
5	Conclusões e Trabalho Futuro	41
5.1	Trabalho Futuro	42
5.2	Principais Contributos	42
	Bibliografia	43

Lista de Tabelas

1	Características luminária Arquiled ARQUICITY R1. Fonte: [1]	6
2	Resumo das abordagens estudadas	16
3	Papel de cada perspectiva científica.	21
4	Restrições semânticas relevantes.	25
5	Estados, ações, axiomas e factos das luminárias	27
6	Excerto das classificações inferidas pela ontologia	32
7	Variáveis auxiliares para cálculo da <i>precision</i> e <i>recall</i> na primeira iteração. . . .	36
8	Variáveis auxiliares para cálculo da <i>precision</i> e <i>recall</i> na segunda iteração. . . .	36

Lista de Figuras

1	Arquiled ARQUICITY R1. Fonte: [1]	6
2	Tipos de fontes de luz utilizadas na iluminação pública (em percentagem). Fonte: [2]	11
3	Consumo de energia elétrica por tipo em Portugal (em percentagem). Fonte: [3]	11
4	Metodologia de Pesquisa Baseada em Conhecimento	20
5	Ontologia conceptual dos comportamentos de consumo da Iluminação Pública .	24
6	Visualização da ontologia no editor de ontologias Protégé	26
7	Protótipo da arquitetura da solução	30
8	Servidor Apache Jena Fuseki	33
9	Dashboard de dados - Power BI	33
10	<i>Precision e Recall</i>	34

Glossário

GPRS	General Packet Radio Service
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
IA	Inteligência Artificial
LoRa	Long Range
PL	Luminária Pública
LPS	<i>Low Pressure Sodium</i> , Lâmpadas de Vapor de Sódio de Baixa Pressão
LED	<i>Lighting Emitted Diode</i> , Díodo emissor de luz
ML	Machine learning
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
KOS	Sistema de Organização de Conhecimento
UE	União Europeia

Capítulo 1

Introdução

As cidades mundiais, devido ao aumento do seu tamanho, à crescente densidade populacional e às alterações climáticas em muito causadas por esse crescimento, têm desenvolvido uma preocupação cada vez maior na revolução ambiental. No entanto, essas mesmas cidades enfrentam os seus próprios desafios individuais como *stress* ambientais, sobrepopulação, aumento do tráfego nas suas ruas ou a poluição das mesmas, levando a que estas procurem soluções para a resolução destes problemas. Nessa procura por soluções surge muitas vezes o uso de tecnologia para resolver parte dos problemas surgindo nesse contexto as chamadas *Smart Cities* [4].

O conceito das *Smart Cities* está associado ao uso da tecnologia para conectar os seus diversos serviços e recursos. Através do uso desses recursos tecnológicos é possível recolher dados sobre o funcionamento dos mesmos e, analisá-los para efetuar ações quer em tempo real quer, posteriormente, procurando atuar como resolução para os problemas nos quais são aplicados [5]. No entanto, essa conexão entre os diversos serviços e recursos não é suficiente para a resolução eficaz dos problemas, e, dessa forma as *Smart Cities* consideram ainda agentes digitais que atuam autonomamente para fornecer um novo nível de suporte à gestão desses recursos e serviços [6, 7]. Esta autonomia é fundamental pois as *Smart Cities* geram elevadas quantidades de dados, sobrecarregando os decisores humanos que não apresentam capacidade para analisar e inferir sobre o volume e a complexidade dos dados gerados [8].

As *Smart cities* convergem num objetivo comum de melhorar a qualidade de vida dos cidadãos [9]. Este objetivo apresenta-se como um contexto amplo e abstrato, mas este pode ser dividido em objetivos mais específicos, e bem definidos, nomeadamente:

- melhorar a eficiência da gestão das cidades [10];
- gestão dos recursos [11];
- crescimento sustentável [11];
- gestão das redes de iluminação pública [10];
- entre outros.

Nesse contexto, a gestão das redes de iluminação pública apresenta-se como um dos temas mais complexos mas, ao mesmo tempo, um dos temas mais importantes na agenda da gestão das cidades [12], não só por questões económicas e ambientais, mas também porque tem impacto direto no conforto, segurança e percepção de segurança dos cidadãos [13, 14], pois esta atua como iluminação artificial quando a luz natural ultrapassa o limite mínimo necessário para a circulação dos cidadãos [15].

No entanto, tudo isto implica uma grande rede de iluminação artificial, sendo que em Portugal e de acordo com dados de 2017, foram gastos 1,46 TWh(Terawatts-hora) nas redes de iluminação pública, responsáveis por 3% do consumo total de energia gastos no país [3]. A nível global, o consumo total de energia para todos os tipos de iluminação foi estimado em 3,418 TWh. Este número representa 19% do consumo total de energia no mundo. A iluminação pública sozinha totaliza 281 TWh, o que representa cerca de 1,6% de toda a energia consumida no mundo [16]. 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 usada passa pela substituição das luminárias convencionais baseadas em lâmpadas de sódio de alta pressão (HPS) por luminárias LED, permitindo poupanças significativas [17], no entanto, é possível aumentar ainda mais a eficiência.

Tendo em consideração todos estes problemas, a União Europeia e os países de forma individual têm procurado implementar medidas e estratégias de forma a atingir uma maior eficiência energética. Dessa forma a União Europeia implementou planos 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 por

sua vez foram definidas estratégias no Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) que define, entre outras, um conjunto de medidas de eficiência energética para uma iluminação pública eficiente [18].

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. Dessa forma, é necessário encontrar e desenvolver soluções que permitam tornar as infraestruturas de iluminação pública mais eficientes, sem colocar em risco a segurança e o conforto dos cidadãos.

Neste trabalho propomos o estudo e revisão de soluções e abordagens utilizadas atualmente, propondo uma solução para melhorar a eficiência do consumo de energia nas redes de iluminação pública tendo em consideração os fatores internos, externos e sociais, seguindo uma abordagem baseada em conhecimento. Através da solução apresentada esperamos uma diminuição dos custos associados, e facilitar a gestão das redes de iluminação pública. O trabalho desenvolvido foi inserido no projeto 3SLM - *Smart System for Street Lighting Management*, projeto este que tem por base a utilização de luminárias equipadas com tecnologia LED, de uma rede real de iluminação com mais de 300 luminárias instaladas no município de Cascais.

A solução apresentada apresenta como objetivos:

- desenhar e construir um artefacto para apoiar numa gestão mais eficiente da iluminação pública de forma dinâmica, tendo em conta as características individuais de cada luminária da rede tais como a sua localização, orientação, dados da operação, tendo ainda em conta a legislação em vigor para as instalações das redes de iluminação pública;
- formalizar e produzir conhecimento sobre o sistema, contribuindo assim para uma compreensão real do problema para os especialistas de domínio.

Para responder aos objetivos enunciados numa fase inicial foi efetuada uma revisão do estado da arte, através desta foi possível perceber que o tópico da eficiência energético para as redes de iluminação pública assume-se como um tópico com bastante destaque e que apresenta várias soluções para o problema, no entanto, a grande maioria apresentam-se como soluções de análise de dados e posterior intervenção junto das redes de iluminação pública como um todo, não tendo em conta as particularidades individuais das luminárias como por exemplo a sua localização e os fatores externos que influenciam o funcionamento das mesmas, no

entanto, todas estas particularidades afetam o funcionamento da luminária de alguma forma e tornam cada luminária única na rede em que se insere. Da análise da literatura foi ainda possível retirar, e como já referido, que existem tanto na União Europeia como nos países de forma individual, como é o caso de Portugal, planos e estratégias para tentar a resolução do problema da eficiência energética rumo à sustentabilidade.

Destaca-se ainda a abordagem proposta neste trabalho das que constam na literatura uma vez que esta abordagem combina os resultados de duas abordagens distintas uma baseada em análise de dados, desenvolvida por outra equipa no âmbito do projeto 3SLM, e a abordagem semântica presente neste documento.

Combinando os resultados destas duas abordagens é possível ter uma dupla perspectiva do problema e eliminar as limitações que as abordagens apresentam em separado, permitindo nomeadamente eliminar uma limitação comum nas abordagens baseadas em dados em que estas apresentam limitação na interpretabilidade contextualizada dos resultados, não influenciando na capacidade de melhorar efetivamente a eficiência energética, mas não contribuindo para uma compreensão real e contextualizada do sistema para os especialistas do domínio que gerem as redes de iluminação pública, sendo especialmente verdadeiro nos casos em que os chamados modelos de "caixa preta" são usados [19].

A metodologia desenvolvida baseia-se em conhecimento, e, como já referido, combinando uma abordagem semântica que incorpora informação resultante da aplicação de métodos de Inteligência artificial. A abordagem semântica, em destaque neste trabalho, é sustentada pela análise conceptual, seguida do processo de inferência. Esta incorpora ainda *inputs* provenientes da abordagem de inteligência artificial como é o caso de algumas regras de inferência. O objetivo principal da abordagem semântica é fornecer uma representação partilhável e reutilizável do conhecimento relacionado com os fatores de desempenho energético da iluminação pública, articulando-os numa ontologia, capaz de processar e raciocinar sobre os dados das luminárias públicas. Esses dados serão apresentados numa *dashboard* fornecendo indicadores para apoiar na gestão das redes de iluminação pública.

Posteriormente à definição da metodologia efetuou-se um processo de análise conceptual, processo este desencadeado pela definição das questões de competência que permitem a definição do âmbito da etapa de análise conceptual. Deste modo, todas as questões identificadas devem ser respondidas pelo mapa conceptual. Posteriormente o modelo conceptual será formalizado numa ontologia. No desenvolvimento do mapa conceptual foram tido em

conta os fatores internos às luminárias assim como os fatores externos à mesma e que influenciam o seu funcionamento. Também foi tido em conta as normas em vigor para as redes de iluminação pública, por exemplo, a norma EN13201.

Partindo do mapa conceptual desenvolvido na etapa anterior foi efetuada a formalização da ontologia, definindo as classes e as relações entre classes, nesta etapa foram também definidas as restrições semânticas e lógicas do domínio da iluminação pública.

A última fase do trabalho de dissertação passou por estudar a qualidade dos dados inferidos pela ontologia criada. Para avaliar a qualidade dos mesmos foram utilizadas as medidas de *precision* e *recall*, que são as duas medidas mais utilizadas para efetuar a avaliação da qualidade das inferências de uma ontologia.

1.1 Objetivos

Ao longo deste trabalho iremos explorar uma solução que possibilite a melhoria na eficiência dos consumos da iluminação pública, tendo em conta fatores internos, externos e sociais inerentes às redes de iluminação pública, seguindo uma abordagem baseada na gestão de conhecimento que suporte o especialista de domínio na sua tomada de decisão. Durante o desenvolvimento desta dissertação foram tidos em conta os seguintes objetivos:

1. conceptualizar o domínio da iluminação pública, incorporando não apenas aspectos técnicos formais, mas aspetos sociais e de contexto;
2. a partir do resultado de 1, desenvolver um artefacto que permite organizar e estruturar os dados das luminárias e extrair novo conhecimento útil para a tomada de decisão;
3. desenhar uma arquitetura para implementação deste artefacto numa solução comercialmente viável.

1.2 Projeto 3slm – Smart System for Street Lightning Management

O trabalho desenvolvido ao longo deste trabalho está inserido no projeto 3SLM - *Smart System for Street Lightning 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]

1.3 Estrutura do documento

Este documento foi dividido em 5 capítulos sendo cada um distinto e abordando um tema relevante para a dissertação.

No capítulo 1 é introduzido o tema do trabalho apresentando, a sua relevância, motivação, objetivos, bem como o projeto na qual esta trabalho se insere.

No capítulo 2 por sua vez é efetuada a revisão da literatura, apresentando um panorama geral da iluminação pública em Portugal e os fatores e normas que influenciam o funcionamento da mesma. Neste capítulo é ainda efetuada a revisão de trabalhos cujo objetivo seja semelhante ao proposto.

No capítulo 3 apresentamos a metodologia seguida para o desenvolvimento deste trabalho e detalhamos as etapas utilizadas no desenvolvimento da ontologia criada neste projeto.

No capítulo 4 é apresentado o caso de estudo, o motor de inferência utilizado para a classificação dos dados e, efetuamos também a discussão dos resultados onde apresentamos a avaliação da qualidade das classificações da ontologia calculando o *precision* e o *recall*.

