



**POLITECNICO
SETÚBAL**

**JOÃO FILIPE
EUGÉNIO
MARTINS**

**GESTÃO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
E PASSADEIRAS PARA PEÕES**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no
ramo de Energias Renováveis e Sistemas de
Potência

ORIENTADOR

Professor Especialista Carlos Manuel Teixeira
Fortunato

Dezembro de 2025

JOÃO FILIPE
EUGÉNIO
MARTINS

**GESTÃO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
E PASSADEIRAS PARA PEÕES**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor, Daniel José Medronho
Foito, Escola Superior de Tecnologia

Orientador: Professor Especialista, Carlos Manuel
Teixeira Fortunato, Escola Superior de Tecnologia

Vogal: Professor Doutor, Victor Manuel Carvalho
Fernão Pires, Escola Superior de Tecnologia

Dezembro de 2025

“The future belongs to those who believe in
the beauty of their dreams.”

Eleanor Roosevelt

I. Agradecimentos

Chegar a este momento é, para mim, motivo de grande orgulho e emoção. Esta tese representa não apenas o fim de mais um ciclo académico, mas também o culminar de um caminho cheio de desafios, aprendizagens e conquistas. Nada disto teria sido possível sem o apoio das pessoas que me acompanharam ao longo deste percurso.

Em primeiro lugar, quero expressar a minha mais profunda gratidão à minha família, aos meus pais, Joel Martins e Otília Martins, pelo apoio dado em todas as decisões que tomei na minha vida pelo exemplo de trabalho, força e dedicação. A minha mulher Ana Martins pelo excelente suporte e sacrifício durante esta fase da nossa vida, ao meu filhote Gonçalo Martins que foi privado do pai durante o tempo de aulas, aos dois não existem palavras para descrever a gratidão que sinto pelos sacrifícios feitos e pela força transmitida para poder ultrapassar esta etapa. Aos meus sogros que sempre nos apoiaram.

Ao meu amigo Gil Santos, ele que me desafiou a frequentar o curso, e o apoio académico e pessoal, um muito obrigado. Aos amigos de curso que também me acompanharam, como o Hugo Candeias, Hugo Reis, e os restantes elementos do curso que permitiram com que direta ou indiretamente conseguisse concluir o mestrado. Obrigado pela compreensão nos momentos de ausência, pelas conversas que aliviaram o peso das longas horas de trabalho e pelas risadas que ajudaram a equilibrar o caminho. A vossa amizade foi, sem dúvida, essencial para manter o ânimo e a motivação.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador, Carlos Fortunato, pela orientação, paciência e disponibilidade ao longo de todo este processo. Pela partilha de conhecimento, pela exigência construtiva e pela confiança depositada em mim. As suas orientações foram determinantes para que este trabalho se concretizasse e para o meu crescimento pessoal e académico.

Por fim, agradeço a todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para este percurso. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada momento de partilha fez a diferença.

A todos, o meu sincero e sentido obrigado.

II. Resumo

A modernização das infraestruturas urbanas constitui um dos principais pilares das estratégias de sustentabilidade, eficiência energética e segurança rodoviária desenvolvidas pelos municípios portugueses. A iluminação pública, responsável por uma parcela significativa do consumo energético das cidades, tem sido alvo de diversas iniciativas de otimização através da introdução de tecnologias LED, sistemas de regulação automática e dispositivos de telegestão. Paralelamente, a sinistralidade associada às passadeiras tem evidenciado a necessidade de soluções inovadoras que permitam reforçar a segurança dos peões, sobretudo em períodos de reduzida visibilidade.

A presente dissertação propõe uma solução integrada que combina a gestão inteligente da iluminação pública e a implementação de passadeiras inteligentes, recorrendo a um conjunto de tecnologias complementares capazes de atuar de forma autónoma e coordenada. O estudo tem como caso de aplicação a Avenida de Moçambique, na cidade de Setúbal, onde foi realizado um diagnóstico completo da iluminação existente, incluindo medições fotométricas, avaliação dos níveis de luminância e análise do comportamento dos utilizadores.

O sistema desenvolvido integra luminárias LED equipadas com *drivers* programáveis, capazes de realizar *dimming* e variação de temperatura de cor (*tunable white*), sensores de movimento para adaptação dinâmica da intensidade luminosa, sensores crepusculares para gestão automática do ciclo diário de iluminação e um conjunto de sensores dedicados às passadeiras, responsáveis pela deteção de peões e ativação de sinalização luminosa de alerta. Toda a lógica de funcionamento é centralizada num PLC industrial, que coordena as entradas e saídas dos dispositivos, assegura a execução dos algoritmos de controlo e comunica com uma supervisão.

A solução permite reduzir significativamente o consumo energético, uma vez que a iluminação apenas atinge os níveis máximos em momentos de presença real de utilizadores. Simultaneamente, a visibilidade das passadeiras é reforçada, contribuindo para a diminuição do risco de atropelamentos. A supervisão proporciona monitorização em tempo real.

Os resultados obtidos demonstram que a integração dos diferentes sistemas é tecnicamente viável, escalável e ajustável a diferentes contextos urbanos. Este trabalho contribui para a evolução das práticas de gestão da iluminação pública e da

segurança rodoviária, enquadrando-se plenamente nos objetivos das cidades inteligentes e na transição energética em curso.

Palavras-chave: Iluminação pública; Eficiência energética; Passadeiras inteligentes; Sensores; PLC; Supervisão; *Tunable white*; *Dimming*; Segurança rodoviária

III. Abstract

The modernization of urban infrastructures is a central pillar of sustainability, energy efficiency and road-safety strategies adopted by municipalities worldwide. Public lighting, which accounts for a considerable share of total urban energy consumption, has been the focus of multiple optimization initiatives enabled by the introduction of LED technology, automatic regulation systems and remote-management tools. At the same time, pedestrian crossings remain critical locations for road-safety incidents, particularly during periods of reduced visibility, highlighting the need for innovative solutions capable of increasing pedestrian protection.

This dissertation presents an integrated solution that combines intelligent public-lighting management and the deployment of smart pedestrian crossings, using a set of complementary technologies designed to operate autonomously and in a coordinated manner. The chosen case study is Avenida de Moçambique, in Setúbal, where a complete assessment of the existing lighting infrastructure was conducted, including photometric measurements, luminance evaluation and observation of user behavior.

The developed system includes LED luminaires equipped with programmable drivers capable of dimming and color temperature variation (*tunable white*), motion sensors for dynamic lighting adjustment, dusk sensors for automatic day/night management and a dedicated detection system for pedestrian crossings. These elements trigger warning lights and reinforce crossing illumination whenever pedestrians are detected. All logic is managed by an industrial PLC, which processes sensor information, controls the luminaires and communicates with the supervision.

The proposed solution demonstrates the potential to significantly reduce energy consumption by providing maximum lighting levels only when required, while simultaneously enhancing pedestrian visibility and increasing road safety. The supervision system enables comprehensive monitoring.

Results confirm that the integration of intelligent lighting systems with pedestrian-safety technology is feasible, scalable, and adaptable to different urban environments. The work aligns with the principles of smart cities and the ongoing energy-transition policies, offering a solid technical contribution to the evolution of urban-infrastructure management.

Keywords: Public lighting; Energy efficiency; Smart pedestrian crossings; Sensors;
PLC; Supervision; Tunable white; Dimming; Road safety.

IV. Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO	4
2.1 Gestão de Energia da Iluminação Pública	4
2.2 Passadeiras Inteligentes.....	4
3. CONCEITOS DE ILUMINAÇÃO.....	6
3.1 História da Iluminação	6
3.2 Captação de luz.....	7
3.2.1 Acuidade visual	10
3.2.2 Adaptação	11
3.2.3 Contraste.....	11
3.3 Noções básicas de luminotécnica.....	12
3.3.1 Potência radiante (Φ_r).....	12
3.3.2 Intensidade radiante (I_r).....	12
3.3.3 Radiância (L_r)	12
3.3.4 Irradiância (E_r).....	13
3.3.5 Ângulo Sólido (Ω).....	13
3.3.6 Fotométricas	13
3.4 Visão.....	18
3.5 Parâmetros de uma instalação de iluminação pública	19
3.5.1 Temperatura da cor.....	19
3.5.2 Eficácia Luminosa.....	21
3.5.3 Poluição luminosa.....	23
3.5.4 Uniformidade	25
3.5.5 Curvas do fator de utilização	27
4. TECNOLOGIAS	29
4.1 Fontes de luz	29
4.1.1 Vapor de sódio de alta pressão (VSAP)	29

4.1.2	Iodetos metálicos.....	31
4.1.3	LED.....	32
4.2	Componentes de luminárias	33
4.2.1	Condensador.....	34
4.2.2	<i>Ignitor</i>	34
4.2.3	Drivers de LED.....	34
4.3	Sistemas de controlo e gestão.....	35
4.3.1	Relógio Astronómico	36
4.3.2	Tecnologias de regulação de fluxo.....	37
4.4	Sistemas de telegestão	39
5.	CONCEITOS DE PASSAGENS PARA PEÕES.....	41
5.1	Regras aplicadas a travessia de passadeiras.....	44
5.1.1	Regras de travessia das estradas por peões.....	45
5.1.2	Obrigações dos condutores.....	45
6.	CARACTERIZAÇÃO DA GESTÃO ENERGÉTICA.....	46
6.1	Tecnologia	46
6.1.1	DALI	46
6.1.2	Sensor de movimento	49
6.1.3	Sensor crepuscular	50
6.1.4	Lâmpadas de variação de fluxo e temperatura da cor	51
6.1.5	Dimmer.....	51
6.1.6	<i>Driver</i> LED.....	52
6.1.7	Modulo de comunicação	53
6.2	Criação supervisão	53
7.	CARACTERIZAÇÃO DAS PASSADEIRAS INTELIGENTES.....	55
7.1	Tecnologia	55
7.1.1	Sensor.....	55
7.1.2	Iluminação.....	56

7.2 Sistema a implementar	57
8. ESTUDO PRÁTICO	58
8.1 Caracterização da Cidade de Setúbal	58
8.2 Arquitetura da solução	59
8.3 Sistema de controlo	63
8.4 Hardware da arquitetura	65
8.4.1 Hardware a implementar	65
8.4.2 Ligação de rede comunicação	67
8.4.3 Hardware da simulação.....	68
8.5 Consumo energético.....	69
8.6 Programação do sistema.....	72
8.6.1 Lógica de Funcionamento	72
8.6.2 Desenvolvimento da Programação	73
8.7 Supervisão.....	74
9. CONCLUSÃO	76
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

V. Índice de Figuras

Figura 1 – Comprimentos onda do espectro eletromagnético e espectro visível [6].	7
Figura 2 – Onda sinusoidal periódica [3]	8
Figura 3 – Luz refletida e refratada [7]	9
Figura 4 – Acuidade visual [3]	10
Figura 5 – Dilatação da pupila em condições de iluminação ambiente diferente [8]	11
Figura 6 – Contraste de objetos [3]	11
Figura 7 – Ângulo Sólido e Plano [9], [10].	13
Figura 8 – Saída de fluxo luminoso [3].	14
Figura 9 - Vetores da intensidade luminosa [11].	15
Figura 10 – Iluminância [12]	16
Figura 11 – Luminância [3]	17
Figura 12 - Gamas de luminância para cada tipo de visão [3]	18
Figura 13 - Eficácia luminosa máxima dos tipos de visão [3]	19
Figura 14 - Variação da temperatura de cor [13]	20
Figura 15 - Diferentes aparências no mesmo local [3]	21
Figura 16 - Encadeamento do observador [3]	24
Figura 17 - Fluxo luminoso emitido por uma luminária [3].	25
Figura 18 - Parâmetros da uniformidade geral e longitudinal [3]	26
Figura 19 – Limites laterais da estrada para cálculo do SR [3]	27
Figura 20 - Curva de fator de utilização [3]	27
Figura 21 – Lâmpada de vapor de sódio [17]	30
Figura 22 - Lâmpada de iodetos metálicos [22]	31
Figura 23 – Esquemático de uma lâmpada LED [18]	32
Figura 24 - Variação das estações do ano no hemisfério norte [14]	36
Figura 25 – Horário de funcionamento de um relógio astronómico [3]	37
Figura 26 - Gráfico de funcionamento de um regulador de fluxo [3]	38
Figura 27 - Componentes de um sistema de telegestão sem CS [3]	40
Figura 28 - Componentes de um sistema de telegestão com CS [3]	40
Figura 29 - Dimensões recomendáveis para a passagens para peões [4]	42
Figura 30 – Rebaixamento do passeio se a largura do mesmo for maior a 2 m [4] .	43
Figura 31 – Sistemas de iluminação DALI [5]	48
Figura 32 - Diagramas de configurações de rede DALI [5]	49
Figura 33 – Exemplo de instalação do sensor de movimento	50

Figura 34 – Suporte para sensor.....	56
Figura 35 – Ângulo medição do sensor [20].....	56
Figura 36 – Exemplo de instalação dos LED's de aviso para as passadeiras	56
Figura 37 – Exemplo de passadeira com sensores.....	57
Figura 38 - Percurso percorrido	62
Figura 39 - Ligação da rede aplicada às luminárias	65
Figura 40 – Fluxo da comunicação	67
Figura 41 – Esquemático da montagem prática.....	68
Figura 42 – Layout da zona da Av. de Moçambique	75