Por último no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações futuras que conseguimos retirar através do desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 2

Revisão da literatura

O elevado consumo energético mundial é um tema em foco visto ser um problema que se estende por todo o mundo e que necessita de uma resolução urgente. Desta forma surgem a nível mundial diversos projetos no âmbito da eficiência energética para tentar de alguma forma diminuir esses elevados consumos energéticos por quaisquer meios disponíveis. Esta preocupação no elevado consumo energético deve-se à importância que a energia assume no dia a dia das pessoas [20] e também à sua origem ainda se prender muito na utilização de combustíveis fósseis, estes que proveem de fontes esgotáveis e cada vez mais reduzidas uma vez que o consumo está cada vez mais superior à oferta que estes nos dão [21].

Para além da escassez destes recursos, estes contribuem ainda para o aumento do aquecimento global, pois estes de uma forma geral são muito poluentes para o meio ambiente libertando grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, o que progressivamente irá levar à destruição do nosso meio ambiente levando a uma progressiva degradação da qualidade de vida para as pessoas [21].

Um dos sectores de maior impacto no consumo energético elevado é a iluminação pública, sendo esta responsável por cerca de 19% do uso total de energia elétrica a nível global e da emissão de 6% do total de emissões dos gases com efeito estufa [22]. Estes elevados valores apresentados devem-se em grande parte à ineficiência das infraestruturas das redes de iluminação existentes, alguns exemplos dessa ineficiência são [23]:

- As redes de iluminação pública são ativadas/desativadas através de temporizadores, o que é inconveniente pois o amanhecer/anoitecer dependendo das zonas pode não

acontecer em simultâneo;

- As redes de iluminação pública estão ligadas continuamente durante toda a noite, muitas das vezes desnecessariamente, de forma igual independentemente se as afluências nas áreas iluminadas sejam altas ou baixas;
- O número de infraestruturas exterior das redes de iluminação pública foi aumentado sem que exista uma revisão no processo da gestão de energia.

Porém apesar de toda esta ineficiência este setor é muito importante para o ambiente das cidades mundiais durante os períodos noturnos [20], trazendo fatores como o conforto e a segurança para as pessoas, e, não podemos simplesmente desligar a rede de iluminação, dessa forma é necessário explorar estratégias e soluções para redefinir a forma como usamos as redes de iluminação de uma forma a atingir a sua eficiência energética.

Observando o panorama global no contexto da eficiência energética da iluminação pública testemunhamos um período transacional no qual as fontes de energia renovável e limpa não são ainda economicamente viáveis nem sustentáveis para responder à procura atual [21], dessa forma e da necessidade de alternativas viáveis surgem novas soluções com foco na redefinição da distribuição de energia e nos padrões de consumo, tentando ultrapassar o desnível na sustentabilidade surgindo nas soluções como destaque o conceito das *Smart Cities* [23].

As *Smart Cities* desempenham um papel cada vez mais importante no caminho rumo à sustentabilidade energética, estas representam a gestão dos recursos através de abordagens baseadas na sustentabilidade digital por forma a melhorar a qualidade de vida das pessoas, para tal existe uma integração entre o mundo digital e os recursos físicos permitindo às *Smart Cities* assentar em pilares como a conectividade (ex.: edifícios autónomos), segurança, mobilidade(ex.: rede de transportes e mobilidade inteligente), e sustentabilidade (ex.: gestão inteligente da energia) potenciando desta forma esse aumento na qualidade de vida das pessoas. Dessa forma as redes de iluminação pública das cidades estão a optar por abordagens cada vez mais tecnológicas, permitindo dessa forma economias significativas no consumo de energia. Porém, apesar do retorno económico, a eficiência desse mesmo consumo energético nem sempre é obtido [23].

O termo de eficiência energética no contexto da iluminação pública é um contexto mais amplo que apenas a poupança nos consumos, estendendo-se também para conceitos de natureza sociotécnica, dessa forma para medir a sua eficiência energética numa perspetiva de apoio à

decisão temos de considerar a eficiência energética desde as suas bases e numa perspetiva socioeconómica [21].

A União Europeia têm feito alguns esforços para aumentar a eficiência energética dos seus estados membros. Dessa forma têm surgido planos para combater a ineficiência energética, nomeadamente o documento *2030 climate & energy framework* e o PNAEE (Plano de Ação Nacional para a Eficiência Energética) [18], este segundo criado por Portugal.

Considerando a iluminação pública, esta assume um papel crucial na melhoria da eficiência energética europeia [24], e para tal foram criados documentos com normas e orientações para a iluminação das vias públicas pedonais e rodoviárias denominado de EN 13201 [25].

Ao longo desta secção iremos estudar os sistemas existentes dedicados à gestão de redes de iluminação pública e tirar ilações sobre o panorama geral da utilização destes sistemas no domínio da eficiência energética nas redes de iluminação pública, iremos também abordar tópicos relativos ao âmbito da gestão das redes de iluminação pública.

2.1 Visão geral sobre o panorama da iluminação pública em Portugal

A segurança e conforto dos cidadãos em períodos noturnos nas vias públicas está diretamente ligada à iluminação pública, 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 [15].

Através da Figura 2, podemos observar que em Portugal as fontes de 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. 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.

O consumo de energia está relacionado com o aumento de qualidade de vida dos cidadãos e

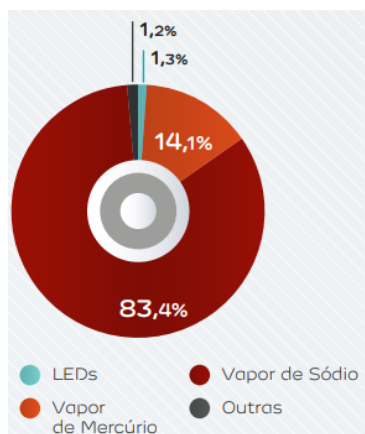


Figura 2: Tipos de fontes de luz utilizadas na iluminação pública (em percentagem). Fonte: [2]

isso faz com que o consumo energético em Portugal seja elevado. Como podemos observar na Figura 3 a iluminação pública é responsável por cerca de 3% do consumo total de energia em Portugal [3].

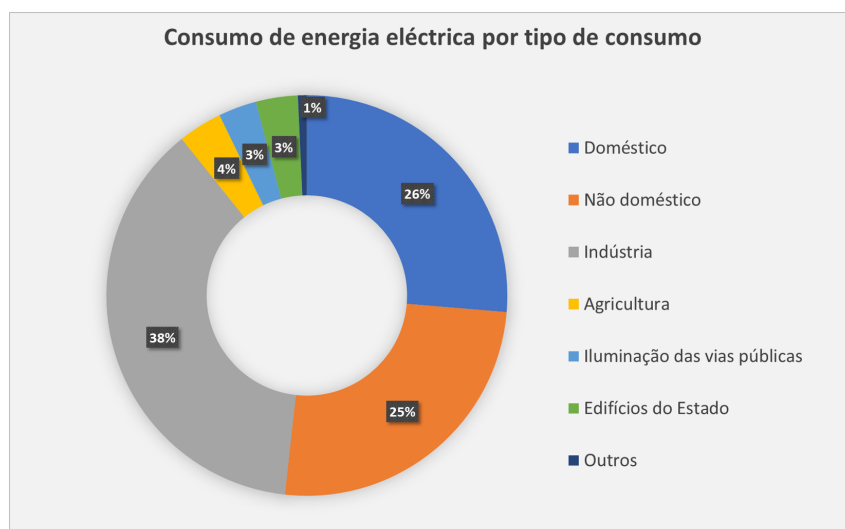


Figura 3: Consumo de energia elétrica por tipo em Portugal (em percentagem). Fonte: [3]

2.2 Fatores influenciadores da iluminação pública

O funcionamento das luminárias está dependente de vários agentes que influenciam o seu normal padrão de funcionamento, existindo vários fatores que influenciam o seu funcionamento sendo os mais abordados no contexto da iluminação pública os fatores externos e internos das luminárias, os fatores de qualidade de vida e o fator associado à manutenção das mesmas [26].

Os fatores internos e externos às luminárias são aqueles que afetam diretamente o padrão de funcionamento das luminárias e a qualidade e intensidade de luz emitida pelas mesmas,

os fatores internos estão relacionados com as configurações internas das luminárias como por exemplo a potência, *dimming*, temperatura de funcionamento da luminária, fluxo luminoso, entre outros, por sua vez os fatores externos relacionam-se a fatores do contexto no qual luminária se encontra instalada e que afetam o funcionamento da mesma tais como a temperatura ambiental, as condições de visibilidade, o tipo de instalação, o luar, entre outros [26].

Os fatores de qualidade de vida são bastante importantes e podem dividir-se em fatores ambientais, associados às emissões de CO₂, e fatores de qualidade da luz, estando estes associado a questões sociais e de segurança para quem circula nas vias públicas para as quais deve ser garantida qualidade na iluminação. O fator de manutenção é um tópico importante e complexo para a iluminação pública uma vez que afeta a qualidade da luz emitida pelas luminárias alterando o padrão de funcionamento das mesmas. Com o tempo as mesmas vão sofrendo desgaste e acumulando poeiras nas suas superfícies diminuindo a qualidade do seu fluxo luminoso, desta forma, as luminárias deveriam sofrer processos de manutenção frequentes e não a tradicional substituição da lâmpada avariada [27] [28].

2.3 Regulamentação existente para a iluminação pública

Existem vários fatores que influenciam o normal funcionamento das luminárias, nomeadamente os fatores de qualidade de vida. Estes fatores encontram-se diretamente ligados às normas existentes para as redes de iluminação pública, nesse sentido e a pensar no conforto dos cidadãos a União Europeia criou a norma EN 13201 [25] contendo os *standards* que devem ser seguidos pelas redes de iluminação pública para fornecer a devida iluminação nas vias públicas por forma a garantir o conforto dos cidadãos nas mesmas. Esta norma encontra-se dividida em 4 documentos com propósitos distintos:

- EN13201-1: Escolha das classes de iluminação;
- EN13201-2: Parâmetros fotométricos recomendados;
- EN13201-3: Cálculo dos parâmetros fotométricos;
- EN13201-4: Métodos de medida das performances fotométrica.

Em Portugal, e tendo por base a norma EN13201, foi elaborado o Documento de Referência para a Eficiência Energética na Iluminação Pública (DREEIP). 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 a diminuição das emissões de CO₂ durante o período de utilização das mesmas. Este documento, encontra-se dividido em duas partes:

- Documento de referência – Parte I – conceitos de luminotecnica [29]
- Documento de Referência – Parte II – Projeto de Iluminação Pública – Especificações [30]

Uma instalação de iluminação pública portuguesa, de acordo com o DREEIP, deve ser inserida numa de quatro classes de iluminação definidas por este documento, este define as classes de iluminação M, C, P e iluminação de passeadeiras. Uma classe de iluminação por sua vez é definida por um conjunto de requisitos fotométricos que visam as necessidades visuais dos utilizadores, em certos tipos de vias rodoviárias e meio ambiente.

As classes M destinam-se a vias para tráfego motorizado, como autoestradas, vias de circulação periféricas aos tecidos urbanos, vias de acesso, estradas secundárias, estradas municipais, de traçado simples e, as vias dentro do perímetro urbano de tráfego misto, onde interagem peões, veículos não motorizados e motorizados, no entanto, com predominância de veículos motorizados, estando excluídas desta classe todas as áreas que constituam zonas de conflito. As zonas de conflito ocorrem quando vias de circulação automóvel se intersectam ou desembocam em áreas frequentadas por pedestres, ciclistas ou outros utilizadores

As classes de iluminação P destinam-se a zonas exclusivas para peões e/ou ciclovias, com tráfego misto predominantemente pedonal ou com veículos não motorizados, e a todas as vias em que a velocidade de circulação de veículos motorizados seja inferior a 50Kms/h.

As classes de iluminação de passeadeiras são as zonas criadas para permitir o atravessamento das vias por parte dos peões, onde durante a noite há um risco elevado de colisão entre veículos motorizados e os peões, esta classe por sua vez encontra-se sempre inserida em conjunto com as classes anteriores [30]. Cada uma destas classes está associada pela norma a um nível de iluminação que deve ser respeitado e estar presente durante os períodos para garantir a segurança e conforto dos cidadão.

2.4 Trabalhos relacionados

De forma a atingir as metas estipuladas para atingir uma maior eficiência energética e tendo em conta a relevância deste tópico, surgem muitos estudos nesta área. Da análise deste domínio concluímos, como esperado, que a maioria dos estudos utilizam na sua base sistemas de controlo inteligente e luminárias com tecnologia de luz LED.

Da análise das diferentes abordagens apresentadas como solução para o problema da ineficiência energética podemos agrupar as mesmas em várias categorias, pois várias abordagens recorrem frequentemente aos mesmos raciocínios como solução para o problema.

Parte das abordagens e uma das mais comuns passa pela simples substituição das luminárias obsoletas baseadas em Lâmpadas de Sódio de Alta Pressão (HPS) por luminárias LED baseadas em lâmpadas de Díodo Emissor de Luz (LED), uma vez que os estudos indicam que só pela simples substituição do tipo de luminárias conseguimos atingir poupanças significativas [31], e que essas mesmas poupanças aumentam quando as luminárias LED são utilizadas em conjunto com soluções inteligentes de gestão [32, 33]. O uso destas soluções de controlo de iluminação inteligente baseados na tecnologia LED possui 3 grandes benefícios em comparação com outros sistemas de iluminação tradicionais [22]:

- 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.

Porém apesar das grandes vantagens desta abordagem a mesma apresenta como desvantagem o elevado custo para a sua implementação surgindo desta forma abordagens que têm em conta o custo de implementação e os seus benefícios como por exemplo as abordagens

referidas em [20, 34, 35] e outras que apenas estudam os benefícios retirados pela otimização do consumo, assumindo que os custos a longo prazo irão ser compensados em termos de eficiência energética como é o caso das abordagens [23, 36–38].

Outra das abordagens utilizada foca a sua solução na interligação e comunicação entre as luminárias através de sensores para recolha de dados, sendo estes dados analisados ou por um especialista domínio ou por métodos de análise de dados, que posteriormente à sua análise fornecem uma sugestão de alteração a efetuar na rede de iluminação pública. Esta decisão pode existir sob duas formas ou é uma decisão autónoma em que a rede de iluminação pública com base nos dados recolhidos e pela análise dos dados toma uma decisão sem intervenção humana como efetuado no estudo [39], ou, os dados são apresentados ao gestor da rede de iluminação pública e este deve decidir com base em regras pré existentes qual a melhor forma para o funcionamento da rede com base nos dados apresentados, em [32, 33, 40, 41] podemos ver exemplos de estudos que utilizam este tipo de abordagem como solução.

A última categoria de abordagens estudadas foram as abordagens baseadas em sistemas inteligentes, estas abordagens apresentam soluções mais complexas como o uso de algoritmos de inteligência artificial, por exemplo, para analisar os dados e fornecer outputs sem que seja necessário a existência de condições pré definidas para classificar os mesmos, as abordagens presentes em [19, 42–44] apresentam soluções nas quais este tipo de abordagens são utilizadas.

A tabela 2 resume as abordagens apresentadas anteriormente quanto ao foco, aos artefactos criados e às abordagens utilizadas nas mesmas.

2.5 Conclusão

Através da análise ao estado da arte podemos observar que o conceito da eficiência energética é um conceito muito importante na sustentabilidade futura e que tem tido grande destaque para entidades como a união europeia de forma a diminuir o uso de energia, evitar o uso excessivo dos combustíveis fósseis e substituição destes por energias limpas e renováveis.

Desta forma e devido a todo este interesse gerado observamos que surgem inúmeros projetos para tentar a resolução deste problema, existindo muitas abordagens diferentes, sendo a grande maioria focada na substituição das luminárias obsoletas ou na análise de dados

Trabalho	Foco	Tipo de artefacto desenvolvido				Tipo de abordagem seguida			Com princípio de gestão de conhecimento
		Modelo	Arquitetura	Plataforma	Outros	Semântica	I.A.	Outras	
[20]	Substituição das luminárias obsoletas por luminárias led tendo em conta o preço e benefícios				X			X	
[34]					X			X	
[35]					X			X	
[23]					X			X	
[36]	Substituição das luminárias obsoletas por luminárias led tendo em conta os benefícios da otimização do consumo				X			X	
[37]					X			X	
[38]					X			X	
[39]			X					X	
[33]	Classificação de dados através da utilização de regras pré-definidas que podem ser aplicadas na rede de forma autónoma ou pelo gestor da rede		X					X	
[32]			X					X	
[40]			X					X	
[41]			X					X	
[19]	Utilização de sistemas inteligentes		X			X		X	X
[42]				X	X	X			
[43]		X				X			X
[44]		X				X			

Tabela 2: Resumo das abordagens estudadas

provenientes das luminárias e de sensores, porém quase todas as soluções apresentam-se como 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.

Da análise efetuada sentimos, portanto, que faltava algo para que estas atingissem os chamados sistemas inteligentes rumo à eficiência energética em que cada luminária da rede conseguisse operar de forma completamente autónoma, automática e que realmente permitisse ajudar da melhor forma na gestão das redes de iluminação pública. Nas abordagens estudadas acreditamos estar em falta o estudo do domínio das áreas circundantes à iluminação pública como por exemplo as normas de iluminação pública, instalação das luminárias, fatores externos à luminária (ex. temperatura ambiente, luar, condições meteorológicas), entre outros, esse conhecimento deveira posteriormente ser aplicado em modelos semânticos.

Todos estes domínios influenciam o funcionamento das luminárias, por exemplo o luar, consoante a lua poderá iluminar mais as vias, ora, com mais iluminação natural fornecida pela lua não será necessário tanta iluminação artificial nas vias públicas, o que nos permite diminuir a intensidade com que as luminárias emitem luz permitindo poupanças nas mesmas, ou seja, analisando e formalizando o domínio da iluminação pública e todos os domínios circundantes conseguimos ter uma ideia mais ampla de tudo o que pode ou não influenciar o normal

funcionamento das redes de iluminação pública.

Desta forma, podemos ter um maior conhecimento do que podemos ou não fazer que possa influenciar na melhor decisão possível para o especialista do domínio, com esta análise podemos ainda dar ao especialista de domínio novas regras não diretamente relacionadas com as luminárias mas através das quais podemos obter poupanças que por muito insignificantes que possam parecer se tivermos em conta a rede mundial de iluminação pública a diferença que podemos fazer muda de escala e passa a ter um impacto gigante rumo à eficiência energética.

Capítulo 3

Modelo sócio-semântico para apoio à gestão da iluminação pública

Da análise do estado da arte conseguimos perceber que as abordagens existentes apesar de contribuírem para a resolução do problema carecem ainda de alternativas que permitam uma gestão inteligente e eficiente das redes de iluminação pública.

Ao longo deste capítulo focamos na metodologia de trabalho e na representação do conhecimento do domínio num modelo sócio-semântico [45], tendo em conta todos os fatores inerentes à gestão das redes de iluminação pública. O modelo apresentado é um modelo sócio-semântico pois este foca duas componentes, uma primeira componente social pois envolvemos todas as pessoas, ou seja, os especialistas de domínio e os engenheiros de conhecimento (neste caso os autores) na definição do domínio e todos os aspetos de contexto da luminária e uma segunda componente semântica na qual representamos o significado dos conceitos do domínio, quer técnico (*watts*, temperatura, *dimming*, *lumens*, entre outros) quer sociais (conforto dos cidadãos, perceção de segurança, entre outros) através de uma rede semântica.

O conhecimento do domínio obtido será instanciado num sistema de organização de conhecimento (KOS), capaz de categorizar os padrões de comportamento, consumo e de conforto luminoso nas redes de iluminação pública. Estes padrões contribuirão para a implementação de um sistema de gestão autónoma das redes de iluminação pública que otimize os consumos de energia mantendo a qualidade da luz, a segurança e o conforto dos cidadãos respeitando as normas para a iluminação pública. Através deste sistema o especialista de domínio obterá

ajuda na tomada de decisão para a gestão das redes de iluminação pública.

3.1 Metodologia

Transitar das luminárias públicas tradicionais para luminárias inteligentes baseadas em LED é apenas o primeiro passo para a implementação de medidas de eficiência energética na gestão da iluminação pública das cidades.

Através desses dispositivos inteligentes conseguimos adotar um modelo de fluxo de dados com canais de comunicação nos dois sentidos, permitindo tanto obter informações desses dispositivos como utilizar essa mesma informação para os controlar. Neste contexto, novos modelos de sistemas de apoio à decisão são necessários para lidar com esses cenários baseados em dados, cujo processo de tomada de decisão depende de outras informações para além dos dados técnicos das luminárias públicas, incluindo também o conhecimento especializado do domínio e dados processados nos quais são identificados padrões de uso e/ou limites provenientes do histórico de uso das luminárias. Este sistemas trazem-nos grandes vantagens, e criam-nos uma questão de investigação:

Como devemos acomodar o conhecimento específico do domínio, dados internos das luminárias e informações obtidas dos processos de análise dos dados, num modelo capaz de classificar cada luminária pública de acordo com o seu comportamento de consumo e ajustar o seu intervalo de *dimming*?

Para responder à questão, desenhamos uma metodologia baseada em conhecimento, esquematizada na figura 4, combinando uma abordagem semântica e incorporando resultados de processos de Inteligência artificial. De notar que neste trabalho apenas focamos no trabalho desenvolvido pela abordagem semântica.

Do ponto de vista das disciplinas científicas envolvidas na metodologia de pesquisa, a abordagem semântica é sustentada por uma análise conceptual [46] seguida de um processo de engenharia de ontologias, envolvendo a recolha de informações de domínio relevantes, seja a partir de revisões de literatura ou por meio de reuniões com especialistas do domínio, cujo objetivo é fornecer uma representação do conhecimento partilhável e reutilizável para os fatores de desempenho energético da iluminação pública. O resultado dessa *framework* de entendimento é articulado numa ontologia, capaz de processar e raciocinar os dados das luminárias

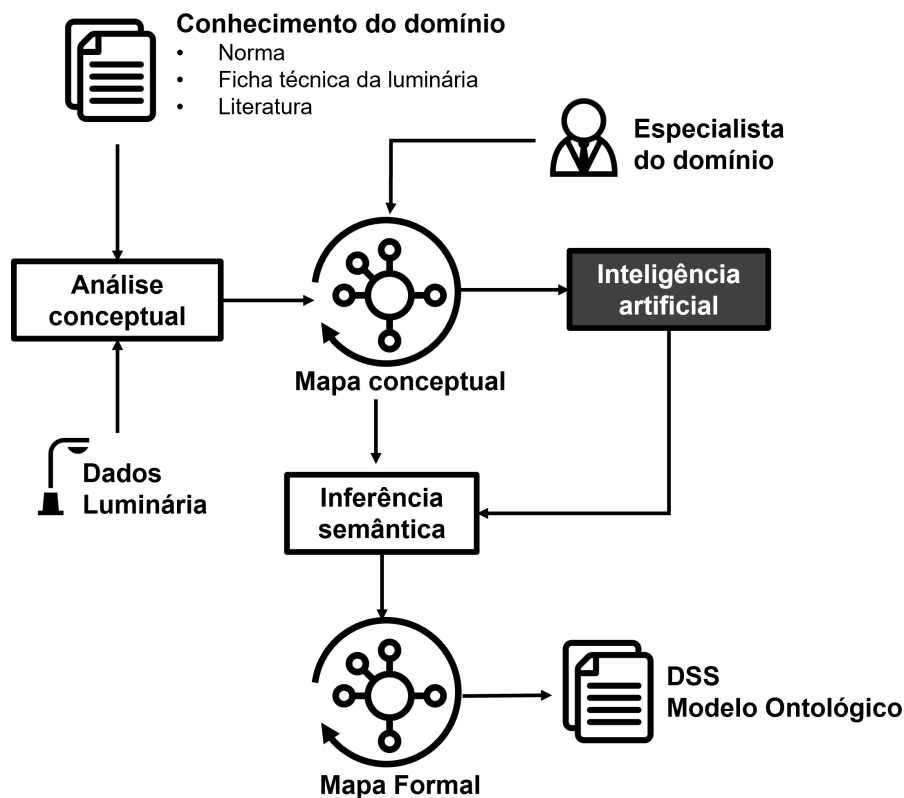


Figura 4: Metodologia de Pesquisa Baseada em Conhecimento

públicas.

Quanto à abordagem de IA (inteligência artificial), esta fornece uma compreensão computacional dos dados das luminárias públicas, focando não apenas na sua análise exploratória, mas na exploração de outras fontes de dados relevantes que, de acordo com a análise conceitual, podem influenciar o funcionamento das luminárias. A extensão com que as variáveis internas e externas influenciam os padrões de operação da iluminação pública é determinada quantitativamente e validada através de técnicas de ML (*machine learning*). Esses resultados devem ser incorporados nas regras da ontologia, fornecendo um artefacto de suporte à decisão baseado em conhecimento. A Tabela 3 resume o papel de cada perspectiva científica para responder à pergunta de pesquisa.