VI. Lista de Tabelas

Tabela 1 – Lúmen por potência [3].....	22
Tabela 2 – Tabela de eficiência para vias [3]	23
Tabela 3 – Características luminosas da lâmpada de vapor de sódio [3]	30
Tabela 4 - Características luminosas da lâmpada de iodetos metálicos [3]	31
Tabela 5 - Características luminosas da lâmpada LED [3].....	33
Tabela 6 - Tensão mínima para lâmpadas [3].....	38
Tabela 7 - Diferença entre wi-fi tradicional e wi-fi mesh	64
Tabela 8 - Consumos município Setúbal na Iluminação Pública.....	69
Tabela 9 – Potências no solístico verão.....	70
Tabela 10 - Poupança no solístico verão	70
Tabela 11 - Potências no solístico inverno.....	71
Tabela 12 – Poupança no solístico inverno.....	71
Tabela 13 - Total poupança	71
Tabela 14 - Poupança em termos de potência.....	71

VII. Acrónimos

ANSR - Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária

AP – Acordo de Paris

CMS – Câmara municipal de Setúbal

CO₂ – Dióxido de carbono

CQNUAC – Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas

DALI – Digital Addressable Lighting Interface

DLOR - Downward Light Output Ratio

EDP – Energias de Portugal

GTC – Gestão Técnica Centralizada

HDI – High discharge intensity

HMI – Human Machine Interface

IEC- International Electrotechnical Commission

IRC – Índice de reprodução de cor

LBC – Lei de Bases do Clima (Lei nº98/2021, de 31 de dezembro)

LED – Light Emitting Diode

LOR – Light Output Rat

PNEC – Plano Nacional Energia e Clima

PLC – Programmable Logic Controller

RFL – Regulador de fluxo luminoso

RYGB – Red, yellow, green, and blue

SCADA – Supervisor Control and Data Acquisition

SI – Sistema Internacional

SR- Rácio envolvente

SSL – Solid State Lighting

ULOR - Upward Light Output Ratio

UV - Ultravioleta

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a eficiência energética, a sustentabilidade ambiental e a segurança rodoviária têm impulsionado o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras no contexto das cidades. A gestão da energia da iluminação pública e a melhoria das condições de segurança na travessia de passadeiras inserem-se diretamente neste desafio, contribuindo não só para a redução do consumo de energia e das emissões de CO_2 , mas também para a proteção de pessoas e bens no espaço urbano.

A iluminação pública representa uma parcela significativa do consumo elétrico dos municípios, sendo, por isso, uma área com um elevado potencial de otimização. A evolução das tecnologias de iluminação, em particular a disseminação da tecnologia LED e a integração de sistemas de controlo e regulação de fluxo luminoso, permite atualmente conceber soluções mais eficientes, flexíveis e adaptadas às reais necessidades dos utilizadores, em paralelo, tem vindo a reforçar a importância da monitorização e controlo centralizado de infraestruturas, abrindo caminho à implementação de sistemas de gestão técnica centralizada aplicados à iluminação pública.

Em complemento ao desenvolvimento da gestão energética, a segurança dos peões nas passagens dedicadas é um problema atual e relevante. Em Portugal, o número de atropelamentos em passadeiras continua a ser significativo, muitas vezes associado a condições deficientes de visibilidade ou de informação ao condutor. A integração de sensores e sistemas de aviso luminoso nas passadeiras apresenta-se, assim, como uma solução promissora para mitigar o risco de acidentes.

Neste contexto, a presente dissertação, desenvolvida no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, ramo de Energias Renováveis e Sistemas de Potência, tem como objetivo principal conceber e estudar um sistema integrado de gestão energética da iluminação pública e de passadeiras inteligentes em meio urbano, conciliando a redução do consumo energético com o aumento da segurança rodoviária.

Os objetivos deste trabalho podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

- analisar o estado atual da iluminação pública na área de estudo;

- propor uma estratégia de gestão da iluminação pública, com base em tecnologias de regulação de fluxo luminoso e em sistemas de controlo apoiados em PLC e sensores;
- estudar e propor uma solução de passadeiras inteligentes, assente na deteção de peões e na ativação de sinais luminosos de alerta aos condutores;
- desenvolver uma solução de supervisão (*SCADA*) que permita monitorizar, em tempo real, o estado da iluminação e das passadeiras.

De modo a conseguir atingir estes objetivos, foi selecionada uma zona urbana do concelho de Setúbal, com destaque para a Av. de Moçambique, onde foi efetuado o levantamento das luminárias existentes e das condições das passadeiras. Com base nessa caracterização, foi definido um cenário de referência e, posteriormente, desenvolvidos algoritmos de controlo para a gestão da iluminação e das passadeiras, através da programação com recurso a um PLC, onde foi utilizado o programa *CX-Programmer* para criar a simulação pretendida. Esta escolha justifica-se devido ao material disponível e ao conhecimento profissional dos equipamentos. Em paralelo, foi concebido um sistema de supervisão, com recurso ao programa *CX-Supervisor*, que permite visualizar, em ambiente gráfico, o estado dos vários elementos do sistema, os consumos e as poupanças obtidas.

A metodologia adotada combina com uma componente de estudo teórico e normativo incluindo conceitos de luminotécnica, tecnologias de iluminação, sistemas de telegestão e enquadramento legal das passagens para peões com uma componente prática de modelação, programação e simulação do sistema proposto.

Esta dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

- no Capítulo 2 é apresentado o enquadramento do tema, com uma abordagem a gestão de energia da iluminação pública e o conceito de passadeiras inteligentes;
- no Capítulo 3 são introduzidos os principais conceitos de iluminação, incluindo noções de luminotécnica, parâmetros fotométricos e características relevantes para o projeto de iluminação pública;
- no Capítulo 4 são descritas as tecnologias de iluminação e de controlo utilizadas, com destaque para as fontes de luz, componentes de luminárias, sistemas de regulação de fluxo e telegestão;

- no Capítulo 5 são apresentados os conceitos associados às passagens para peões, assim como as regras e recomendações aplicáveis;
- no Capítulo 6 é feita a caracterização da solução de gestão energética, detalhando as tecnologias selecionadas e o sistema a implementar;
- no Capítulo 7 é descrita a proposta de passadeiras inteligentes, incluindo os sensores, os dispositivos de iluminação e o modo de funcionamento;
- no Capítulo 8 é apresentado o desenvolvimento prático do trabalho, elaborado com uma tecnologia diferente *CX-Programmer*, de modo a demonstrar que o sistema pode ser implementado por diversas tecnologias, também inclui o plano do sistema, o hardware utilizado, a ligação da rede de comunicação, a implementação do hardware numa zona dedicada, e com a designação de caixa de controlo, o consumo energético, a programação e a supervisão;
- por fim, no Capítulo 9 são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e são sugeridas possíveis linhas de trabalho futuro.

Com este trabalho, pretende-se contribuir para a discussão e desenvolvimento de soluções de iluminação pública mais eficientes e inteligentes, demonstrando que é possível conciliar a redução do consumo energético com a melhoria das condições de segurança nos espaços urbanos.

2. ENQUADRAMENTO

2.1 Gestão de Energia da Iluminação Pública

Com a necessidade reduzir o consumo energético à escala global, existe uma cultura para o desenvolvimento de sistemas de controlo para a otimização energética de modo a baixar o consumo e as emissões de CO₂, o Acordo Paris alcançado em 2015, determinou como objetivos de longo prazo, a contenção do aumento da temperatura média mundial abaixo dos 2°C. Com a entrada em vigor a 4 de novembro de 2016, resultou na implementação da CQNUAC, com o reconhecimento explícito de que apenas com o contributo de todos é possível ultrapassar o desafio das alterações climáticas. Neste sentido, foi criado o PNEC que é fundamental para assegurar a concretização das metas em matéria de energia e clima no horizonte 2030 e está orientado para o futuro e para os objetivos a longo prazo de Portugal. Face ao contexto internacional, comunitário e nacional, Portugal aprovou a sua primeira LBC, que vem consolidar objetivos, princípios e obrigações para os diferentes níveis de governação para a ação climática, através de políticas públicas, e estabelecer novas disposições em matéria de política climática, nomeadamente, a estipulação de direitos e deveres em matéria clima, reforçando o direito à participação dos cidadãos [1].

Tendo em conta estes projetos ambiciosos e existindo uma possibilidade de redução do consumo energético nas cidades, foi decidido desenvolver sistemas de controlo da iluminação pública, onde com recursos a PLCs e sensores existe a possibilidade da redução da fatura energética. O consumo energético da iluminação pública em Portugal representa cerca de 3% do consumo total, se com o controlo desenvolvido conseguir baixar 1% desse consumo, irá reverter numa poupança anual para o município na casa dos milhares de euros onde poderão ser investidos em outros serviços, além do fator económico irá reduzir as emissões de CO₂, onde irá garantir uma melhoria do meio ambiente.

2.2 Passadeiras Inteligentes

Existem locais para travessia de peões em que devido a falta de visibilidade, podem ocorrer atropelamentos bastante graves, podendo até causar uma fatalidade, nos últimos 10 anos em Portugal, mais de 55 mil peões foram atropelados. Em

Setúbal o número de atropelamentos foi de cerca de 60, onde 40 foram em passadeiras durante o ano de 2024 [15].

Seguindo a lógica das *smart cities*, foi decidido também desenvolver um sistema para alerta de peões nas passadeiras, onde o objetivo principal será alertar os condutores para a presença de peões nas passadeiras, com a ajuda de iluminação e sensores.

3. CONCEITOS DE ILUMINAÇÃO

A iluminação pública é um elemento essencial da infraestrutura urbana, com impacto direto na segurança rodoviária, na prevenção da criminalidade e na qualidade de vida das populações e tem um consumo de cerca de 15% de toda a eletricidade a nível mundial.

3.1 História da Iluminação

A primeira iluminação artificial de iluminação, foi com a descoberta do fogo há 125,000 anos A.C., quando o homem aprendeu a dominar o fogo e a acender as primeiras fogueiras, iniciando assim a história da iluminação [2].

A cerca de 70,000, as tochas, foram o primeiro instrumento contruído para transportar o fogo. Com a necessidade de conseguir obter uma melhor iluminação as tochas foram evoluindo em tochas portáteis e montadas em paredes [2].

No Egito, foram encontrados castiçais que datam o século IV A.C., as velas foram uma evolução das tochas, construídas a partir de fibras vegetais e gordura animal e eram armazenadas em recipientes de pedra e barro. Após 1860, a parafina foi destilada a partir do petróleo e foi produzida em grandes quantidades [2].

Existe evidências da utilização de óleo na iluminação de há cerca de 4500 anos. As lamparinas foram surgindo aos poucos, tratava-se de um recipiente com uma haste no centro que gerava uma chama, através de um combustível. Durante a revolução industrial as lâmpadas a óleo e velas eram a principal forma de iluminação nos lares comuns [2].

Da lamparina ao lampião, foi uma evolução rápida, feita inicialmente de argila e adaptado posteriormente para metal, o lampião consistia numa base metal com uma moldura de vidro e era abastecido numa fase inicial por óleo animal e vegetal, onde por volta de 1800 foi substituído por gás. Com a alteração para gás a eficiência luminosa do lampião era 10 vezes superior à iluminação de chama aberta [2].

Em 1840, iniciaram-se os primeiros trabalhos em lâmpadas incandescentes, mas durante o ano de 1879 Thomas Edison inventou a lâmpada elétrica, que com o passar do tempo substituiu todos os outros meios de iluminação artificial. No ano de 1920 uma lâmpada incandescente tinha uma eficácia de 15 lumens/watt [2].

Em 1926, Edmund Germer ao revestir o interior da lâmpada com material fluorescente UV, criou uma fonte de luz inovadora e patenteou as lâmpadas fluorescentes [2].

Henry Joseph Round inventou o primeiro LED em 1907, mas a sua experiência não era suficiente para iluminar uma divisão. Em 1927 Oleg Losev, construiu o primeiro LED. Em 1962 Nick Holonyak, Jr., fez uma enorme descoberta ao desenvolver um LED que emitia iluminação visível. Em 1993 Shuji Nakamura, foi inovador ao conseguir criar a luz LED azul, pois assim ao ser combinado com a luz amarela, poderia obter a luz branca, devido a este desenvolvimento tecnológico, foi reconhecido com o Prémio nobel da Física em 2014 [2].

3.2 Captação de luz

Sendo a luz uma radiação, cuja gama de comprimentos de onda (λ) do espectro da radiação eletromagnética consegue ser detetada pelo olho humano. Esta gama situa-se entre a radiação ultravioleta (380 nm) e infravermelha (760 nm), a figura 1 demonstra estes comprimentos de onda [3].