De uma perspectiva mais pragmática, o papel da semântica passa por reunir, numa visão comum e partilhável, todas as informações do domínio relevantes relacionadas a fatores internos e externos que possam influenciar o grau de eficiência de uma luminária pública. Os principais termos e conceitos, propriedades e relações entre conceitos, tanto do ponto de vista técnico como normativo, foram representados num modelo conceptual e formalizados numa ontologia. Por outro lado, o papel da IA passa por estudar o *dataset* com as informações de

	Abordagem Semântica	Abordagem IA baseada em dados
O quê	i) analisar o conhecimento do domínio e efetuar as inferências explícitas ii) categorização semântica dos conceitos das luminárias iii) fornecer uma estrutura comum para o comportamento das luminárias para fornecer uma melhor gestão dos dados	i) analisar os dados das luminárias para detectar "erros" e validar as inferências do domínio ii) encontrar coerências nos conceitos das luminárias iii) fornecer relações entre as variáveis exploratórias para prever o comportamento das luminárias
Como	i) Análise conceptual ii) Inferência Semântica	i) Análise exploratória dos dados ii) <i>Machine Learning</i>
Artefactos	i) Modelo Semântico (Ontologia)	i) Modelos de correlação e algoritmos de classificação/previsão de <i>machine learning</i>
Objetivo	Classificação do comportamento das luminárias e inferência sobre o impacto do comportamento das luminárias no desempenho do consumo de energia	

Tabela 3: Papel de cada perspectiva científica.

305 luminárias com 3963730 instâncias dos dados, correspondendo a uma operação de quatro meses, através de um processo de análise de dados para descobrir a correlação entre os dados das luminárias públicas e do seu ambiente, identificando a extensão da complementaridade entre os fatores internos e externos (por exemplo, temperatura interna das luminárias vs temperatura climática). Adicionalmente, pretendia-se identificar padrões e limites que pudessem ser associados a um comportamento óptimo para o funcionamento das luminárias públicas.

A convergência desses dois métodos de pesquisa resultou no desenvolvimento de uma ontologia, utilizada para a classificação automática de cada luminária, de acordo com seu padrão de funcionamento e contexto (obtido a partir dos seus fatores de consumo internos e externos), bem como o leque de ações que podem ser tomadas para melhorar a sua eficiência. Em termos práticos, uma luminária específica pode ser classificada como operando num "padrão de eficiência base" e, simultaneamente, uma nova relação ser classificada e relacionar a luminária a um tipo de ação de "diminuição do *dimming*". Devido às restrições das luminárias utilizadas neste caso de estudo [1], as ações disponíveis estão limitadas a ajustes do valor do *dimming* e operações de ligar e desligar a luminária.

Esta abordagem partilhada entre IA e a semântica foi fundamental para a definição de algumas regras semânticas, mais especificamente as relacionadas à identificação do padrão de funcionamento óptimo das luminárias públicas, que foi recuperado da análise de ML. Por outro lado, a

ontologia, por representar um vocabulário partilhável e uma estrutura comum do domínio, contribui para as interpretações dos resultados dos algoritmos de ML. No entanto, num cenário típico de funcionamento, a ontologia é o motor que reúne e calcula os dados das luminárias para a descoberta das ações adequadas para cada uma das luminárias e a IA, atua como serviço de fundo que realiza a análise dos dados para descobrir novos padrões que possam ser, posteriormente, incorporados na ontologia.

3.2 Conceptualização do domínio

A definição de eficiência energética está relacionada com o uso da menor energia possível para produzir a mesma quantidade de energia ou energia útil [47]. A ideia é minimizar o consumo de energia sem prejudicar a qualidade da mesma e o conforto dos cidadãos. O processo de gerir o comportamento da iluminação pública, no sentido do melhor equilíbrio entre a eficiência energética e os padrões de conforto luminoso, implica compreender quais são os fatores de consumo subjacentes e como contribuem para o desempenho de uma luminária.

Nesse contexto, a eficiência energética deve ser abordada como um conceito holístico [25], incluindo diversos fatores ou parâmetros que podem ser classificados em internos e externos. Os fatores internos estão relacionados à corrente (I), tensão (v), energia elétrica (w), cor e temperatura. Os fatores externos incluem dados ambientais [48], a localização da instalação das luminárias [25], bem como parâmetros que descrevem a qualidade da luz [9]. De forma a atingir a abordagem referida, seguimos uma análise conceptual, através da qual procedemos à identificação do conceito por meio da extração de termos do domínio, análise do conhecimento a que se referem e representação das relações semânticas entre conceitos pertencentes a uma rede de iluminação pública. Essa representação de conhecimento originou uma framework para a compreensão do comportamento de consumo das redes de iluminação pública.

O processo de conceptualização foi desencadeado pela definição de um conjunto de Questões de Competência (QCs) [49], que visam definir o âmbito da análise conceptual. Além disso, as QCs também podem atuar como uma espécie de critério de paragem, na medida em que, se todas as perguntas forem respondidas, o processo pode terminar. As questões de competência identificadas foram:

- CQ1 - Que tipo de fatores podem contribuir para o comportamento de consumo das redes de iluminação pública?
- CQ2 - Quais são os principais tipos de comportamento de consumo das luminárias LED?
- CQ3 - Quais circunstâncias determinam o comportamento de consumo da iluminação pública?
- CQ4 - Que tipo de elementos definem o conforto da luz?
- CQ5 - Que tipo de restrições de conforto de luz contribuem para o comportamento de consumo das redes de iluminação pública?
- CQ6 - Que tipo de elementos determinam o desempenho da eficiência numa rede de iluminação pública?
- CQ7 – Que ações podem ser realizadas no âmbito da gestão da Iluminação Pública?

A Figura 5 mostra a ontologia conceptual para o desempenho do consumo de uma rede de iluminação pública, representando desta forma o seu domínio. Parte-se do raciocínio de que as luminárias de rua têm um comportamento de consumo que pode ser classificado de acordo com seu desempenho energético e desempenho de qualidade da luz. Esta classificação é obtida de acordo com o padrão de consumo de energia da luminária definido de acordo com vários fatores tais como:

- poupança obtida pela eficiência da luminária;
- fatores internos como dimming, temperatura e potência;
- fatores externos como luar, clima, tráfego, poeira;
- fator de qualidade da luz, que dependem da localização da instalação do poste e do padrão de iluminância subjacente.

Os locais são classificados na norma EN 13201 de acordo com a categoria do local das luminárias e as necessidades dos cidadãos, que por sua vez têm um padrão de iluminância associado. Adicionalmente, considera-se também que o comportamento de consumo pode indicar que a fonte de iluminação pública está a funcionar de forma ineficaz ou fora de âmbito. Para cada padrão de comportamento da iluminação pública, uma determinada ação pode ser

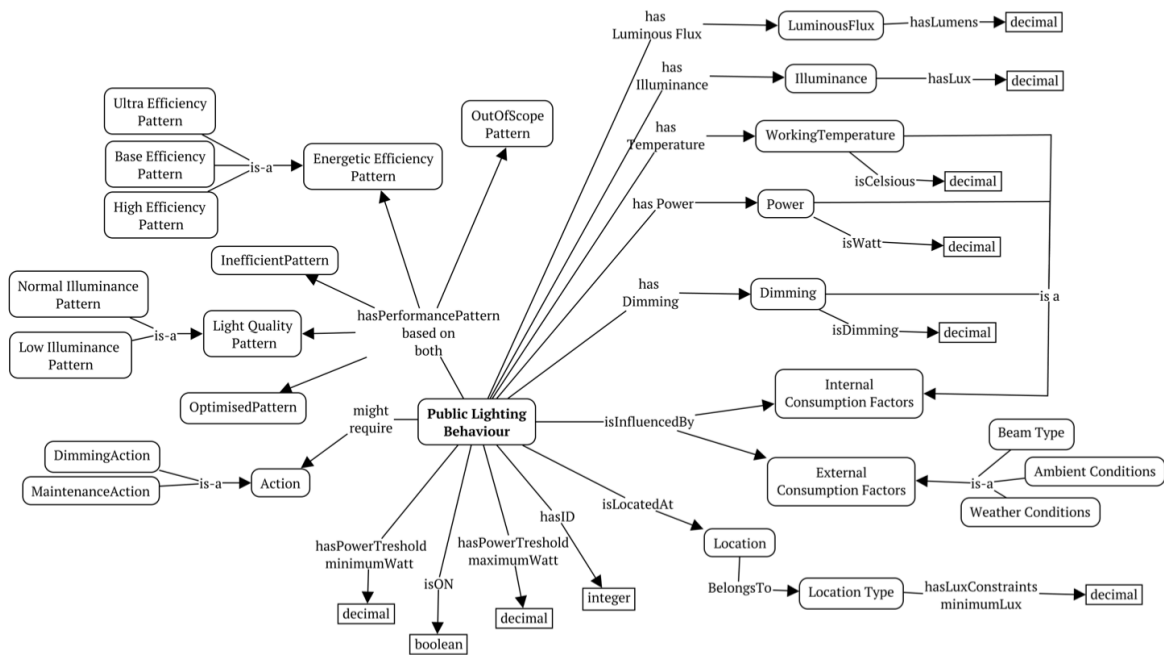


Figura 5: Ontologia conceptual dos comportamentos de consumo da Iluminação Pública

necessária, seja uma ação de manutenção ou uma ação de alteração do *dimming*. De acordo com as características da luminária, as interfaces disponíveis e a configuração técnica, nenhuma outra ação é viável.

Este esforço de conceptualização seguiu um processo iterativo e incremental, apoiado por revisões de literatura, com interações esporádicas com especialistas no domínio. A ontologia conceptual foi, posteriormente, formalizada. Entretanto, o modelo conceptual contribui já para a interpretação dos dados e classificação dos padrões de consumo numa perspetiva holística. A formulação de decisões úteis, normalmente compostas por uma cadeia de ações, deve estar alinhada aos resultados pretendidos. As relações entre ações e resultados são melhor compreendidas quando existe uma visão partilhada do domínio. Nesse sentido, a conceptualização facilita a classificação do estado do sistema, promovendo a utilidade das decisões.

3.3 Formalização da Ontologia

Uma ontologia pretende ser um artefacto formal para organização explícita do conhecimento de um domínio específico para apoiar atividades de resolução de problemas. Assim, pode ser usado como um modelo de suporte à decisão. No entanto, a sua utilidade é altamente dependente da complexidade e expressividade do seu vocabulário, que é dada por restrições

de classe, axiomas e regras.

A figura 5 representa a ontologia conceptual contendo os principais termos e conceitos do domínio, semanticamente estruturados através de relações conceptuais. Para que esse modelo seja usado como um artefato semântico computacional, as suas relações devem estar definidas através de restrições lógicas.

Dessa forma uma ontologia formal foi desenvolvida utilizando o editor de ontologias *Protégé*¹, onde as seguintes ações foram realizadas:

- Definição da *Class hierarchy*;
- Definição da hierarquia das *ObjectProperties*;
- Modelação das *class associations* através das *ObjectProperties* indentificando as *Domain classes* e as *Range classes* apropriadas;
- Definição das *DataProperties* identificando o *Domain (Classes)* e o *Range(literal, i.e., a value type)* apropriados;
- Identificação das restrições semânticas relevantes para o domínio para as principais funções da classificação da ontologia (tabela 4);
- Definição das *Classes* através de restrições lógicas, utilizando axiomas e regras, como indicado na tabela 5. Essas restrições permitem que a ontologia classifique o comportamento da Iluminação Pública, tanto em relação ao desempenho do conforto de luz quanto ao desempenho de eficiência energética, e determinar ações simples de acordo com o seu estado. As regras e os axiomas foram desenvolvidos em *Semantic Web Rule Language* e *Description Logic*, respectivamente.

Objetivo	Descrição das declarações lógicas
Restrição de dimming	Uma luminária deve estar localizada em apenas numa localização. Uma localização deve pertencer a um tipo de localização ao qual pertence.
Restrição do padrão de performance das PL #1	As PL ² podem ter pelo menos 1 padrão de eficiência energética e, no máximo, 1 padrão de qualidade de luz.
Restrição do padrão de performance das PL #2	As PL podem ser classificadas como um dos seguintes padrões: Inefficient, Optimized or OutOfScope. Nesse caso, nenhum outro padrão pode classificar a instância. Mas, se uma instância de PL for classificada com um padrão de eficiência energética específico, ela também pode ser classificada com um padrão de qualidade de luz. Isso implica que os padrões Inefficient, Optimized or OutOfScope sejam disjuntos

Tabela 4: Restrições semânticas relevantes.