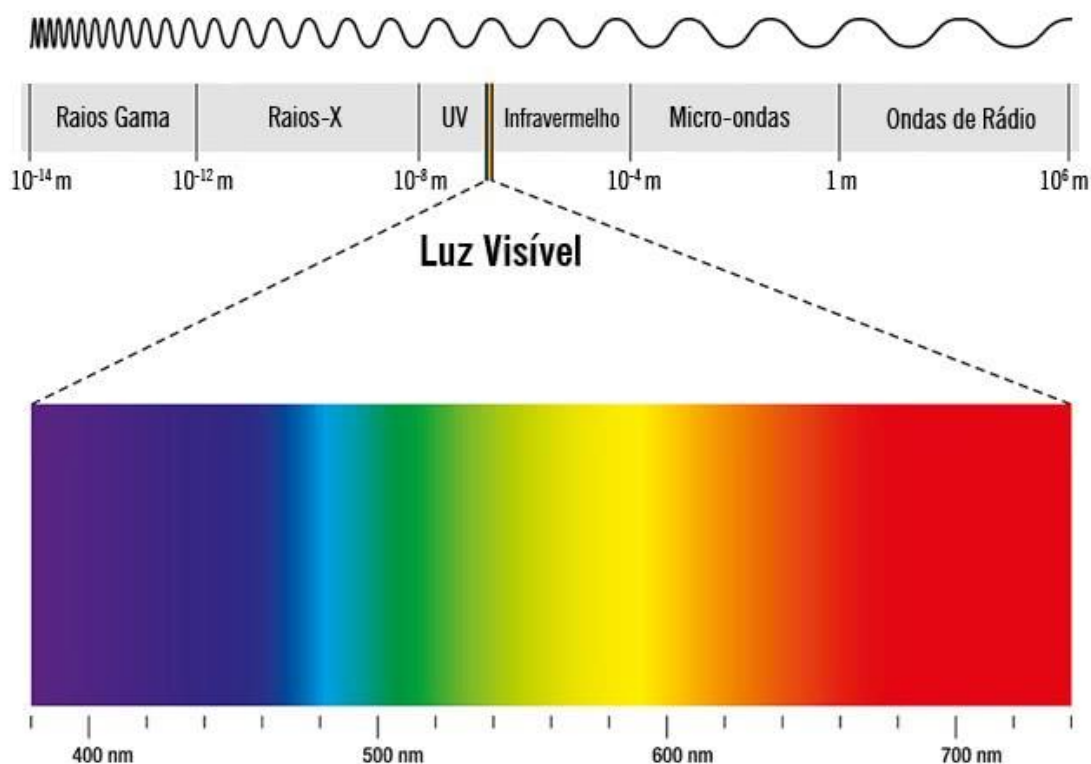


Figura 1 – Comprimentos onda do espectro eletromagnético e espectro visível [6].

No ar, a velocidade da luz é praticamente igual à da velocidade no vácuo, ou seja, 300 000 km/s. As três grandezas físicas básicas da luz e de toda a radiação eletromagnética são:

- Comprimento de onda (λ) – define a cor;
- Frequência – é inversamente proporcional ao comprimento de onda e é definida como o inverso do período (T) da onda;
- Amplitude (A) – define o brilho [3].

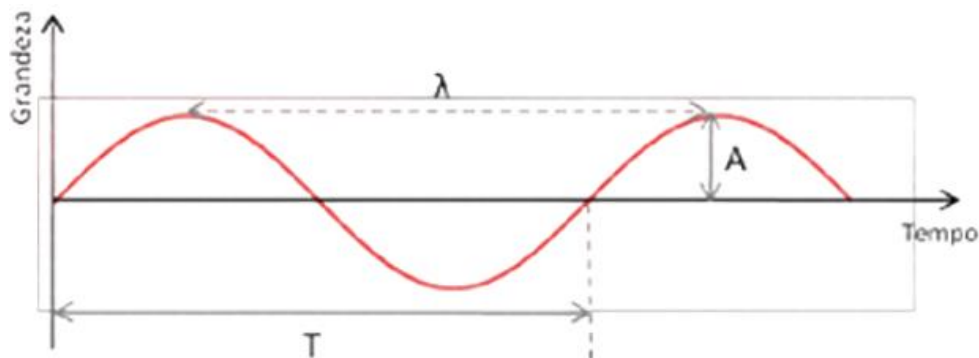


Figura 2 – Onda sinusoidal periódica [3]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

A luz só se torna visível quando interage com a matéria. Nesse contacto, a luz incidente pode ser:

- a) Refletida, como espelhos, com superfícies microscópicas lisas, ou seja, com irregularidades mais pequenas que o comprimento de onda da luz visível, a luz é refletida na sua totalidade, numa única direção, figura 3 (ângulo de incidência igual ao ângulo de partida ou reflexão) [3].

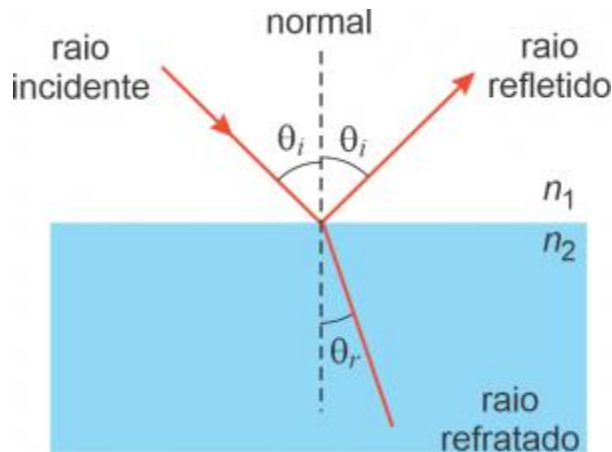


Figura 3 – Luz refletida e refratada [7]

- b) Absorvida, parte da energia proveniente da radiação luminosa, não consegue atravessar o material, sendo absorvida por ele. Traduz-se pelo quociente entre fluxo luminoso absorvido (ϕ_a) por um corpo e o fluxo (ϕ) [3].

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi} \quad (3.3)$$

Um objeto de cor preta absorve todas as frequências da radiação visível [3].

- c) Refratada, existe refração da luz quando esta atravessa um meio diferente, alterando a sua velocidade (v) que será proporcional a,

$$n_1 \cdot \text{sen}(i) = n_2 \cdot \text{sen}(r) \Leftrightarrow \frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.4)$$

- d) Transmitida, ocorre quando a luz emitida passa, praticamente na sua totalidade, através de um corpo. Os materiais que o permitem [3].

O nosso instrumento natural de captação de luz é o olho. Para além de possibilitar a análise do ambiente no campo de visão, o olho humano permite discriminar os objetos quanto à sua forma, se estão perto ou longe, se estão em movimento, e se são ou não coloridos, diferenciando a sua tonalidade [3].

Existem dois tipos de células fotossensíveis à gama de radiação visível: os bastonetes e os cones. Os bastonetes apenas são sensíveis à quantidade de luz que os atinge, sendo por isso responsáveis pela indicação de níveis de luminosidade e estão presentes em maior número na orla da retina. São fundamentais para o

discernimento das formas e silhuetas, especialmente em ambientes de baixa luminosidade [3].

Os cones são sensíveis a partes específicas na banda visível do espectro eletromagnético, sendo responsáveis pela percepção da cor. Estão divididos em,

- Cones azuis, sensíveis aos comprimentos de onda mais curtos do espectro;
- Cones verdes, sensíveis a comprimentos de onda médios;
- Cones vermelhos, sensíveis a ondas de comprimento longo.

Ao observar um objeto de cor branca, os três grupos de cones estão a ser estimulados ao mesmo tempo, o que não acontece quando vemos, por exemplo, um objeto amarelo, onde sobretudo são os cones vermelhos e verdes a que estão a ser estimulados [3].

A densidade dos recetores na retina e o poder de refração do sistema das lentes óticas irá definir a nossa capacidade visual. Possuímos, então, uma dada acuidade visual que é influenciada por fatores como a adaptação, a acomodação, o contraste e a idade [3].

3.2.1 Acuidade visual

A acuidade visual é a capacidade que o olho tem de reconhecer separadamente, com nitidez e precisão, objetos muito pequenos e próximos entre si, na figura 4 ilustra o que é a acuidade visual [3].

Quantitativamente é o inverso do ângulo mínimo sob o qual os olhos conseguem distinguir um pormenor [3].

$$\text{Acuidade Visual} = \frac{1}{\theta} \quad (3.5)$$

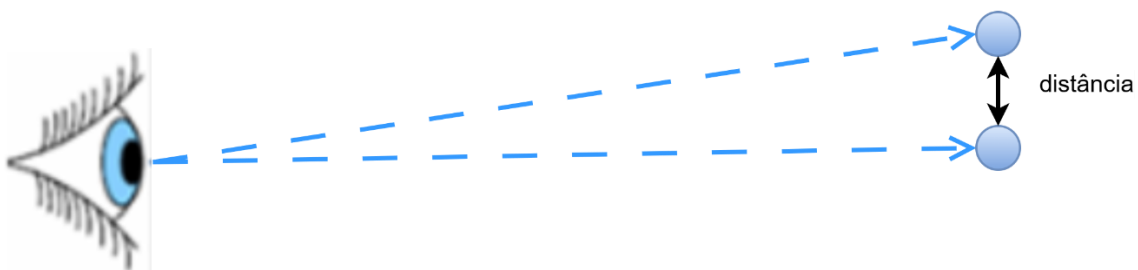


Figura 4 – Acuidade visual [3]

3.2.2 Adaptação

A adaptação é a capacidade que o olho humano possui para se ajustar a diferentes níveis de intensidade luminosa, mediante os quais a pupila irá dilatar ou contrair. Na adaptação ao escuro, o diâmetro pupilar aumenta, os bastonetes começam a atuar e recuperamos a visibilidade, porém com perda da resolução detalhada e da visão em cores. Este é um processo que pode demorar vários minutos a ocorrer, ao passo que a adaptação ao claro dá-se em poucos segundos. A figura 5 demonstra a sensibilidade ocular à incidência da luz. [3].

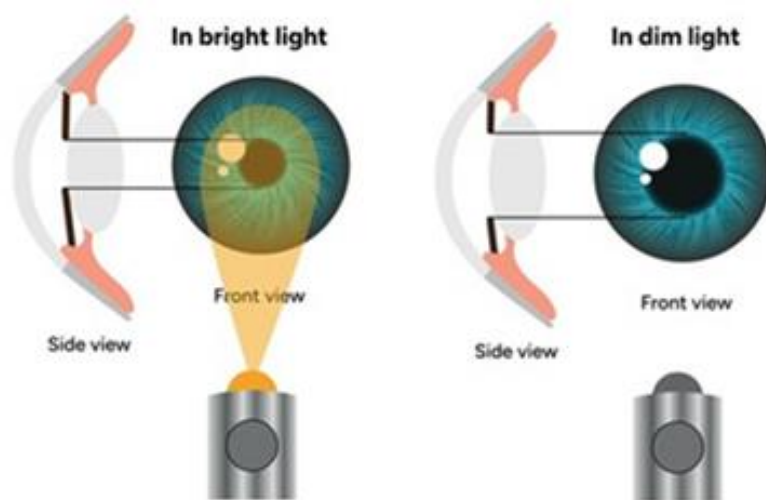


Figura 5 – Dilatação da pupila em condições de iluminação ambiente diferente [8]

3.2.3 Contraste

O contraste é a avaliação da diferença da aparência de duas ou mais partes de algo, ou seja, é a diferença de luminância entre um objeto que se observa (L1) e a sua envolvente (L2) como demonstrado na figura 6 [3].

$$Contraste = \frac{L_1 - L_2}{L_2} \quad (3.6)$$

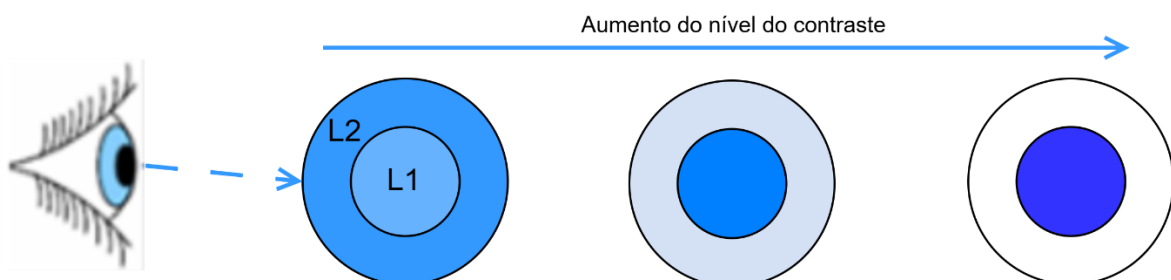


Figura 6 – Contraste de objetos [3]

3.3 Noções básicas de luminotécnica

A Radiometria e a Fotometria desenvolveram uma série de métodos e processos de medida das grandezas luminosas. Enquanto a Radiometria se preocupa com toda a radiação do espectro eletromagnético emitida por uma fonte, a Fotometria apenas se debruça sobre a radiação visível. A cada grandeza radiométrica está associada uma grandeza fotométrica, sendo o seu valor proporcional à curva de sensibilidade fotópica do olho [3].