¹<http://protege.stanford.edu>

Uma vez mais, beneficiando-se da abordagem partilhada apresentada na metodologia, algumas das afirmações criadas derivaram dos resultados da abordagem de IA. A definição de limites e a previsão da iluminância são exemplos de conceitos utilizados na definição das regras de inferência. No final da fase de formalização, obtemos como artefacto ontológico, representado em *Web Ontology Language* (OWL), uma ontologia para efetuar classificações no domínio da iluminação pública eficiente. A figura 6 representa uma visualização do *Protégé* onde podemos observar o artefacto ontológico criado.

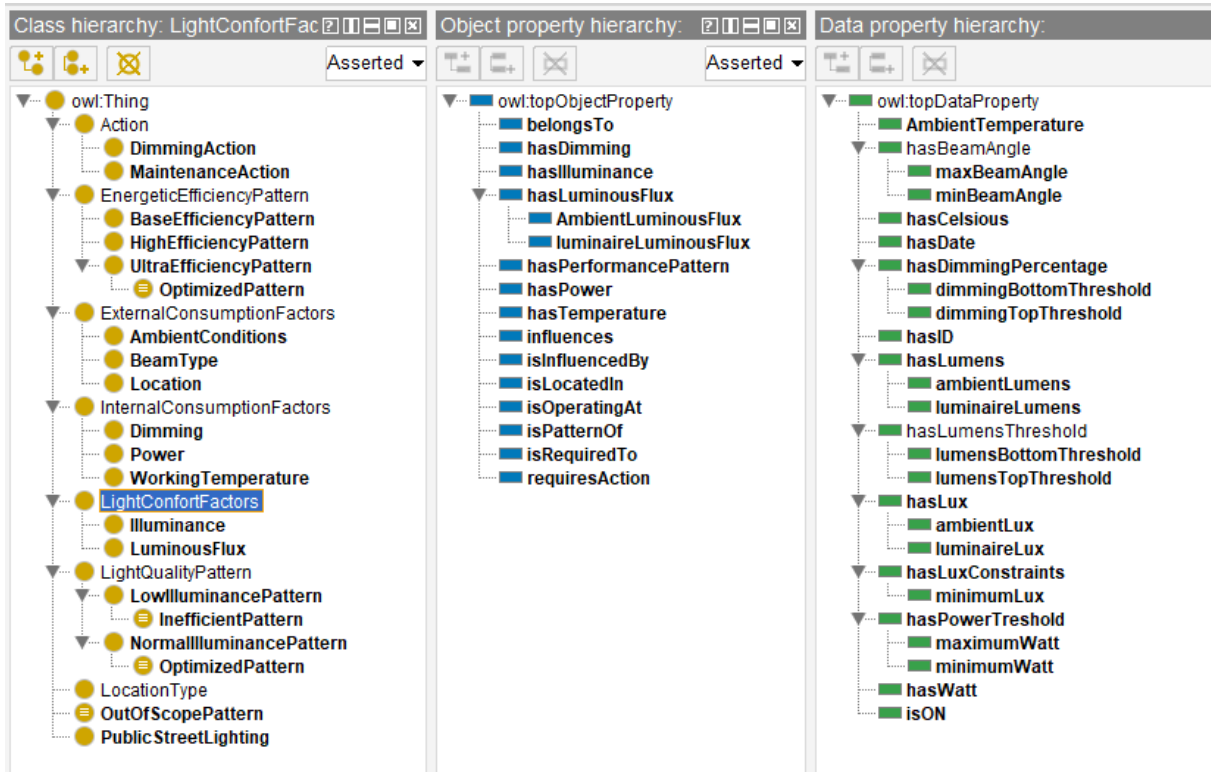


Figura 6: Visualização da ontologia no editor de ontologias Protégé

Objetivo	Declarações Lógicas
	Estado das Luminárias
Revela quais luminárias operam no padrão BaseEfficiencyPattern	SWRL Rule: PublicStreetLighting(?PL), hasWatt(?PL, ?watt), hasLumens(?PL, ?lumens), greaterThan(?lumens, 1559), greaterThan(?watt, 15), lessThanOrEqual(?lumens, 7460), lessThanOrEqual(?watt, 66) ->BaseEfficiencyPattern(?PL)
Revela quais luminárias operam no padrão HighEfficiencyPattern	RULE: PublicStreetLighting(?PL), hasWatt(?PL, ?watt), hasLumens(?PL, ?lumens), greaterThan(?lumens, 1583), greaterThan(?watt, 12), lessThanOrEqual(? lumens, 12142), lessThanOrEqual(?watt, 102) ->HighEfficiencyPattern(?PL)
Revela quais luminárias operam no padrão UltraEfficiencyPattern	RULE: PublicStreetLighting(?PL), hasWatt(?PL, ?watt), hasLumens(?PL, ?lumens), greaterThan(?lumens, 1615), greaterThan(?watt, 12), lessThanOrEqual(? lumens, 15502), lessThanOrEqual(?watt, 127) ->UltraEfficiencyPattern(?PL)
Revela quais luminárias operam no padrão NormalIlluminancePattern	RULE: PublicStreetLighting(?PL), isLocatedIn(?PL, ?L), luminaireLux(?PL, ?lux), ambientLux(?PL, ?aLux), LocationType(?LT), belongsTo(?L, ?LT), minimumLux(?LT, ?minLux), swrlb:greaterThan(?lux, 2) ->NormalIlluminancePattern(?PL)
Revela quais luminárias operam no padrão LowIlluminancePattern	RULE: PublicStreetLighting(?PL), isLocatedIn(?PL, ?L), luminaireLux(?PL, ?lux), ambientLux(?PL, ?aLux), LocationType(?LT), belongsTo(?L, ?LT), swrlb:lessThan(?lux, 2) ->LowIlluminancePattern(?PL)
Revela quais luminárias operam com o dimming no padrão OptimalDimming (ente 55% e 65%)	PublicStreetLighting(?PL), Dimming(?D), Dimming(OptimalDimming), hasDimmingPercentage(?PL, ?dim), dimmingTopThreshold(OptimalDimming, ?tdim), dimmingBottomThreshold(OptimalDimming, ?bdim), swrlb:greaterThanOrEqual(?dim, ?bdim), swrlb:lessThanOrEqual(?dim, ?tdim) -> hasDimming(?PL, OptimalDimming)
Revela quais luminárias operam com o dimming no padrão HighDimming (acima dos 90%)	PublicStreetLighting(?PL), Dimming(?D), Dimming(HighDimming), hasDimmingPercentage(?PL, ?dim), dimmingTopThreshold(HighDimming, ?tdim), dimmingBottomThreshold(HighDimming, ?bdim), swrlb:greaterThanOrEqual(?dim, ?bdim), swrlb:lessThanOrEqual(?dim, ?tdim) -> hasDimming(?PL, HighDimming)
Revela quais luminárias operam com o dimming no padrão LowDimming (abaixo dos 55%)	PublicStreetLighting(?PL), Dimming(?D), Dimming(LowDimming), hasDimmingPercentage(?PL, ?dim), dimmingTopThreshold(LowDimming, ?tdim), dimmingBottomThreshold(LowDimming, ?bdim), swrlb:greaterThanOrEqual(?dim, ?bdim), swrlb:lessThanOrEqual(?dim, ?tdim) -> hasDimming(?PL, LowDimming)
Revela quais luminárias operam no padrão NormalDimming (ente 65% e 90%)	PublicStreetLighting(?PL), Dimming(?D), Dimming(NormalDimming), hasDimmingPercentage(?PL, ?dim), dimmingTopThreshold(NormalDimming, ?tdim), dimmingBottomThreshold(NormalDimming, ?bdim), swrlb:greaterThanOrEqual(?dim, ?bdim), swrlb:lessThanOrEqual(?dim, ?tdim) -> hasDimming(?PL, NormalDimming)
Revela quais luminárias operam no padrão de eficiência OutOfScopePattern	DL Axiom: OutOfScopePattern $\equiv \neg(\text{BaseEfficiencyPattern} \sqcup \text{HighEfficiencyPattern} \sqcup \text{UltraEfficiencyPattern})$
Revela quais luminárias operam no padrão de eficiência InefficientPattern	DL Axiom: InefficientPattern $\equiv \text{LowIlluminancePattern} \sqcap (\text{hasDimming} : \text{OptimalDimming}) \sqcap (\text{hasPower} : \text{HighPowerMode})$
Revela quais luminárias operam no padrão de eficiência OptimizedPattern	DL Axiom: OptimizedPattern $\equiv \text{NormalIlluminancePattern} \sqcap \text{UltraEfficiencyPattern} \sqcap (\text{hasDimming} : \text{OptimalDimming})$
	Ações da Luminária
Revela quais luminárias necessitam de aumentar o dimming	PublicStreetLighting(?PL), LowIlluminancePattern(?PL), hasDimmingPercentage(?PL, ?dim), swrlb:lessThan(?dim, 100), hasWatt(?PL, ?watt), swrlb:lessThan(?watt, 127), hasLumens(?PL, ?lm), swrlb:lessThan(?lm, 15502) -> requiresAction(?PL, increaseDimming)
Revela quais luminárias necessitam de diminuir o dimming	PublicStreetLighting(?PL), NormalIlluminancePattern(?PL), UltraEfficiencyPattern(?PL), hasDimmingPercentage(?PL, ?dim), swrlb:lessThan(?dim, 100), swrlb:greaterThan(?dim, 50) -> requiresAction(?PL, decreaseDimming)

Tabela 5: Estados, ações, axiomas e factos das luminárias

Capítulo 4

Caso de estudo

No âmbito do projeto 3SLM, efetuamos um estudo, no qual o objetivo foi desenvolver a base para um sistema inteligente de apoio à tomada de decisão na gestão das redes de iluminação pública, tendo em vista a eficiência dos consumos de energia.

Os dados fornecidos para estudar o problema provêm de um contexto real de produção de iluminação pública do município de Cascais composto por 305 luminárias Arquicity R1 da Arquiled (Figura 1), este modelo de luminária permite a recolha de dados da operação interna da luminária em tempo real, permitindo também alterar os parâmetros de funcionamento, concretamente, os valores de *dimming*, entre 0% e 100% para cada luminária de forma individual e em tempo real.

As luminárias utilizadas encontram-se, de acordo com a norma EN13201, instaladas numa zona P2 caracterizada como zona pedonal, estas encontram-se distribuídas unilateralmente numa rua de 4 metros de largura com 1 metro de passeio. Neste tipo de locais, e de acordo com a norma, a iluminância mínima permitida é 3 lux sendo que o valor médio normal utilizado para estes locais é de 15 lux. Para o cenário, assumimos que as luminárias se encontram a uma altura de 4 metros com uma distância entre as mesmas de 14,5 metros.

O *dataset* recolhido contém dados de 3.963.730 instâncias, sendo que cada instância descreve 5 minutos de funcionamento de uma luminária específica, contendo os dados da tensão instantânea, temperatura da luminária, potência instantânea, energia acumulada, tempo de atividade e *dimming*. Esses dados foram recolhidos num período de 4 meses compreendendo o período entre 5 de setembro de 2017 e 3 de janeiro de 2018. Estes dados sofreram um

processo de limpeza para retirar os dados de funcionamento considerados como anormais tais como os períodos de aquecimento da luminária utilizadas (primeiros 1 a 4 minutos após a luminária ser ligada) ou os períodos em que a mesma se encontra desligada, por exemplo, para manutenção. Deste processo foram descartadas 107.912 instâncias sendo o *dataset* final composto por 3.855.818 instâncias.

Os dados fornecidos pelo *dataset* do ambiente de produção apresentavam-se muito homogêneos, sendo maioritariamente compostos por instâncias com valores de *dimming* entre 80% e 90%, e, além disso, não apresentavam dados sobre os fatores externos à luminária que afetam o seu funcionamento. Esta homogeneidade dos dados deve-se a ser um *dataset* que provém de um contexto real de funcionamento no qual não foi possível realizar alterações nos parâmetros de funcionamento das luminárias para efeitos de teste.

Desta forma, e de acordo com o modelo conceptual apresentado na figura 5 foi necessário realizar um processo de enriquecimento do *dataset* de produção, processo esse que consistiu em duas tarefas. A primeira consistiu na integração dos dados meteorológicos, obtidos junto de uma estação meteorológica local para o período da recolha da instância, com o *dataset*. A segunda tarefa consistiu em montar um ambiente de laboratório exterior, nos períodos entre 31 de julho 2018 e 4 de outubro de 2018, configurado com as mesmas características do ambiente de produção equipado com sensores adicionais (sensores de luminosidade) para recolha de dados dos fatores externos à luminária.

Deste processo de enriquecimento surgiu um *dataset* mais detalhado, com a informação do funcionamento das luminárias (dados do *dataset* inicial de Cascais), aos quais foram agregados a informação dos dados meteorológicos e informação da luminosidade ambiente esta última que foi adicionada no *dataset* de produção por previsão tendo por base os valores do *dataset* do ambiente de laboratório criado.

Partindo deste novo *dataset* o trabalho efetuado no âmbito desta dissertação focou-se em criar uma ontologia para classificar os padrões de comportamento das luminárias de forma individual. Esta ontologia irá posteriormente servir como suporte à decisão numa rede de iluminação pública de forma a reduzir o consumo de energia da mesma, tendo sempre em consideração a segurança e o conforto dos cidadãos que circulam nas respetivas vias cumprindo sempre a regulamentação presente nas normas de iluminação das vias pública (EN1301).

4.1 Motor de inferência para a classificação dos dados

Após a formalização da ontologia podemos inferir sobre a mesma e extrair novo conhecimento, em particular:

1. classificação do modo de operação de cada luminária
2. identificação das ações necessárias de acordo com a classificação obtida

Desta forma, a ontologia entrará num processo de inferência, processo esse que compreende quatro etapas:

- Configuração do modelo base;
- Importação do *dataset* no modelo;
- Execução do motor de inferência;
- Visualização dos resultados;

Para o efeito foi criado o ambiente tecnológico representado pela figura 7, que adicionalmente procura associar as tecnologias às diferentes etapas elencadas anteriormente.

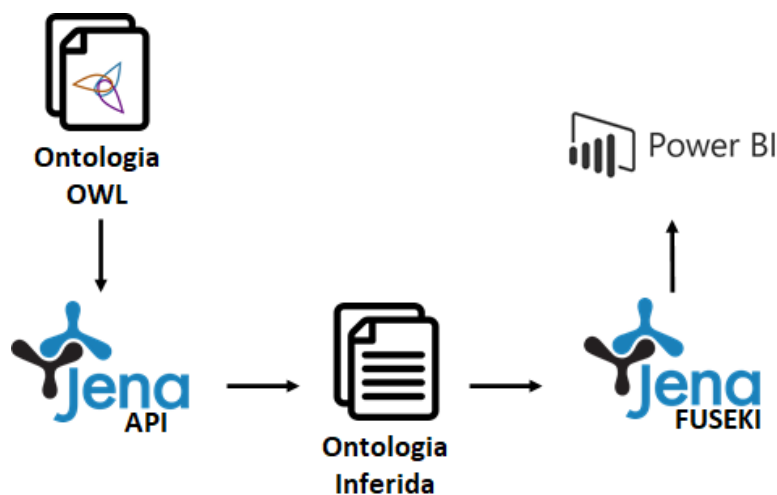


Figura 7: Protótipo da arquitetura da solução

Na primeira etapa foi realizada a configuração do modelo, o que implica a instanciação do motor de inferência em java utilizando a livreria Apache Jena API ¹. Para configurar o motor de

¹Apache Jena API -

inferência, foram carregadas instâncias de configuração específicas para a ontologia, sendo este passo é efetuado apenas uma vez no início do processo. Desta forma, foram adicionadas ao modelo instâncias de configuração para as classe *Dimming*, *Power*, *LuminousFlux*, *BeamType*, *LocationType*, *Actions* e *AmbientConditions*. Para o *Dimming*, por exemplo, foram criadas quatro instâncias de configuração (*HighDimming*, *LowDimming*, *OptimalDimming* e *OutOfScopeDimming*), representando estas o modo de funcionamento do *Dimming* para as luminárias. Na criação das restantes instâncias de configuração foi aplicado o mesmo padrão de pensamento, em que cada instância representa o modo de funcionamento da luminária para a classe em questão, em que num contexto de funcionamento real, cada luminária estaria associada a um desses modos de funcionamento, por classe, de acordo com o estado de funcionamento da luminária.

As classes *BeamType* e *LocationType* foram configuradas de acordo com os indicadores presentes na norma EN13201, para a classe *BeamType* foram adicionadas como instâncias de configuração as instâncias *Medium*, *Narrow*, *VeryNarrow*, *VeryWide* e *Wide*, definindo estas o ângulo do feixe de luz emitido de acordo com a análise fotométrica fornecida pelo fabricante das luminárias. O ângulo do feixe de cada luminária pode ajudar a converter os valores de intensidade da luz de uma unidade para outra (por exemplo, Lux para Lumens ou candela para lumens). Quanto à classe *LocationType*, as suas configurações também tiveram por base os dados fornecidos pela norma EN13201 garantindo desta forma as restrições para o conforto luminoso para a circulação dos peões.

Neste processo de configuração foram ainda adicionadas as ações possíveis de efetuar nas luminárias utilizadas neste caso de estudo, sendo que, devido às restrições das luminárias utilizadas e como já referido, estas apenas nos permitem efetuar alterações ao seu *dimming* de funcionamento. Desta forma, para a classe *Action*, foram adicionadas apenas as instâncias *increaseDimming* e *decreaseDimming*, pois são estas as duas únicas ações que podemos efetuar neste estudo por limitação técnica das luminárias.

Após efetuar todas as configurações do modelo e utilizando ainda o Apache Jena API, realizamos a segunda etapa na qual foram importados para o modelo os dados de funcionamento das luminárias incluídos no *dataset* do município de Cascais.

Após a ontologia ter sido carregada, a próxima etapa foi realizar o raciocínio sobre os dados utilizando o motor de inferência Pallet², instanciado com o Apache Jena API, e o motor de

²Pallet - <https://jena.apache.org/documentation/inference/>

regras SWRL Plus Drolls ³ que se encontra igualmente implementado pelo Apache Jena API.

Após a execução do motor de inferência, a ontologia foi enriquecida com novas inferências provenientes, por exemplo, das regras estabelecidas anteriormente na formalização da ontologia. Na tabela 6 podemos observar um excerto das classificações efetuadas pelo motor de inferência.

Cenários	Resultados da inferência
Cenário #1	Neste primeiro cenário mais de metade das instâncias, mais precisamente 62,37%, foram classificadas pelo sistema como aconselhado efetuar uma redução de dimming utilizado. Analisando os dados foi possível observar que a grande maioria dos valores de dimming se encontra nos 80%, levando dessa a forma a que, em conjunto com outras classificações, como o padrão de iluminância normal e o padrão de eficiência Ultra, muitas das luminárias sejam aconselhadas a reduzir o seu dimming. instance:decreaseDimming ObjectProperty:isRequiredTo <PL Instance>
Cenário #2	Neste segundo cenário, podemos observar um cenário de classificação do tipo das luminárias, em que uma instância da luminária com o id 201700220 foi classificada como UltraEfficiencyPattern e NormalIlluminancePattern de acordo com os seus valores de operação e regras de classificação.
Cenário #3	No caso de uma instância de classificação da luminária 201700213, a percentagem de dimming foi alterada para 60%(intervalo identificado pela Abordagem de IA como ótimo) para propósito de testes. Como esperado o motor de inferência classificou o modo de operação como OptimizedPattern.
Cenário #4	No cenário quatro, uma instância de classificação da luminária 201700377 foi classificada como NormalIlluminancePattern para a sua localização, no entanto, não foi possível inferir sobre o seu desempenho energético, pois, os lumens associados a esta luminária estão acima do limite máximo para as luminárias utilizadas, que segundo o fabricante ronda os 16000 lumens. O caso particular desta luminária está presente em cerca de 37,52% das instâncias, nas quais detetamos pequenos desvios de até 5 lumens/watts nos valores de funcionamento da mesma que, devido a estes desvios, e por consideramos os mesmos quase insignificantes decidimos classificar estas instâncias como OutOfScopePattern quando ao padrão de eficiência energética em vez de retirar os mesmos do estudo, uma vez que, as restantes inferências estão corretas.

Tabela 6: Excerto das classificações inferidas pela ontologia

A última etapa efetuada foi criar um frontend para visualizar os dados das luminárias em conjunto com as inferências efetuadas pelo motor de inferência, para tal, estes dados foram disponibilizados num endpoint através do servidor Apache Jena Fuseki ⁴ e posteriormente consumidos pela ferramenta de visualização de dados Power BI ⁵.

Na figura 8, podemos observar o servidor Apache Jena Fuseki onde podemos efetuar queries

³SWRL Plus Drools - <https://jena.apache.org/documentation/inference/>

⁴Apache Jena Fuseki - <http://jena.apache.org/documentation/fuseki2/>

⁵Power BI - <https://powerbi.microsoft.com>

SPARQL para obtenção dos dados referentes às luminárias, estas queries foram incorporadas no Power BI e utilizadas para mostrar os dados das luminárias do município de Cascais inferidos numa dashboard como podemos observar na figura 9.