3.3.1 Potência radiante (Φ_r)

Quantidade de energia radiante (ΔQ) que atravessa uma dada superfície por unidade (Δt) [3].

$$\Phi_r = \frac{\Delta Q}{\Delta t} [W] \quad (3.7)$$

3.3.2 Intensidade radiante (I_r)

Potência radiante ($\Delta \Phi_r$) transportada por unidade de ângulo sólido ($\Delta \Omega$) [3].

$$I_r = \frac{\Delta \Phi_r}{\Delta \Omega} [W/sr] \quad (3.8)$$

3.3.3 Radiância (L_r)

Potência radiante (Φ_r) por unidade de ângulo sólido ($\Delta \Omega$) e por unidade de área normal (ΔA) [3].

$$L_r = \frac{\Delta^2 \Phi_r}{\Delta \Omega \cdot \Delta A \cdot \cos \theta} \left[\frac{W}{sr} \cdot m^2 \right] \quad (3.9)$$

3.3.4 Irradiância (E_r)

Potência radiante ($\Delta\Phi_r$) por unidade de área (ΔA) num recetor [3].

$$E_r = \frac{\Delta\Phi_r}{\Delta A} [W/m^2] \quad (3.10)$$

3.3.5 Ângulo Sólido (Ω)

O ângulo sólido é uma extensão tridimensional do conceito de ângulo plano (θ) entre duas linhas que definem um arco de circunferência (S). Para caracterizarmos um ângulo sólido é necessário definir um vértice (fonte de luz pontual). A partir deste, e ao longo de uma distância (d), é definida uma área (A) na superfície esférica com centro, como ilustrado na figura 7 [3].

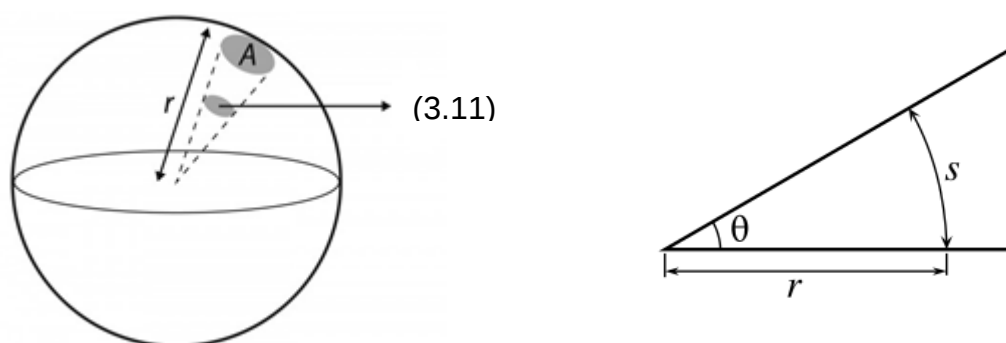


Figura 7 – Ângulo Sólido e Plano [9], [10].

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (3.11)$$

$$\theta = \frac{S}{r} (rad) \quad (3.12)$$

3.3.6 Fotométricas

Na iluminação pública, são as grandezas fotométricas que irão estabelecer parâmetros de qualidade comparativos de uma dada instalação para um determinado local. Assim, é muito importante ter noção dos seguintes conceitos:

a. Fluxo Luminoso (ϕ)

É a quantidade de luz emitida em todas as direções pela fonte de luz [3].

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} = 1 \text{ lx} \cdot \text{m}^2 \quad (3.13)$$

O rácio de saída do fluxo luminoso (LOR) é entendido como o quociente entre o fluxo luminoso (ϕ) total de uma luminária e a soma dos fluxos luminosos individuais das suas lâmpadas [3].

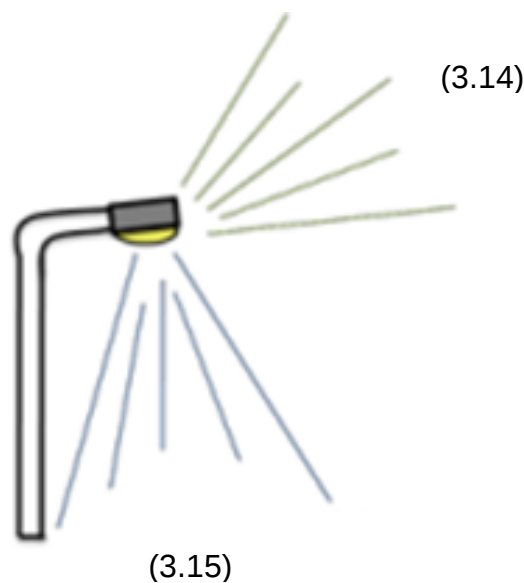


Figura 8 – Saída de fluxo luminoso [3].

$$ULOR = \frac{\phi_{para\ cima}}{\phi_{lâmpada}} \quad (3.14)$$

$$DLOR = \frac{\phi_{para\ baixo}}{\phi_{lâmpada}} \quad (3.15)$$

$$LOR = ULOR + DLOR \quad (3.16)$$

$$LOR = \frac{\phi_{saída\ da\ luminária}}{\Sigma \phi_{lâmpada\ individual}} \quad (3.17)$$

O ULOR e o DLOR de uma luminária são o rácio entre o fluxo emitido pela luminária para cima e para baixo, respetivamente como ilustrado na figura 8 [3].

b. Intensidade Luminosa (I)

Se a fonte luminosa irradiasse a luz uniformemente em todas as direções, o fluxo luminoso seria distribuído em forma de esfera. No entanto, tal facto é quase impossível de acontecer, pelo que é necessário medir o valor da luz emitida em cada direção [3].

À representação esquemática no espaço envolvente da intensidade luminosa, dá-se o nome de diagrama fotométrico, sendo que os comprimentos dos vetores dessa distribuição espacial representam a intensidade luminosa, a figura 9 ilustra a intensidade luminosa nos planos [3].

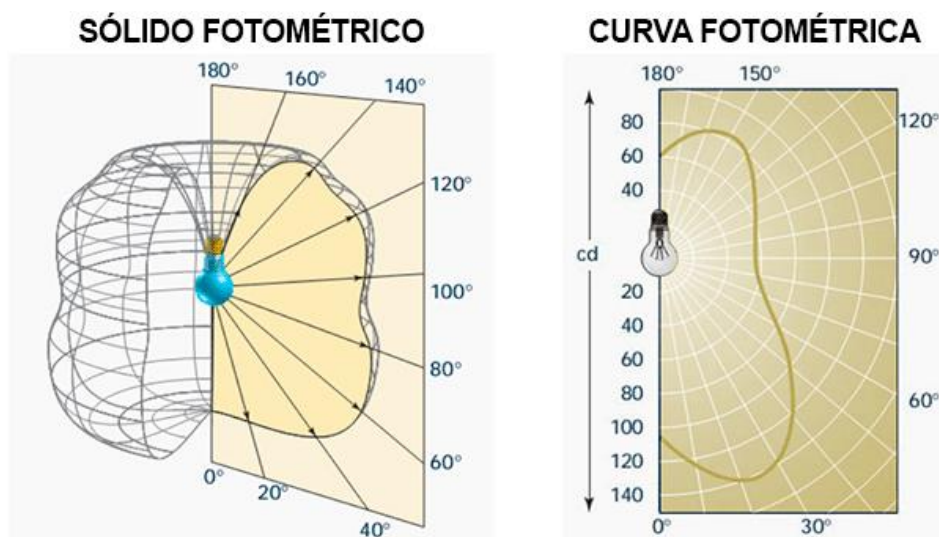


Figura 9 - Vetores da intensidade luminosa [11].

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta \Omega} \quad (3.18)$$

$$Contraste = \frac{L_1 - L_2}{\Delta \Omega} \quad (3.19)$$

c. Iluminância (E)

A iluminância tem como unidade o lux (lx). É o quociente entre o fluxo luminoso ($\Delta \phi$) incidente num elemento da superfície, e a área (ΔA) desse elemento [3].

$$E = \frac{\Delta \phi}{\Delta A} \quad (3.20)$$

Ou seja, é a quantidade de fluxo luminoso recebido pela unidade de área iluminada, como ilustra na figura 10 [3].

d. Iluminância média

$$E_{med} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^{k=n} E_k \quad (3.21)$$

Na elaboração de projeto luminotécnicos faz-se referência a três tipos de iluminâncias, que também poderão ser consideradas em situações especiais:

- Horizontal (E_h), ou apenas iluminância (E), calculada ou medida ao nível da via;
- Vertical (E_v), calculada a uma altura de 1,5 metros acima da via;
- Semicilíndrica (E_{sc}), calculada a uma altura de 1,5 metros acima da via [3].

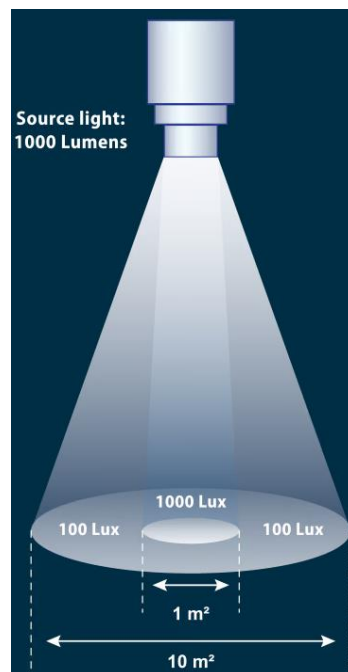


Figura 10 – Iluminância [12]

Considerando os seguintes parâmetros:

I – Intensidade luminosa na direção do ponto

α – ângulo entre o plano que contém o raio de luz e o plano ortogonal

ε – ângulo de incidência da luz no ponto de cálculo

ϕ – Fluxo luminoso da(s) lâmpada(s) da luminária

H – Altura da luminária

$$MF = F_{MLL} \cdot F_{ML} \quad (3.22)$$

Determinam-se E_v e E_{sc} através das equações,

$$E_v = \frac{I \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos^2(\varepsilon) \cdot \sin(\varepsilon) \cdot \Phi \cdot MF}{(H-1,5)^2} \quad (3.23)$$

$$E_{sc} = \frac{[I \cdot \cos(\alpha)] \cdot \cos^2(\varepsilon) \cdot \sin(\varepsilon) \cdot \Phi \cdot MF}{\pi \cdot (H-1,5)^2} \quad (3.24)$$

e. Luminância (L)

A luminância é uma medida da densidade da intensidade da luz refletida numa dada direção, que descreve a quantidade de luz que atravessa ou é emitida de uma superfície, segundo um ângulo sólido ($\Delta\Omega$). Tem como unidade SI a cd/m^2 [3].

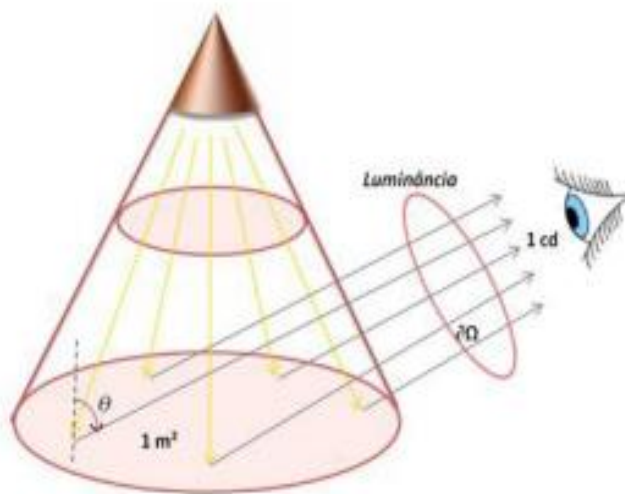


Figura 11 – Luminância [3]

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos(\theta)} \quad (3.25)$$

Ao denominador desta equação dá-se o nome de área aparente. Esta é a área projetada na direção do observador, que corresponde à área da superfície iluminada, na figura 11 demonstra o conceito [3].

f. Luminância média

$$L_{med} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n L_k \quad (3.26)$$

onde 'n' é o número de pontos de luminância calculados sobre a superfície da via.

3.4 Visão

Existem três tipos de visão:

- Fotópica, visão colorida dos humanos, sob condições normais de luminosidade durante o dia. Cones ativos [3];
- Escotópica, visão humana no escuro. Apenas os bastonetes são ativados [3];
- Mesópica, combinação entre a visão fotópica e escotópica em situações com uma luminosidade baixa, mas não totalmente escuro. São as condições existentes para a visão humana à noite com a iluminação pública ligada, onde quer os bastonetes quer os cones estão ativos [3];

A figura 12 ilustra os tipos de visão em função da luminância.