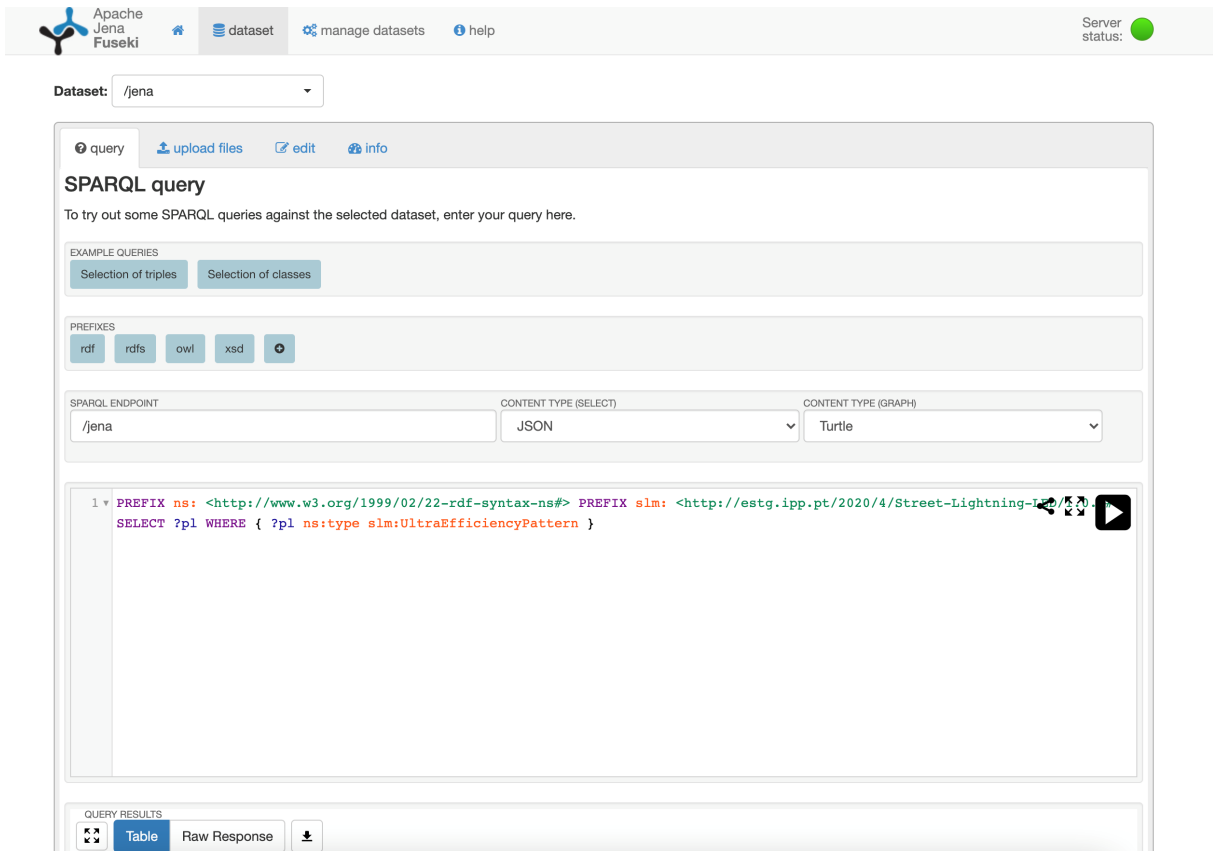


Figura 8: Servidor Apache Jena Fuseki

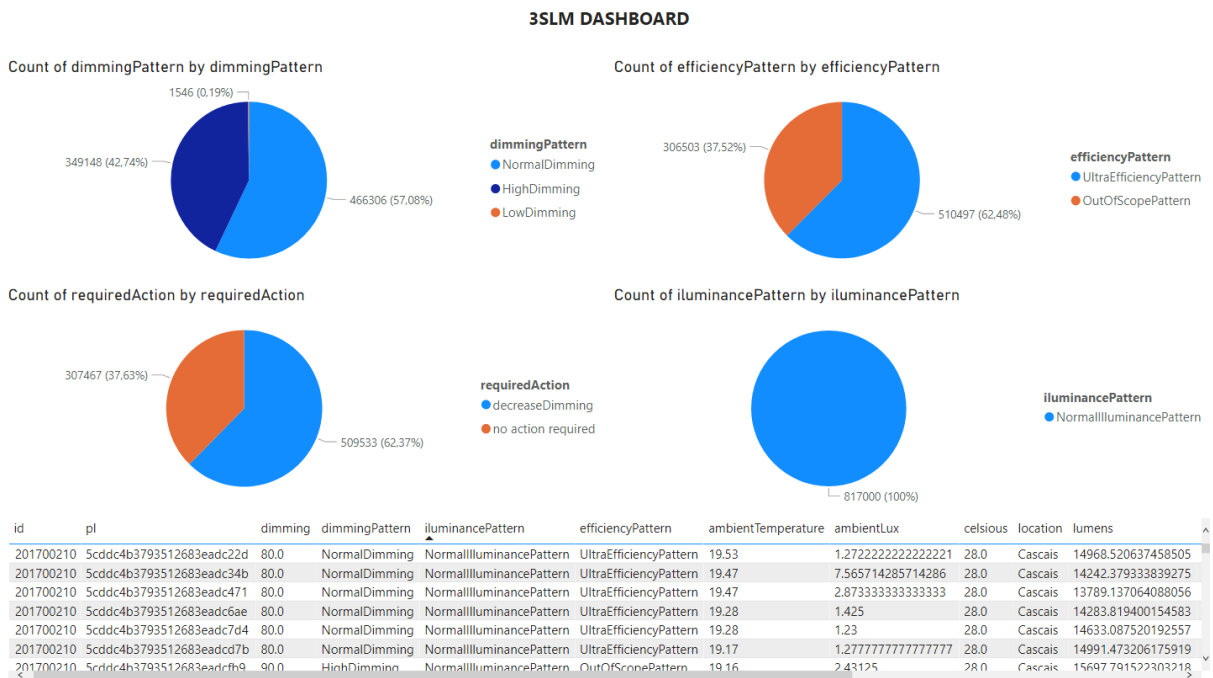


Figura 9: Dashboard de dados - Power BI

4.2 Discussão dos resultados

A qualidade dos dados inferidos por uma ontologia é obtida através da avaliação de algumas medidas, uma medida serve como instrumento de medição para uma determinada variável, no contexto da IR (Information Retrieval) as medidas permitem-nos efetuar uma avaliação quantitativa e qualitativa dos dados classificados por uma ontologia [50].

As medidas selecionadas para avaliar as classificações da nossa ontologia são a *precision* e o *recall* (figura 10). Estas duas medidas são amplamente utilizadas no contexto da IR como forma de medição da qualidade dos resultados obtidos. Estas duas medidas permitem-nos avaliar a qualidade dos resultados de classificação do comportamento das luminárias permitindo-nos identificar padrões e ações a tomar nas mesmas [51] [52].

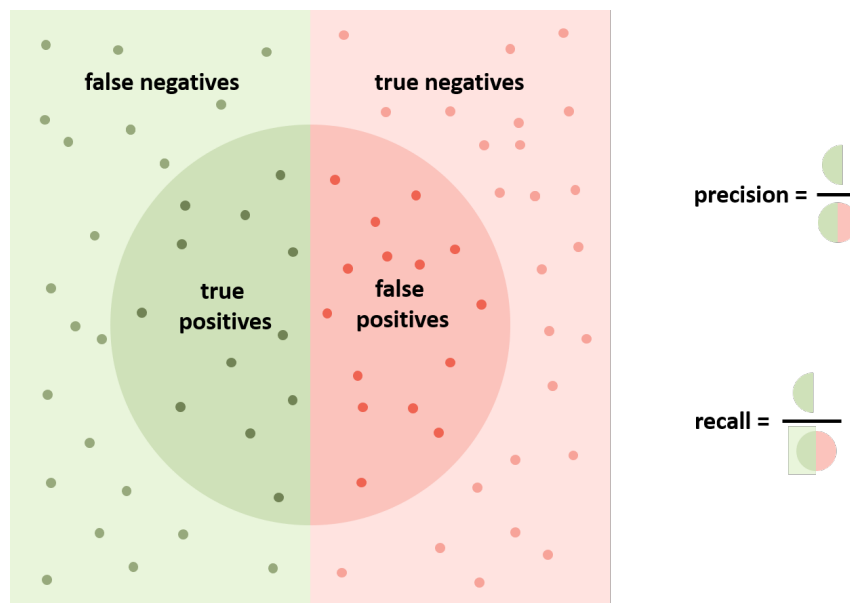


Figura 10: *Precision e Recall*

A *precision* é a medida que nos indica a quantidade de resultados inferidos relevantes, para calcular a *precision* efetuamos o rácio entre os *true positives* (TP) e o total dos resultados obtidos (TP + FP) [52]:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Através do *recall* obtemos a medida da quantidade de resultados relevantes que a ontologia conseguiu inferir, para calcular o *recall* efetuamos o rácio entre os *true positives* (TP) e o total de resultados esperados (TP + FN) [52]:

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Através destas duas medidas podemos avaliar a qualidade dos resultados inferidos pela ontologia proposta nesta dissertação [51], pois através do cálculo da *precision* avaliamos a precisão com que a ontologia infere os resultados, e através do *recall*, por sua vez, avaliamos o acerto da ontologia na inferência de resultados.

Para efetuar o cálculo destas medidas, e como demonstrado pela figura 10, consideramos os seguintes conceitos [52]:

- *False Positives* (FP): resultados da ontologia que não estejam presentes nos resultados de referência, ou seja, inferências da ontologia que obtemos de forma errada.
- *True Positives* (TP): resultados da ontologia que estejam presentes na ontologia de referência, ou seja, inferências da ontologia que obtemos de forma correta.
- *False Negatives* (FN): resultados da ontologia de referência que não estejam presentes nos resultados da ontologia, ou seja, inferências que não foram feitas pela ontologia.
- Resultados de referência: resultados resultantes da avaliação qualitativa da utilidade dos mesmo para o domínio, estes resultados são obtidos junto do especialista do domínio.

4.2.1 Resultados

Para analisarmos a qualidade dos resultados, teremos que comparar os resultados obtidos pelas inferências com os resultados de referência fornecidos pelo especialista de domínio, desta forma obtemos a quantidade de *true positives*, *false positives* e *false negatives*.

Esta avaliação dividiu-se em duas iterações, uma primeira na qual obtivemos inferências incorretas que influenciaram o valor da *precision* e que nos levou a avaliar o modelo ontológico e descobrir a origem destas imperfeições na ontologia. Após encontrar a origem das imperfeições afinamos as variáveis de classificação e efetuamos uma segunda iteração onde avaliamos a qualidade da ontologia.

Na tabela 7 e 8 podemos observar as variáveis que serão utilizadas como classificadores para classificar as instâncias quanto à sua qualidade na primeira e segunda iteração respectiva-

mente. Existem ainda outras variáveis provenientes das associações diretas do *dataset*, em que cada item do *dataset* é associado a um determinado conceito, essas variáveis estão incluídas no mapa conceptual da figura 5 mas nas tabelas mencionadas apenas consideramos aquelas que nos permitem efetuar a classificação do comportamento das luminárias.

Inferências/Variáveis	True Positives (TP)	False Positives (FP)	False Negatives (FN)
LowDimming	1546	0	0
HighDimming	349148	0	0
OptimalDimming	0	0	0
NormalDimming	466306	0	0
BaseEfficeincyPattern	0	0	0
HighEfficiencyPattern	0	0	0
UltraEfficiencyPattern	510497	0	0
OutOfScopePattern	306503	0	0
LowIlluminancePattern	0	0	0
NormalIlluminancePattern	817000	0	0
decreaseDimming	307467	0	0
increaseDimming	0	0	0
InefficientPattern	0	0	0
OptimizedPattern	0	0	0
Illuminance	817000	0	0
LuminousFlux	817000	0	0
Total	4392467	0	0

Tabela 7: Variáveis auxiliares para cálculo da *precision* e *recall* na primeira iteração.

Inferências/Variáveis	True Positives (TP)	False Positives (FP)	False Negatives (FN)
LowDimming	1546	0	0
HighDimming	349148	0	0
OptimalDimming	0	0	0
NormalDimming	466306	0	0
BaseEfficeincyPattern	0	0	0
HighEfficiencyPattern	0	0	0
UltraEfficiencyPattern	510497	0	0
OutOfScopePattern	306503	0	0
LowIlluminancePattern	0	0	0
NormalIlluminancePattern	817000	0	0
decreaseDimming	307467	0	0
increaseDimming	0	0	0
InefficientPattern	0	0	0
OptimizedPattern	0	0	0
Illuminance	0	817000	0
LuminousFlux	0	817000	0
Total	2758467	1634000	0

Tabela 8: Variáveis auxiliares para cálculo da *precision* e *recall* na segunda iteração.

De forma a obter estes classificadores e após inferência da ontologia sobre o *dataset* em

estudo utilizamos uma ferramenta de visualização de dados, como já referido anteriormente o Power BI, e, através deste construímos dashboards interativas compostas por gráficos e tabelas que nos permitiu validar manualmente os dados e classificar as mesmas como *true positives*, *false positives* ou *false negatives*.

Após análise das variáveis presentes na tabela 7 e através da comparação dos resultados obtidos pelas inferências com os resultados de referência, é possível concluir que, para a primeira iteração:

- *True Positives* (TP): 4392467;
- *False Positives* (FP): 0;
- *False Negatives* (FN): 0;

Através destes valores e recorrendo às fórmulas podemos calcular a *precision* e o *recall* para as inferências da ontologia, obtendo para estas duas medidas os valores:

$$precision = \frac{4392467}{4392467 + 0} = \frac{4392467}{4392467} = 1$$

$$recall = \frac{4392467}{4392467 + 0} = \frac{4392467}{4392467} = 1$$

Apesar dos valores de *precision* e *recall* serem perfeitos pois a ontologia está a inferir com grande precisão e acerto consideramos que existiu uma abordagem de modelação pouco eficiente da ontologia, na qual o comportamento do motor de inferência é o adequado mas efetuou mais classificações que as necessárias tornando o modelo pouco eficiente uma vez que todas as instâncias de *PublicStreetLightning* estão a ser inferidas como instâncias dos *LightComfortFactors*, *Illuminance* e *LuminousFlux*, e, apesar de essas inferências estarem corretas do ponto de vista da ontologia, achamos que a mesma não está correta no domínio e decidimos contabilizar como *false positives* para o cálculo da *precision* uma vez que essas inferências não são relevantes por serem classificações erradas no nosso domínio.

Esta hierarquia foi definida de forma errada, uma vez que definimos para os *LightComfortFactors* uma hierarquia para os fatores relacionados com os padrões de conforto da luz, a *Illuminance* e o *LuminousFlux*, de forma a conseguir inferir quais os *LightComfortFactors* de uma

luminária. Estes conceitos de *Illuminance* e *LuminousFlux* foram definidos como duas classes que por sua vez são domínio das data properties *hasLux* e *hasLumens*, respetivamente, em conjunto com a classe *PublicStreetLighting*. Desta forma, todas as instâncias associadas a estas duas *data properties* serão classificadas de forma errada pela ontologia como pertencendo a *Illuminance*, *LuminousFlux* e *PublicStreetLighting*.

De forma a mitigar estas inferências erradas deveríamos retirar do domínio das *data properties* as classes *Illuminance* e *LuminousFlux* e definir instâncias para ambas à semelhança da modelação efetuada para o *power* e o *dimming*.