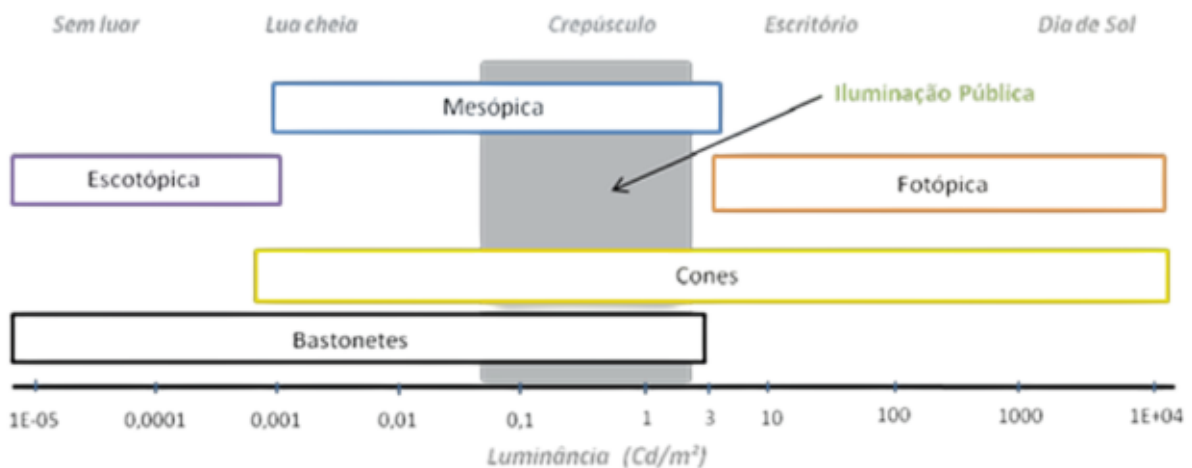


Figura 12 - Gamas de luminância para cada tipo de visão [3]

Para o olho humano, a máxima eficácia na curva de sensibilidade da visão fotópica é de 683 lm/W num comprimento de onda de 555 nm, ao passo que a máxima eficácia na curva de sensibilidade escotópica é de 1700 lm/W num comprimento de onda de 507 nm. A eficácia máxima em condições de visão mesópica varia consoante a sua curva, que por sua vez varia de acordo com o nível de luminosidade ambiente, pelo efeito de *Purkinje* [3].

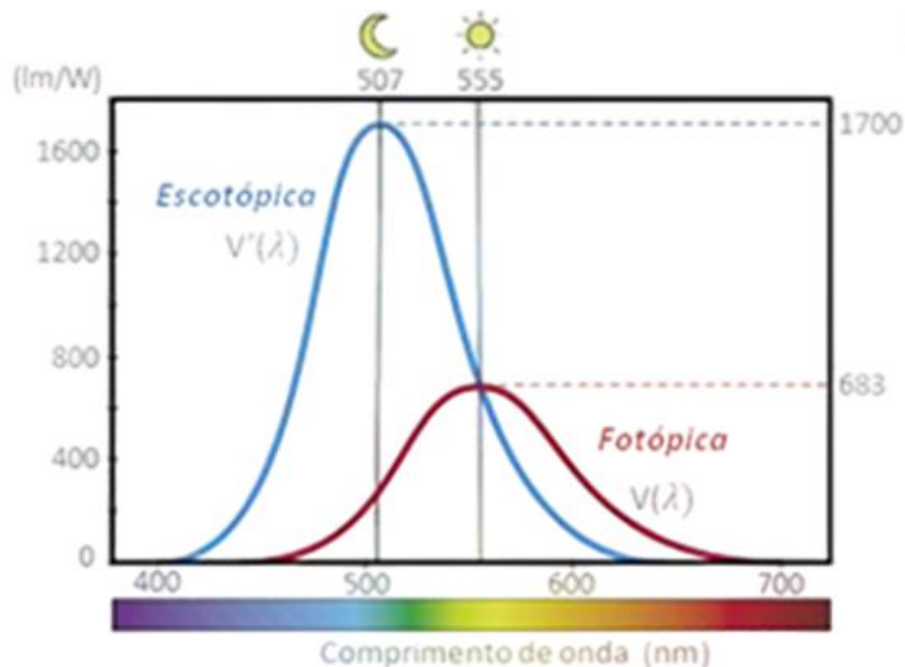


Figura 13 - Eficácia luminosa máxima dos tipos de visão [3]

Efeito de *Purkinje* consiste no deslocamento do máximo de sensibilidade da visão sensível às cores (fotópica), para o máximo de sensibilidade à luz (escotópica), com a diminuição da luz recebida pelo olho. Apesar de ainda não existir normalização relativamente à utilização da visão mesópica, estudos da IEC indicam que a iluminação pública enquadra-se nesta visão, como ilustra na figura 13 [3].

A utilização da curva de sensibilidade do olho, na zona mesópica, permitiria um ganho de eficiência, para as fontes de luz com espectro centrado nesse comprimento de onda. Sendo a curva mesópica a combinação das curvas fotópica e escotópica, o centro de eficiência da mesópica posicionar-se-á entre os 555 nm e os 507 nm, consoante o nível de luminância ambiente existente [3].

3.5 Parâmetros de uma instalação de iluminação pública

3.5.1 Temperatura da cor

A cor não é uma propriedade intrínseca dos objetos, isoladamente os objetos não possuem cor. O nosso sistema neuronal ótico é que, respondendo ao estímulo visual provocado pela reflexão da radiação pelos objetos e meio ambiente, atribui cor a um determinado comprimento de onda na região do visível (380 – 760 nm) [3].

Para um melhor entendimento do conceito de temperatura de cor, é pertinente definir corpo negro. Este é um objeto que, idealmente, absorveria toda a radiação eletromagnética que lhe chegasse, emitindo, um espectro de luz em função da temperatura a que se encontra [3].

À temperatura ambiente, os corpos negros emitem luz infravermelha. Pela lei de Wien $\lambda = k/T$ ($T = [K]$) à medida que a temperatura aumenta, os corpos negros começam a emitir comprimentos de onda visíveis, desde o vermelho, passando pelo laranja, amarelo, até ao azul, figura 14 [3].

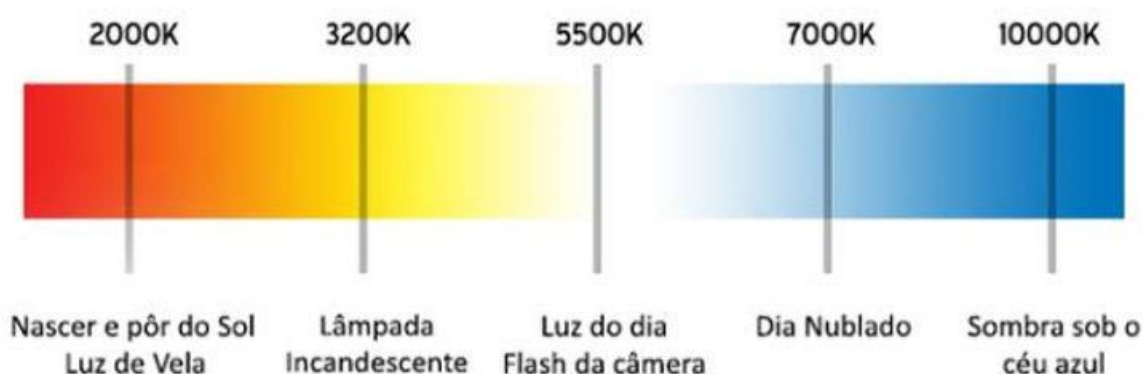


Figura 14 - Variação da temperatura de cor [13]

A temperatura de cor é, então, uma característica da luz visível, determinada pela comparação da sua saturação cromática com a de um corpo negro radiante ideal, ou seja, é a temperatura a que um corpo negro irradiaria a mesma cor da fonte luminosa [3].

Algumas fontes de luz, como por exemplo os LED, emitem luz por outros processos que não o aumento da temperatura de um corpo. Isto significa que a radiação emitida não segue a forma do espectro de um corpo negro [3].

A estas fontes luminosas associa-se, não o conceito de temperatura de cor, mas mais corretamente o de temperatura de cor correlacionada. Esta é a temperatura de cor de um corpo negro radiante que, em termos de perceção da cor, está mais próxima da luz da fonte luminosa [3].

Elevadas temperaturas de cor correspondem a cores frias, logo, quanto mais elevada for, mais fria será a cor. Na iluminação de espaços públicos podemos considerar três gamas de luz branca, a figura 15 ilustra o efeito de diferentes tipos de temperatura na mesma via [3].



Figura 15 - Diferentes aparências no mesmo local [3]

De acordo com a figura 15 verifica-se que a luz branca, de espectro mais alargado, proporciona, em relação a uma luz mais monocromática alaranjada, uma maior acuidade visual, um menor tempo de resposta e, principalmente, um índice de restituição cromática bem mais elevado. Todos estes aspetos potenciam a sensação de conforto, possibilitam um melhor reconhecimento facial e aumentam a segurança dos cidadãos [3].

3.5.2 Eficácia Luminosa

A eficácia luminosa (η) de uma fonte é a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte (ϕ) e a potência elétrica por ela absorvida (P) [3].

$$\eta = \frac{\phi}{P} \text{ (lm/W)} \quad (3.27)$$

Os equipamentos fotométricos e os medidores de luz são geralmente calibrados conforme a sensibilidade espectral dos cones, ou seja, na visão fotópica. No entanto, estudos indicam que a distribuição espectral da fonte de luz tem, de facto, efeito na visibilidade que ela produz. Em termos de visão mesópica, estas pesquisas têm apontado no sentido de as fontes de luz branca serem mais eficientes que as amareladas [3].

Tabela 1 – Lúmen por potência [3]

Fonte Luminosa	Eficácia Fotópica (lm/W)	Eficácia Escotópica (lm/W)
Vapor de sódio de Alta pressão	120	70
Vapor de sódio de baixa pressão	190	40
Iodetos metálicos	100	180
LED	140	200

Para calcularmos a eficiência luminosa, de uma fonte de luz, a níveis escotópicos, ou seja, na ausência de luz, há que substituir os valores da curva $V(\lambda)$ pelos valores da sensibilidade escotópica $V'(\lambda)$. Estas duas curvas definem o chamado Rácio S/P que representa o quociente entre o output luminoso da fonte de luz segundo $V'(\lambda)$ e $V(\lambda)$ [3].

A eficiência energética de uma instalação de iluminação pública, define-se como a relação entre o produto da superfície iluminada, pela iluminação média em serviço da instalação e a potência total instalada, [3]

$$IEE = \frac{S \cdot E}{P} \quad (3.28)$$

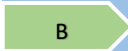
S – Área total (m^2): produto do valor da distância entre pontos de luz e largura total da via e passeios

E – Nível médio de iluminância calculado

P – Potência total das luminárias, incluindo equipamentos elétricos.

A iluminação pública nos últimos anos tem levantado o interesse de todas as entidades envolvidas, numa tentativa de dar resposta ao uso racional de energia, sendo que os fabricantes continuam a desenvolver as suas tecnologias nesse sentido. Assim, a tabela 2 caracteriza a eficiência energética na iluminação pública. Não obstante, a mesma poderá ter de ser revista periodicamente para acompanhar as evoluções tecnológicas e as melhores práticas [3].

Tabela 2 – Tabela de eficiência para vias [3]

		Vias com larguras > 6m	Vias com larguras > 6m
	A	IEE > 40	IEE > 30
	B	40 ≥ IEE > 35	30 ≥ IEE > 25
	C	35 ≥ IEE > 30	25 ≥ IEE > 20
	D	30 ≥ IEE > 25	20 ≥ IEE > 15
	E	25 ≥ IEE > 20	IEE ≤ 15
	F	20 ≥ IEE > 15	
	G	IEE ≤ 15	

Em complemento à determinação da classificação energética, poderá ser considerado ainda o rácio de $W_{\text{médio}}/m^2$, sendo que:

$$W_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \text{Tempo de serviço do patamar } i}{\text{Tempo total de serviço}} \quad (3.29)$$

O índice “i” representa os patamares de potência [W] de um ponto de luz incidente numa área durante um determinado período [3].

Os cálculos do consumo energético devem ter como valor de referência o número de horas de utilização diária, igual a 12 [3].

No caso de sistemas de gestão do nível de iluminação dinâmica, que recorrem a informação de tempo real, a determinação do $W_{\text{médio}}$ poderá ser realizada com base nos patamares mínimos a selecionar para cada período [3].

3.5.3 Poluição luminosa

A poluição luminosa é definida como qualquer efeito adverso causado ao meio ambiente pela luz artificial excessiva, refletida ou mal direcionada. No domínio da iluminação pública, são considerados três tipos de poluição luminosa [3]:

- Luz emitida para o céu (*sky glow*), é definida como o brilho do céu à noite que resulta da radiação que é emitida diretamente para cima (ULOR) e da radiação refletida pelas diversas superfícies [3];

- Luz intrusiva (ilumina locais indevidamente), é definida como a luz emitida por uma instalação para fora dos limites da área ou propriedade que deveria iluminar [3];
- Brilho encandeante (*glare*), é um parâmetro mensurável de forma objetiva, dado pelo incremento limite (TI) como observado na figura 16. Causa incómodo, desconforto, distração ou redução na capacidade de observar informação essencial e está diretamente relacionado com a segurança rodoviária [3].



Figura 16 - Encandeamento do observador [3]

$$TI = \frac{65}{L^{0.8}} \cdot L_v \quad (3.30)$$

$$L_v = 10 \cdot \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{\theta_k^2} \quad (3.31)$$

O L_v é a luminância de véu, ou seja, é o brilho encandeante que se forma na retina do olho reduzindo, assim, a percepção do contraste da imagem, ao observador [3].

A Figura 17 representa o comportamento fotométrico de uma luminária, evidenciando a distribuição do fluxo luminoso e os seus efeitos em função do ângulo de emissão. Observa-se que uma boa parte da luz emitida pode não contribuir para a iluminação útil da via, tornando-se dispersão indesejada. Parte dessa luz é projetada acima do plano horizontal da luminária, originando o chamado ULOR, designado também como “luz emitida para o céu”.

Este fenómeno é um dos principais indicadores de ineficiência luminosa e constitui um fator crítico na geração de poluição luminosa, afetando negativamente a visibilidade e o ambiente noturno. Apresenta também outros fenómenos dentro do DLOR que afetam a qualidade da iluminação pública.

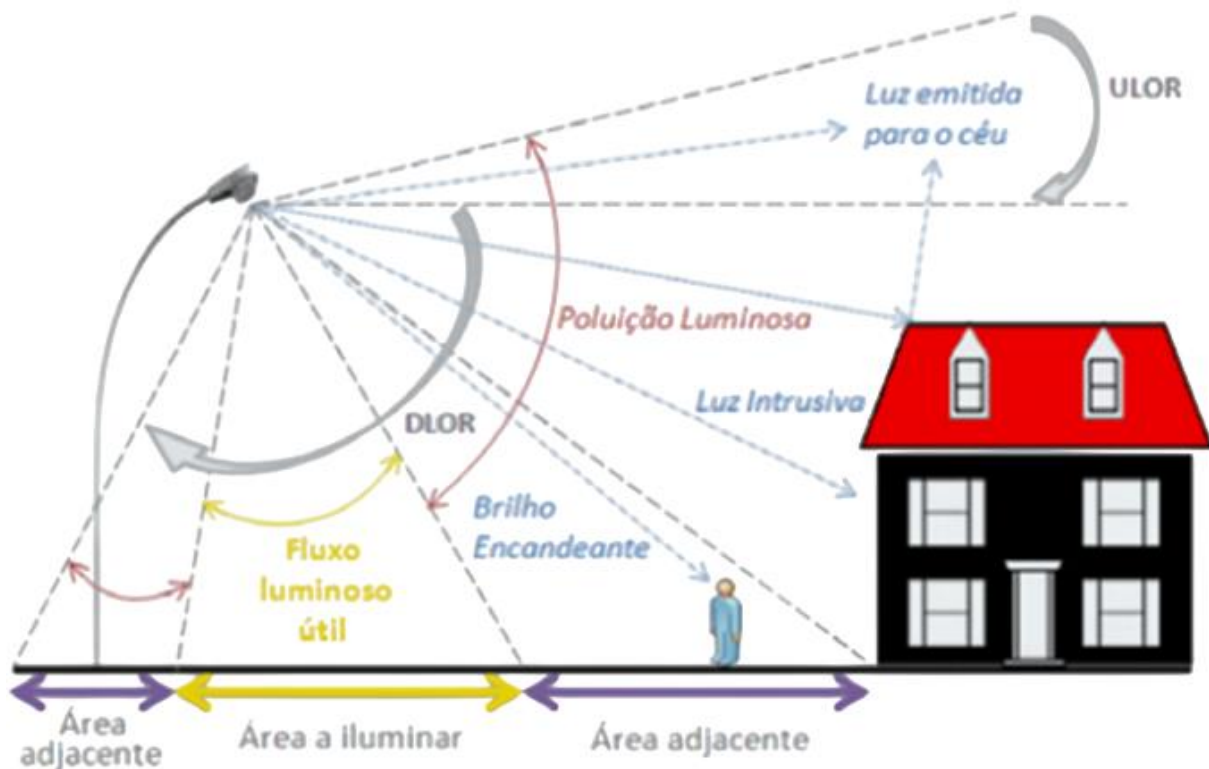


Figura 17 - Fluxo luminoso emitido por uma luminária [3].

3.5.4 Uniformidade

Um dos principais objetivos na iluminação pública é providenciar uma boa iluminação na superfície das ruas e estradas, de modo que os obstáculos sejam facilmente identificáveis. Assim, é fundamental que não existam áreas negras entre as zonas iluminadas, ou seja, que haja uniformidade na iluminação [3].

A uniformidade geral (U_0) deverá ser calculada como o rácio entre o valor da luminância mais baixo ($L_{\min}$) e a luminância média (L_{med}) [3].

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{L_{\text{med}}} \quad (3.32)$$

A uniformidade longitudinal (U_L) é calculada através do quociente entre o valor mais baixo ($L_{\min}$) e o valor mais alto (L_{med}) da luminância, na direção longitudinal, ao longo do centro de cada faixa de rodagem [3].

$$U_L = \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (3.33)$$

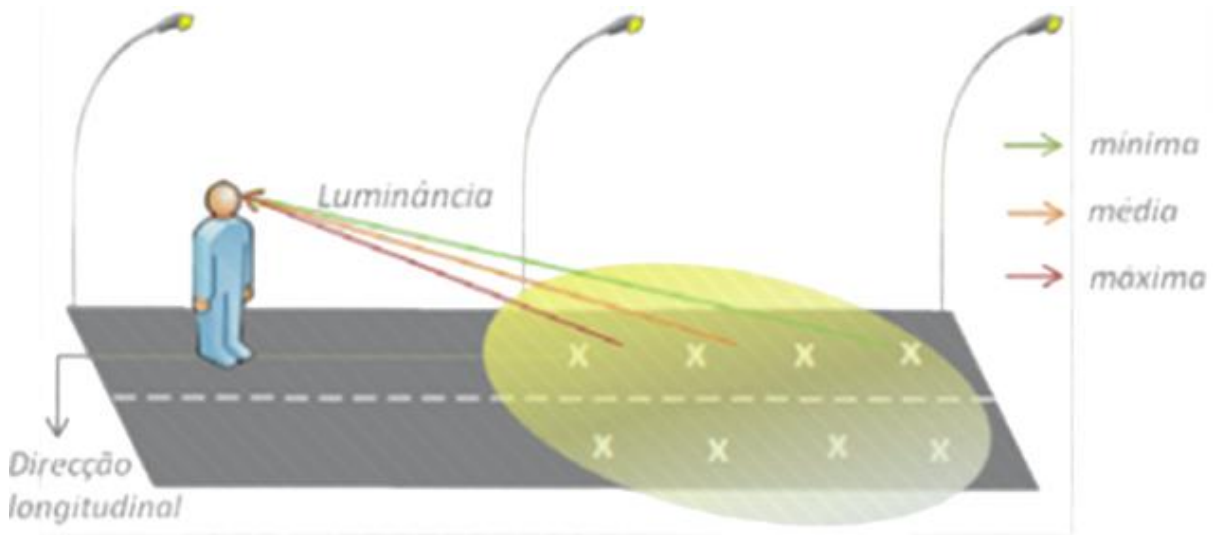


Figura 18 - Parâmetros da uniformidade geral e longitudinal [3]

De acordo com a figura 18, o número de pontos na direção longitudinal e o espaço entre eles terá de ser o mesmo que tenha sido usado no cálculo da luminância média. Adicionalmente, a posição do observador terá de estar no enfiamento da linha dos pontos de cálculo [3].

Pode ainda definir-se a uniformidade média (U_m) como sendo a relação entre o valor da iluminância mínima (E_{min}) e o valor da iluminância média (E_{med}) de uma instalação de iluminação [3].

$$U_m = \frac{E_{min}}{E_{med}} \quad (3.34)$$

Para além de uma adequada e uniforme iluminação das ruas e estradas, não se pode descuidar a visibilidade da parte superior de objetos mais altos na estrada, ou de objetos que se encontrem nas laterais das faixas de rodagem, estes apenas são vistos se existir uma boa iluminação na envolvente da estrada, ou seja, na sua vizinhança. Uma boa iluminação permite ao condutor ter uma melhor perceção da sua envolvente, possibilitando efetuar ajustes da sua velocidade e trajetória. Assim, é função do rácio envolvente (SR) assegurar que o fluxo direcionado para a periferia das estradas seja suficiente para o efeito [3].

O SR é definido como sendo a iluminância média horizontal (E) nas duas faixas longitudinais exteriores aos limites laterais da estrada (faixas 1 e 4), dividida pela

iluminância média horizontal de duas faixas longitudinais dessa estrada, adjacentes aos seus limites (faixas 2 e 3) como ilustrado na figura 19 [3].



Figura 19 – Limites laterais da estrada para cálculo do SR [3]

$$SR = \frac{E_1 + E_4}{E_2 + E_3} \quad (3.35)$$

3.5.5 Curvas do fator de utilização

As curvas do fator de utilização, existentes nas folhas de informação fotométrica, oferecem um método fácil de cálculo da iluminância média, para uma certa secção transversal da faixa de rodagem. Encontra-se um exemplo no anexo 6 que ilustra esta folha de informação.

Estas curvas são função das distâncias transversais (w), medidas em função da altura (h) dos postes de iluminação. Por exemplo, para uma largura de estrada a iluminar igual à altura do poste ($w=h$), observando a curva da Figura 20, teremos um fator de utilização de 0,4. Caso o poste de iluminação também ilumine o passeio, até por exemplo uma distância de $\frac{1}{4}h$, terá um fator adicional de utilização de 0,1. Assim, o fator de utilização total será 0,5.

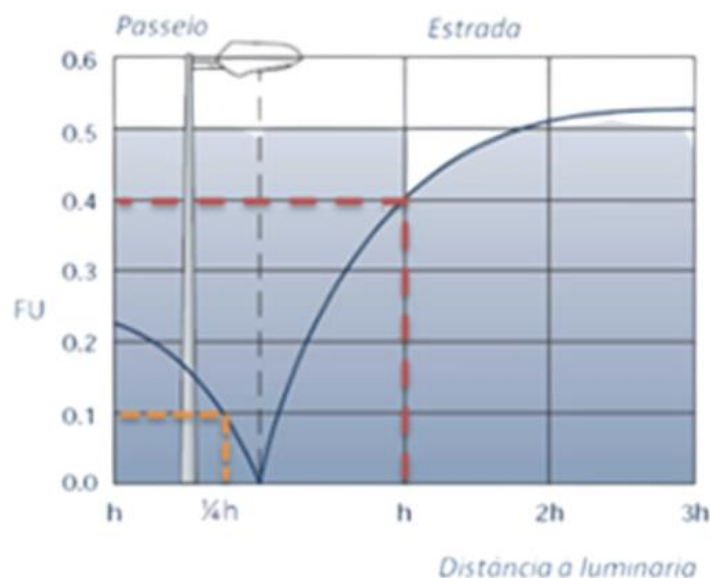


Figura 20 - Curva de fator de utilização [3]

$$E_{med} = \frac{FU \cdot \phi \cdot N}{w \cdot d} \quad (3.36)$$

Φ – Fluxo luminoso da lâmpada

FU – fator de utilização

N – nº de lâmpadas por luminária

d – Interdistância entre as luminárias

w – Largura de faixa

4. TECNOLOGIAS

Neste capítulo pretende-se caracterizar as diversas tecnologias existentes que compõem os sistemas de iluminação pública, nomeadamente, lâmpadas, luminárias, balastros e sistemas de comando e controlo.

4.1 Fontes de luz

A fonte de luz é o elemento que produz uma radiação eletromagnética no espectro visível [3].

Os vários tipos de fontes luminosas que podem ser utilizadas num sistema de iluminação pública, diferenciam-se mediante as suas características técnicas, económicas e dos seus parâmetros de desempenho, nomeadamente:

- Índice de Restituição de Cor (IRC);
- Temperatura de Cor (kelvin);
- Fluxo Luminoso (lm);
- Eficácia Luminosa (lm/W);
- Gama de Potência (W);
- Tempo de Vida (h);
- Custo (€);
- Fator de Sobrevivência da Lâmpada (FSL);
- Fator de Manutenção da Luminosidade da Lâmpada (FMLL).

Pelo papel de relevância no parque nacional de iluminação pública serão apenas consideradas as lâmpadas de cor alaranjada (vapor de sódio de alta pressão) e as de cor branca (iodetos metálicos e LED) [3].

4.1.1 Vapor de sódio de alta pressão (VSAP)

É uma lâmpada de descarga de alta intensidade (HDI) controlada por um balastro. No seu interior uma mistura de sódio e mercúrio é vaporizada provocando um arco entre os elétrodos no tubo de descarga, permitindo a condução e consequente emissão de luz visível [3].

A tensão de arco existente na lâmpada aumenta entre 1 e 2 (V) por cada 1000 horas de funcionamento, devido à diminuição da pressão dos gases que compõem a mistura dentro do tubo de descarga. Este incremento é bastante relevante, uma vez que, aumentos de cerca de 10% no valor da tensão de arco implicam aumentos entre 20 e 25 % da potência [3].