Para avaliar a qualidade da ontologia, na segunda iteração, e, partindo das considerações retiradas da primeira iteração, consideramos então a *Illuminance* e *LuminousFlux* como sendo falsos positivos, e, após uma análise detalhada da tabela 8 e através da comparação dos resultados obtidos pelas inferências com os resultados de referência, é possível concluir para a segunda iteração que:

- *True Positives* (TP): 2758467;
- *False Positives* (FP): 1634000;
- *False Negatives* (FN): 0;

Através destes valores e recorrendo às fórmulas podemos calcular a *precision* e o *recall* para as inferências da ontologia, obtendo para estas duas medidas os valores:

$$precision = \frac{2758467}{2758467 + 1634000} = \frac{2758467}{4392467} = 0.63$$

$$recall = \frac{2758467}{2758467} = 1$$

Os valores da *precision* diminuíram comparativamente à primeira iteração mas desta forma obtemos uma avaliação correta da qualidade de inferência da ontologia uma vez que os valores considerados como falsos positivos não são inferências corretas para o domínio em estudo.

Apesar de nem todas as classificações ou resultados serem considerados relevantes, o número de resultados necessários para responder ao problema em estudo é o adequado. O modelo

peça por excesso nas instâncias classificadas mas este aspeto não influencia o objetivo final do modelo, apenas reduz a sua performance. O modelo faz mais classificações do que deveria fazer, mas não deixa nenhuma classificação importante por efetuar no contexto do problema.

Desta forma analisando o cálculo destas duas medidas podemos concluir que as classificações da ontologia têm uma precisão de 0,63 e um acerto nas suas inferências de 1. O que significa que a ontologia criada infere com uma *precision* nem muito elevada nem muito baixa, estando o seu valor nos 63% de precisão acertando 3 em cada 5 inferências. Quanto ao *recall* a ontologia revela um elevado valor de acerto.

4.2.2 Resultados científicos

- 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 luminary 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. Published in 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 approxi-

mately 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

Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho descrito neste documento, descreve o processo de construção de um artefacto semântico para classificação do modo de operação de cada luminária de um município de Portugal. Os dados de funcionamento foram facultados por um dos parceiros do projeto 3SLM (Compta) através de um *dataset*. A ontologia contempla, não apenas, conhecimento técnico sobre o funcionamento das luminárias, mas também conhecimento normativo sobre os fatores de influência externos. O modelo alimentou um motor de inferência desenvolvido com recurso a Apache Jena e os resultados revelaram a assertividade do modelo quer na classificação do modelo, quer na indicação de ações de regulação de *dimming*. Face aos objetivos, os resultados são positivos. Adicionalmente conclui-se acerca da mais valia da adoção de uma perspectiva dupla no desenvolvimento de uma solução inteligente para apoio à tomada de decisão no domínio da gestão da iluminação pública. No entanto, identificamos algumas limitações na abordagem ao problema, nomeadamente:

1. as luminárias apenas forneciam dados internos, os dados dos fatores externos tiveram de ser extrapolados a partir de experiências de laboratório;
2. falta de controlo sobre o fluxo de dados entre as luminárias e o *software* de gestão das mesmas. Entre as luminárias e o *software* de gestão existe uma *gateway* cujo funcionamento nos é alheio;
3. as luminárias comunicavam via GPRS (General Packet Radio Service) diretamente para a *gateway*, sendo interessante a comunicação em rede, ou seja, entre luminárias e não apenas entre a luminária e o *gateway*, através, por exemplo, de uma rede LoRa(Long

Range).

5.1 Trabalho Futuro

Partindo do trabalho desenvolvido, conseguimos tirar algumas conclusões do que poderíamos fazer para melhorar a nossa solução:

- inclusão dos serviços de IA e ontologia num sistema comum;
- inclusão dos serviços de IA e ontologia no sistema de gestão de iluminação pública.

5.2 Principais Contributos

Do trabalho desenvolvido nesta dissertação, os principais contributos retirados são a ontologia de suporte à tomada de decisão na gestão da iluminação pública e a metodologia baseada em conhecimento, combinando uma abordagem semântica e incorporando resultados de processos de Inteligência artificial.

Bibliografia

- [1] Arquiled. Arquicity r1 efficiency, 2018. [Acedido: 02-Out-2019].
- [2] EDPDistribuição. Manual de iluminação pública, October 2016. [Acedido: 23-Set-2019].
- [3] Pordata. Energy consumption in portugal by type. Acedido: 2019-11-20.
- [4] Vito Albino, Umberto Berardi, and Rosa Maria Dangelico. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of urban technology*, 22(1):3–21, 2015.
- [5] Tuba Bakıcı, Esteve Almirall, and Jonathan Wareham. A smart city initiative: the case of barcelona. *Journal of the knowledge economy*, 4(2):135–148, 2013.
- [6] Manuel Chiachío, Juan Chiachío, Darren Prescott, and John Andrews. Plausible petri nets as self-adaptive expert systems: A tool for infrastructure asset monitoring. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34(4):281–298, 2019.
- [7] Zhaojing Wang, Hao Hu, Mengyang Guo, and Jie Gong. Optimization of temporary debris management site selection and site service regions for enhancing postdisaster debris removal operations. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34(3):230–247, 2019.
- [8] Gendlal M Vaidya and Manali M Kshirsagar. A survey of algorithms, technologies and issues in big data analytics and applications. In *2020 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, pages 347–350. IEEE, 2020.
- [9] Juan M Barrionuevo, Pascual Berrone, and Joan E Ricart. Smart cities, sustainable progress. *IESE Insight*, 14(14):50–57, 2012.
- [10] Thomas M Chen. Smart grids, smart cities need better networks [editor’s note]. *IEEE Network*, 24(2):2–3, 2010.

- [11] Andrea Caragliu, Chiara Del Bo, and Peter Nijkamp. Smart cities in europe. *Journal of urban technology*, 18(2):65–82, 2011.
- [12] James Long and Oral Büyüköztürk. Collaborative duty cycling strategies in energy harvesting sensor networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(6):534–548, 2020.
- [13] Colette Knight. Field surveys of the effect of lamp spectrum on the perception of safety and comfort at night. *Lighting Research & Technology*, 42(3):313–329, 2010.
- [14] Eleonora Riva Sanseverino, Gianluca Scaccianoce, Valentina Vaccaro, Gaetano Zizzo, and Silvia Pennisi. Smart city and public lighting. In *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pages 665–670. IEEE, 2015.
- [15] Xue Yao, Juncai Guo, Chenghao Ren, and Xiao Wang. The influence of urban road lighting on pedestrian safety. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 7(2), 2018.
- [16] Lester Brown. *World on the edge: how to prevent environmental and economic collapse*. Routledge, 2012.
- [17] Roque Filipe Mesquita Brandão. Eficiência energética na iluminação pública. *Neutro à Terra*, (12):55–60, 2013.
- [18] PNAEE. [Acedido: 30-Set-2019].
- [19] Juan F De Paz, Javier Bajo, Sara Rodríguez, Gabriel Villarrubia, and Juan M Corchado. Intelligent system for lighting control in smart cities. *Information Sciences*, 372:241–255, 2016.
- [20] Abhishek Kumar Soni, Nitesh Kumar Bind, and Ravi Kumar Gupta. Smart street lighting. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, 3(3):148–150, 2016.
- [21] EDP. Guia prático da eficiência energética o que saber & fazer para sustentar o futuro, 2006.
- [22] Miguel Castro, Antonio J Jara, and Antonio FG Skarmeta. Smart lighting solutions for smart cities. In *2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pages 1374–1379. IEEE, 2013.
- [23] Deepak K Srivatsa, B Preethi, R Parinitha, G Sumana, and A Kumar. Smart street lights. In *2013 Texas Instruments India Educators' Conference*, pages 103–106. IEEE, 2013.

- [24] Ovidio Rabaza, Evaristo Molero-Mesa, Fernando Aznar-Dols, and Daniel Gómez-Lorente. Experimental Study of the Levels of Street Lighting Using Aerial Imagery and Energy Efficiency Calculation. *Sustainability*, 10(12):4365, November 2018.
- [25] Road lighting standards. Standard EN 13201:2015, European Committee for Standardization (CEN)., 2015.
- [26] Vitor C. Bender. Metodologia de projeto eletrotérmico de leds aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública. 2012.
- [27] Alberto Vanzeller. O factor de manutenção na tecnologia led.
- [28] Steve Coyne. Lamp efficacy, lumen maintenance, lamp life and measurement uncertainties.
- [29] RNAE, DGEG, OET, OE, ANMP, and CPI. Documento de referência para a eficiência energética na iluminação pública – parte i – conceitos de luminotecnica, 2018.
- [30] 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.
- [31] Petr Žák and Simona Vodráčková. Conception of public lighting. In *2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)*, pages 1–4. IEEE, 2016.
- [32] Marko Kuusik, Toivo Varjas, and Argo Rosin. Case study of smart city lighting system with motion detector and remote control. In *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [33] Federico Viani, Alessandro Polo, Fabrizio Robol, Enrico Giarola, and Adamo Ferro. Experimental validation of a wireless distributed system for smart public lighting management. In *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [34] YM Jagadeesh, S Akilesh, S Karthik, et al. Intelligent street lights. *Procedia Technology*, 21:547–551, 2015.
- [35] Ephraim Vadai, Amit Shefi, and Tzvika Herbst. Efficient illumination system for legacy street lighting systems, September 2015. US Patent 9,131,557.
- [36] Juan-José Sáenz-Peñafiel, Jose-Luis Poza-Lujan, and Juan-Luis Posadas-Yagüe. Smart cities: A taxonomy for the efficient management of lighting in unpredicted environments.

- In *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence*, pages 63–70. Springer, 2019.
- [37] Mircea Popa and Costin Cepișcă. Energy consumption saving solutions based on intelligent street lighting control system. *UPB Sci. Bull., Series C*, 73(4):297–308, 2011.
- [38] CIRCUTOR. Sistema de gestão inteligente da iluminação pública - caso de sucesso. [Acedido: 11-Out-2019].
- [39] Jun Zhang, Guifang Qiao, Guangming Song, Hongtao Sun, and Jian Ge. Group decision making based autonomous control system for street lighting. *Measurement*, 46(1):108–116, 2013.
- [40] Marco Beccali, Marina Bonomolo, Giuseppina Ciulla, Alessandra Galatioto, and Valerio Lo Brano. Improvement of energy efficiency and quality of street lighting in south italy as an action of sustainable energy action plans. the case study of comiso (rg). *Energy*, 92:394–408, 2015.
- [41] Sei Ping Lau, Geoff V Merrett, Alex S Weddell, and Neil M White. A traffic-aware street lighting scheme for smart cities using autonomous networked sensors. *Computers & Electrical Engineering*, 45:192–207, 2015.
- [42] Raffaele Carli, Mariagrazia Dotoli, and Edmondo Cianci. An optimization tool for energy efficiency of street lighting systems in smart cities. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):14460–14464, 2017.
- [43] András Kovács, Roland Bátai, Balázs Csanád Csáji, Péter Dudás, Borbála Háty, Gianfranco Pedone, Tibor Révész, and József Váncza. Intelligent control for energy-positive street lighting. *Energy*, 114:40–51, 2016.
- [44] Igor Wojnicki, Sebastian Ernst, Leszek Kotulski, Adam Se, et al. Advanced street lighting control. *Expert Systems with Applications*, 41(4):999–1005, 2014.
- [45] Carla Pereira, Cristóvão Sousa, and António Lucas Soares. A socio-semantic approach to collaborative domain conceptualization. In *OTM Confederated International Conferences "On the Move to Meaningful Internet Systems"*, pages 524–533. Springer, 2009.
- [46] Nicola Guarino. Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation. *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, 43:625–640, 1995.

- [47] Murray G. Patterson. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5):377 – 390, 1996.
- [48] Pr Boyce, S Fotios, and M Richards. Road lighting and energy saving. *Lighting Research & Technology*, 41(3):245–260, September 2009.
- [49] Cristóvão Sousa, António Lucas Soares, Carla Pereira, and Samuel Moniz. Establishing conceptual commitments in the development of ontologies through competency questions and conceptual graphs. In Robert Meersman, Hervé Panetto, Alok Mishra, Rafael Valencia-García, António Lucas Soares, Ioana Ciuciu, Fernando Ferri, Georg Weichhart, Thomas Moser, Michele Bezzi, and Henry Chan, editors, *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2014 Workshops*, pages 626–635, Berlin, Heidelberg, 2014. Springer Berlin Heidelberg.
- [50] Walid Magdy and Gareth J.F. Jones. Pres: A score metric for evaluating recall-oriented information retrieval applications. SIGIR '10, page 611–618, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [51] Jérôme Euzenat et al. Semantic precision and recall for ontology alignment evaluation. In *Ijcai*, volume 7, pages 348–353, 2007.
- [52] David Powers. Evaluation: From precision, recall and f-factor to roc, informedness, markedness correlation. *Mach. Learn. Technol.*, 2, 01 2008.