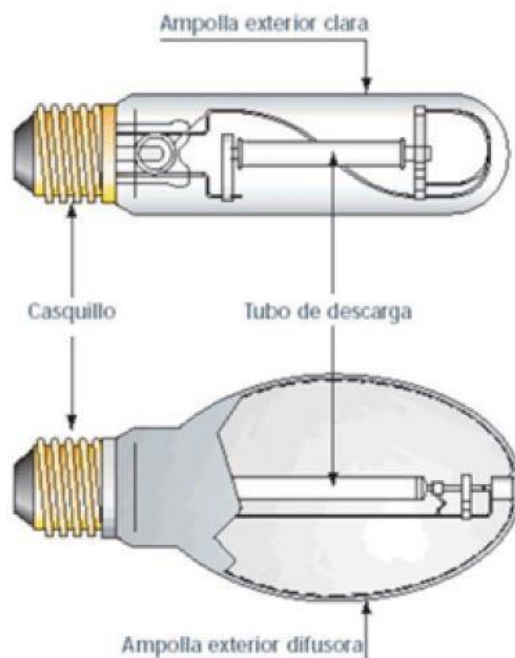


Figura 21 – Lâmpada de vapor de sódio [17]

Adicionalmente, terá mais dificuldades em arrancar com tensões de linha reduzidas. Demoram cerca de 10 minutos a atingir o seu fluxo luminoso máximo e têm um tempo de reacendimento de aproximadamente 1 minuto [3].

Tabela 3 – Características luminosas da lâmpada de vapor de sódio [3]

Temperatura de cor (K)	2600 - 3200
IRC	20 - 40
Eficácia (lm/W)	70 - 150
tempo de vida útil (h)	16000 - 28000

Devido a esta fonte luminosa ter como base de fabricação o mercúrio, saiu em decreto de lei (nº60/2022) uma restrição onde já não é permitido a sua comercialização e a sua instalação de lâmpadas que tenham por base o mercúrio, deste modo quando entram em fim de vida, terão de ser substituídas por uma tecnologia mais recente.

4.1.2 Iodetos metálicos

Este tipo de lâmpada é um aperfeiçoamento da lâmpada de vapor de mercúrio que, devido à presença de iodetos metálicos, possui um IRC e uma eficácia luminosa muito superior, no entanto, um tempo de vida um pouco menor [3].

Para a ignição deste tipo de lâmpadas de descarga é necessário um *ignitor* que produza picos de tensão elevados ($\leq 5\text{kV}$) [3].

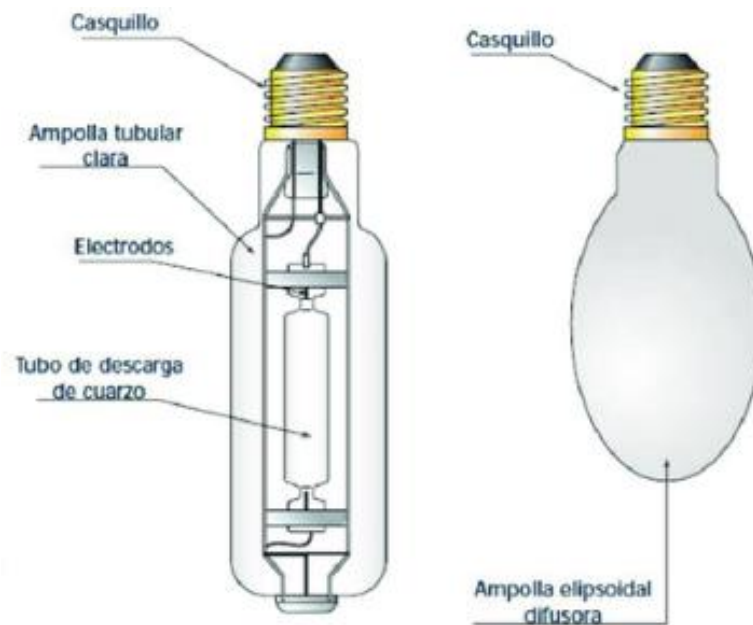


Figura 22 - Lâmpada de iodetos metálicos [22]

As lâmpadas de iodetos metálicos, tal como as de vapor de sódio, não produzem instantaneamente a máxima potência luminosa. Necessitam de um período de aquecimento, proporcional à sua potência, de vários minutos. O seu período de reacendimento é inclusivamente o maior das tecnologias descritas, com cerca de 15 minutos [3].

Tabela 4 - Características luminosas da lâmpada de iodetos metálicos [3]

Temperatura de cor (K)	3300 - 5500
IRC	80 - 90
Eficácia (lm/W)	65 - 120
tempo de vida útil (h)	12000 - 24000

4.1.3 LED

O díodo emissor de luz (LED) transforma a energia elétrica em luz num cristal de semicondutor. Esta transformação é diferente da encontrada em lâmpadas convencionais, pois nos LED's ela é efetuada dentro da matéria sólida [3].

Daí que também seja denominada iluminação de estado sólido (SSL) [3].



Figura 23 – Esquemático de uma lâmpada LED [18]

A cor do LED irá depender do material semicondutor utilizado. Este, possui uma largura de banda proibida específica, (diferença de energia entre as bandas), que determinará o comprimento de onda do fóton emitido aquando da combinação do par eletrão-lacuna no semicondutor. Este fóton será visível se o comprimento de onda estiver na zona do espectro visível [3].

Um dos desafios da tecnologia LED foi a criação de luz branca. Os dois métodos mais usados são:

- Juntar a um LED, com comprimento de onda no azul ou ultravioleta, camadas de fósforo. Ao serem excitadas produzirão luz vermelha, amarela, verde e azul (RYGB) [3];
- Combinar vários LED, de modo que a combinação de cores RYGB por eles emitida produza a cor branca [3].

O funcionamento do LED só é possível através de uma fonte de alimentação especial, o *driver*, que irá converter a tensão alternada da rede em tensão contínua. Para além do rendimento e a qualidade da eletrónica associada ao LED, o seu desempenho também dependerá da temperatura. Quer o fluxo luminoso, quer o tempo de vida diminuirão com temperaturas mais elevadas a que o LED esteja sujeito [3].

As vantagens desta tecnologia são inúmeras. O fluxo direcionado é extremamente útil em iluminação pública, diminuindo a poluição luminosa e aumentando a eficiência da instalação da iluminação pública. O seu tempo de vida e eficácia luminosa são, de longe, os mais elevados. O seu tempo de vida e eficácia luminosa são, de longe, os mais elevados [3].

Tabela 5 - Características luminosas da lâmpada LED [3]

Temperatura de cor (K)	2700 - 10000
IRC	80 - 90
Eficácia (lm/W)	90 - 180
tempo de vida útil (h)	25000 - 100000

4.2 Componentes de luminárias

As lâmpadas de descarga (vapor de sódio, iodetos metálicos, etc.) e as lâmpadas de estado sólido (LED) não podem ser ligadas diretamente à rede [3].

As lâmpadas de descarga possuem impedância negativa, ou seja, tendem a absorver mais corrente do que aquela que é necessária ao seu bom funcionamento. Sem um equipamento em série com esta impedância negativa, a lâmpada autodestruir-se-ia rapidamente [3].

As lâmpadas de estado sólido também necessitam de interfaces com a rede elétrica, designados para este tipo de tecnologia como *driver* [3].

É por isso necessário existir um conjunto de componentes a instalar na luminária, tais como os descritos nos subcapítulos seguintes [3].

4.2.1 Condensador

É normalmente colocado em paralelo no circuito do balastro e tem a função de aumentar o fator de potência, que tipicamente é muito baixo (0,4 – 0,5), compensando a energia reativa absorvida pela indutância do balastro [3].

4.2.2 Ignitor

Componente que, para além de assegurar o pré-aquecimento dos elétrodos da lâmpada, irá gerar impulsos de tensão de modo a proporcionar o início da descarga da lâmpada. Se houver algum problema com a lâmpada ou com o circuito, esta ação será repetida ciclicamente até que a lâmpada se acenda [3].

Este fenómeno, conhecido como “*ballast cycling*”, poderá ter origem em:

- Funcionamento com tipos de lâmpadas impróprios;
- Lâmpadas em fim de vida;
- Tensão de alimentação incorreta;
- Elevada temperatura envolvente;
- Fase inicial de falhas do balastro.

Uma forma de evitar esta condição cíclica de *on-off* indesejável é a integração, no balastro, de um sistema de controlo que consegue detetar o fim de vida da lâmpada, interrompendo a ação do *ignitor* [3].

4.2.3 Drivers de LED

Entende-se por *driver* de LED todo o circuito controlador dos LED. Tem como função efetuar a conversão da energia elétrica da rede, em tensão contínua, de forma a alimentar todos os componentes eletrónicos da luminária de LED e controlar a corrente fornecida nos vários modos de funcionamento dos mesmos. Adicionalmente, alguns *drivers* permitem ainda efetuar a RFL nos LED, controlar as comunicações [3].

Existem dois tipos de *drivers* de LED:

- Corrente constante, alimentam LED que necessitam de uma corrente de saída fixa e de uma gama de tensões de saída;
- Tensão constante, alimentam LED que necessitam de uma tensão de saída fixa com uma corrente de saída máxima [3].

O rendimento dos *drivers* pode variar desde 74% até ao valor máximo possível na prática de 95%. A maioria dos *drivers* apresenta um rendimento na casa dos 80-90%, sendo que a maior parte das suas perdas verifica-se nos semicondutores de potência, cujo desempenho tem vindo a melhorar [3].

Em termos de durabilidade, qualquer *driver* de LED atual para iluminação pública deve ter o objetivo de ter um tempo de vida de pelo menos 50 000 a 65 000 horas, de modo a corresponder com o tempo de vida atual do LED [3].

O tempo de vida do *driver* depende da temperatura máxima de funcionamento. Quanto mais elevada for a temperatura de funcionamento menor será o tempo de vida dos componentes críticos. *Drivers* mais eficientes e com menores perdas são assim mais fiáveis, devido à sua menor temperatura de funcionamento [3].

4.3 Sistemas de controlo e gestão

Os sistemas de controlo são dispositivos que regulam a operação do sistema de iluminação em resposta a um sinal externo. Estes sistemas automáticos permitem otimizar a utilização das instalações iluminação pública, resultando normalmente em economias de energia significativas, sem prejuízo dos níveis de conforto e segurança visual necessários em cada local e/ou atividade [3].

Nos sistemas de iluminação pública é importante saber em que situação o nível de iluminação ambiental é insuficiente para ativar as luzes. Este controlo não pode ser efetuado de forma totalmente eficaz utilizando temporizadores, uma vez que, em dias de chuva ou nevoeiro intenso, pode ser necessário ativar o sistema de iluminação por razões de segurança. Além disso, o horário do próprio nascer e pôr-do-sol não é constante. Por esta razão é necessário, cada vez mais, adotar soluções mais eficientes no sistema de controlo [3].

4.3.1 Relógio Astronómico

O relógio astronómico é uma solução de comando *on-off* cujo horário de funcionamento encontra-se enquadrado na variação do ciclo solar ao longo do ano como ilustrado na figura 24 [3].

Estes equipamentos são programadores eletrónico-digitais utilizados para o controlo automático de ligações e cortes de iluminação pública em função do pôr e nascer do sol, respetivamente [3].



Figura 24 - Variação das estações do ano no hemisfério norte [14]

A vantagem de um relógio astronómico em relação a um sistema interruptor horário antigo é que adapta o controlo da rede de iluminação pública ao horário respeitante à altura do ano, ou seja, ao passo que no sistema antigo, caso não se fizesse um ajuste manual do relógio, a iluminação pública ligava e desligava sempre à mesma hora programada. Com o relógio astronómico a ação *on-off* será determinada pelas suas coordenadas geográficas e o período noturno, que varia ao longo do ano. Por exemplo, o sinal transmitido para acender a iluminação pública será emitido mais cedo no Inverno do que no Verão, sem qualquer tipo de intervenção humana. Permite, ainda, aplicar *offsets* e interrupções dos circuitos de iluminação pública em períodos definidos como indicado na figura seguinte [3].

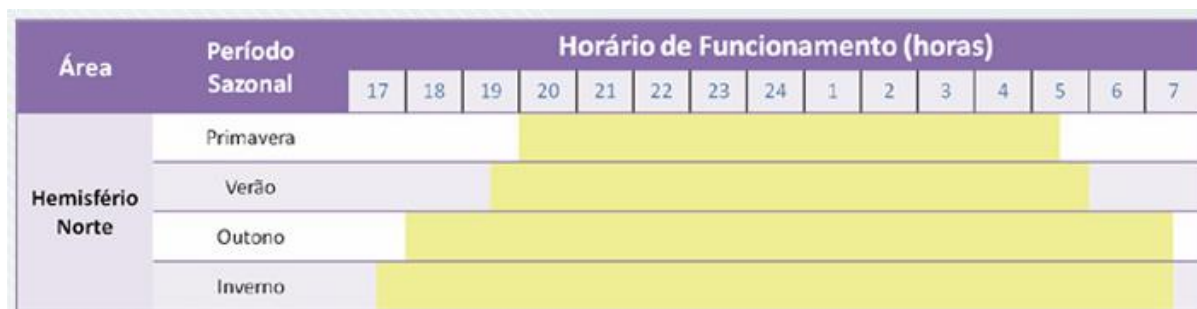


Figura 25 – Horário de funcionamento de um relógio astronómico [3]

O relógio astronómico tem as seguintes características de funcionamento:

- Cálculo diário, para as ações ligar/desligar, considerando a latitude e longitude, em graus e minutos, do local onde se encontra;
- Válido para qualquer região geográfica de qualquer hemisfério, tendo apenas de o programar previamente;
- Alteração automática do horário de inverno e verão;
- Possibilidade de outro tipo de programação que não a programação astronómica;
- Possibilidade de inclusão no ciclo de funcionamento astronómico de uma programação diferente para dias festivos e feriados [3].

Tal como os sensores crepusculares, o relógio astronómico poderá funcionar como sistema de controlo da rede de iluminação pública isolado, ou então poderá ser um equipamento auxiliar aos reguladores de fluxo e/ou sistemas de telegestão [3].

4.3.2 Tecnologias de regulação de fluxo

A regulação de fluxo pode ser efetuada através de reguladores instalados à cabeceira do circuito iluminação pública, ou por balastros eletrónicos instalados na própria luminária. Ambos podem ou não estar associados a um sistema de telegestão. O processo pode ser efetuado através da regulação por tensão, por corrente, ou variação da frequência [3].

Um regulador de fluxo é um equipamento previsto para controlar o processo de arranque, estabilização e redução do consumo da potência instalada, referente a uma instalação de iluminação. Inicia o seu ciclo após a aplicação de uma “ordem” com

origem local ou remota, aumentando gradualmente a tensão até atingir o valor pré-estabelecido de funcionamento [3].

Quando esse nível de tensão não for necessário, o regulador baixa a tensão de alimentação das lâmpadas. As transições entre as várias condições de operação devem ser lentas, para que a alteração do nível de iluminação se torne impercetível ao utilizador, a figura 26 demonstra estes conceitos [3].



Figura 26 - Gráfico de funcionamento de um regulador de fluxo [3]

Aplicando às lâmpadas uma tensão inferior (verde) à nominal de funcionamento (vermelho), a corrente é reduzida, originando a diminuição da potência absorvida pela rede de iluminação pública. A programação da regulação do fluxo deverá ser feita consoante a época do ano e a área onde o sistema de iluminação está instalado. Praticamente todas as lâmpadas de descarga utilizadas em iluminação pública podem

Tabela 6 - Tensão mínima para lâmpadas [3]

Tipo de lâmpada	Tensão mínima (V)
Iodetos metálicos	183
Vapor de sódio	183

ser reguladas, variando a tensão de alimentação, sem que isso interfira com as suas propriedades e características. No entanto, existe um valor mínimo abaixo do qual a lâmpada não irá funcionar da melhor forma, ou mesmo ligar [3].

Portanto, existem alguns aspetos que deverão ser considerados. A maioria dos sistemas de regulação de fluxo à cabeceira trabalha com o controlo da tensão. Assim, em circuitos com mais de um tipo de lâmpadas e com grandes probabilidades de

terem diferentes horas de serviço, o resultado em cada lâmpada dessa regulação pode ser diferente. Adicionalmente, para postos de transformação que controlem menos do que 50 luminárias, a utilização de reguladores de fluxo torna-se economicamente pouco atrativa [3].

Outra questão importante é a extensão da rede de iluminação pública. Se a regulação é feita à cabeceira e não ponto a ponto, a diferença de potencial no início da linha e no final poderá ser consideravelmente diferente, ou seja, as lâmpadas que realmente tiverem a tensão mínima admissível aos seus terminais permanecerão ligadas, ao passo que as outras apagar-se-ão. Em caso de falha na rede, algumas lâmpadas poderão não ter, inclusive, um valor de tensão de ignição suficiente para o seu reacendimento [3].

Por fim, os reguladores de fluxo são aparelhos cujas regulações da variação de tensão são realizadas através de equipamento de eletrónica de potência. Logo, à redução dos custos de manutenção, devido ao aumento do tempo de vida da lâmpada, contrapor-se-á a manutenção destes equipamentos ativos no circuito [3].

Os reguladores de fluxo, para além de variarem a intensidade luminosa, estabilizam também o nível de tensão entre $\pm 1\%$ do valor de funcionamento definido. Assim, para além de aumentar o tempo de vida da lâmpada, asseguram economias diretas no consumo ao fazer o corte da tensão excessiva, quando é excedido o seu valor nominal. Adicionalmente, a depreciação do fluxo luminoso, durante o tempo de vida da fonte de luz, é menor, no entanto, para que isso esteja garantido, é necessário um acompanhamento rigoroso das parametrizações do regulador de fluxo, de modo a assegurar a tensão mínima de funcionamento nas lâmpadas durante todo o tempo de vida do regulador [3].

4.4 Sistemas de telegestão

Um sistema de telegestão permite alavancar a utilização racional de energia, melhorando o balanço entre a segurança e o conforto. É possível dar um salto qualitativo na área da iluminação pública, com a implementação de sistemas de telegestão de controlo adaptativo e monitorização [3].

Para além de baixar custos de manutenção, permite:

- Uma rede de iluminação pública mais eficiente capaz de se adaptar às necessidades de cada momento;
- Adaptar o fluxo luminoso em função da iluminação ambiente;
- Controlar o tempo de vida dos pontos de luz e localizar eventuais falhas [3].

A arquitetura de referência do sistema de telegestão é constituída pelos seguintes componentes [3]:

- Controlador de luminária, o aparelho que faz o controlo do balastro/driver programável da fonte de luz e de todos os sensores existentes na luminária, proporcionando um sistema de iluminação dinâmico;
- Controlador de segmento, canal de comunicação das luminárias;
- Sistema de gestão central, controla os vários segmentos do sistema de iluminação pública, gerindo a informação transmitida pelos controladores [3].

Na Figura 27 está descrita a arquitetura tipo para as luminárias com capacidade de comunicar diretamente com o sistema de gestão central. Na Figura 28 está descrita a arquitetura tipo para sistemas em que as luminárias não possuam capacidade de comunicar diretamente com o sistema de gestão central, havendo necessidade de utilizar um controlador de segmento. Tipicamente nesta arquitetura é usual a concentração de luminárias [3].

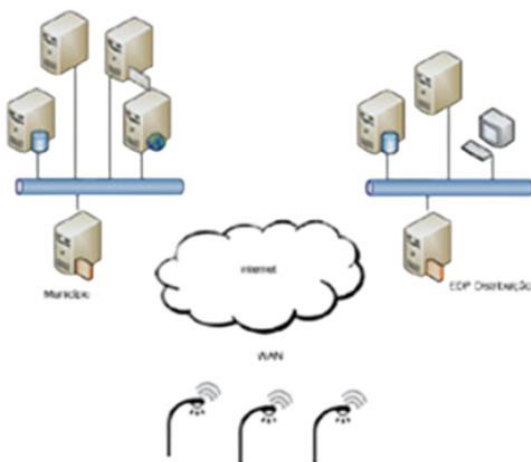


Figura 27 - Componentes de um sistema de telegestão sem CS [3]

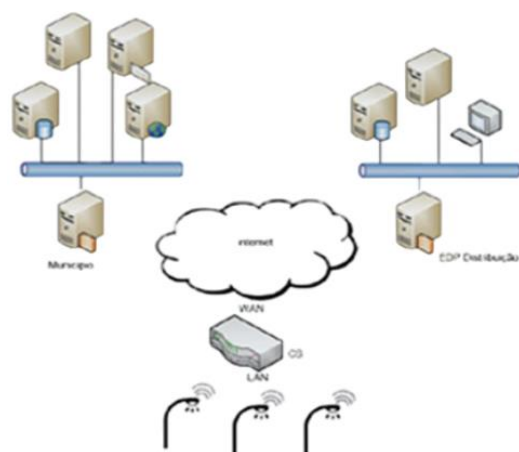


Figura 28 - Componentes de um sistema de telegestão com CS [3]

5. CONCEITOS DE PASSAGENS PARA PEÕES

As passagens para peões, constituem infraestruturas fundamentais, na medida em que permitem a continuidade e promovem a segurança dos percursos pedonais. No entanto, constituem áreas de conflito entre os peões e o tráfego motorizado, pelo que a localização das mesmas deve assegurar o equilíbrio entre o modo pedonal e o rodoviário, proporcionando segurança e funcionalidade. Importa referir que muitos peões podem optar por caminhos mais curtos, ainda que menos seguros, sempre que a utilização de passagens para peões os obrigar a percorrer um percurso demasiado longo [4].

A implantação ou adaptação de uma passagem para peões deve ser antecedida de uma ponderação que considere a necessidade ou as vantagens das seguintes ações [4]:

- Reconfigurar a passagem para peões, se esta já existir, de forma a estarem asseguradas condições de acessibilidade e segurança;
- Substituir a passagem para peões pela continuidade do passeio;
- Efetuar arranjos ou melhoramentos complementares na passagem para peões ou na sua envolvente [4].

A reconfiguração da passagem para peões acima descrita pode envolver a sua realocação, a sua reorientação, o seu redimensionamento e fasear o seu atravessamento por parte dos peões se necessário através da implementação de refúgios [4].

A ausência de rebaixamento para a passagem para peões dificulta a acessibilidade a esta, especialmente a peões com mobilidade condicionada, podendo configurar uma barreira intransponível. A boa prática recomenda que o passeio esteja devidamente nivelado com a rodovia, de modo que a deslocação se proceda de forma confortável, segura e sem ressalto abrangendo toda a largura da passagem para peões e implantado ao longo de todo o atravessamento, incluindo ambos os extremos da passagem para peões e, quando existam, as intersecções com separadores, ilhas e refúgios [4].

Para tal, é aconselhável a introdução de uma zona de rampa, imediatamente adjacente à passagem para peões. Por outro lado, o Decreto – Lei n.º 163/2006, de 8 de agosto, recomenda que seja executado o rebaixamento do lancil ao nível da

rodovia e que “a altura do lancil em toda a largura das passagens de peões não deve ser superior a 0,02 metros” [4].

Um rebaixamento incorretamente executado poderá funcionar como um degrau, o que dificultará a acessibilidade a peões. Quando o rebaixamento não acompanha toda a extensão da passagem para peões, a fluidez no acesso a toda a extensão da passadeira fica comprometida, diminuindo a sua capacidade [4].

As passagens para peões com rebaixamento dos passeios devem ter uma largura mínima de 4,0 metros, de forma a ser bem visível ao mesmo tempo que possibilita o atravessamento por um maior número de utentes, o lancil deve estar nivelado ao longo de toda a extensão da passagem do passeio para a passagem para peões [4].

A inclinação do rebaixamento do passeio para a passagem para peões depende da largura do passeio [4]. A figura seguinte demonstra as dimensões recomendadas para a passagem de peões.

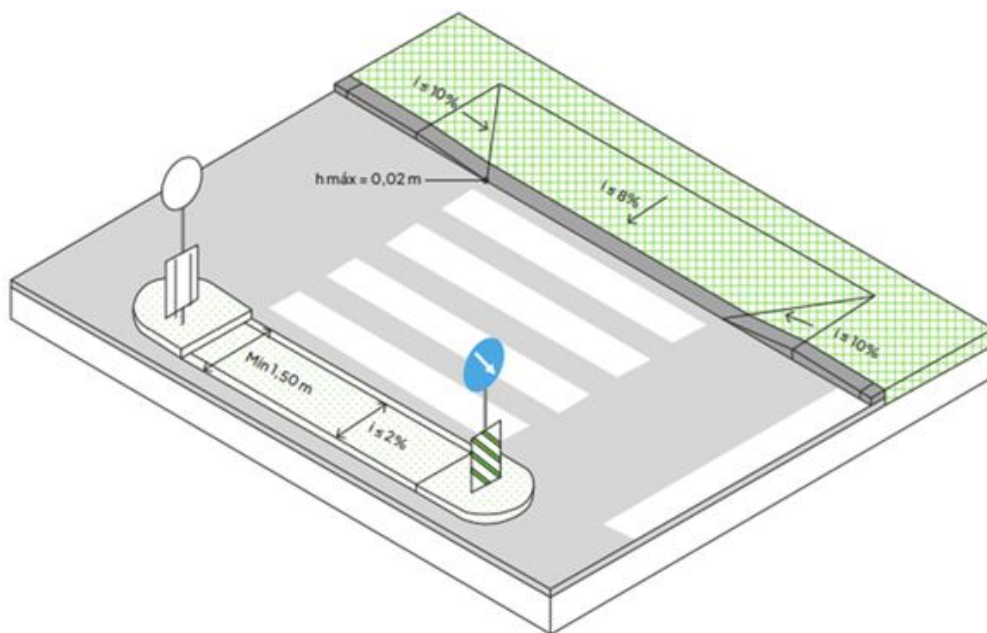


Figura 29 - Dimensões recomendáveis para a passagens para peões [4]

Assim, se a largura do passeio for igual ou superior a 2,00 m o rebaixamento deve ter uma inclinação inferior a 8% na direção da passagem para peões e 10% na direção do lancil do passeio ou caminho de peões, de forma a estabelecer uma concordância entre o nível do pavimento do passeio e o nível do pavimento da faixa de rodagem [4].

A sinalização do rebaixamento em pavimento tátil, constituído por uma linha em pavimento direcional articulada com uma faixa de pavimento de perigo, permite que os utentes com limitações visuais se apercebam da existência, localização exata e

largura total da passagem para peões [4].

Para tal aplica-se uma linha de encaminhamento, que permite ao peão detetar a presença da passagem e perceber a direção de atravessamento, no sentido transversal ao fluxo com uma largura compreendida entre 0,80 m e 1,20 m que encaminha o peão para a área rampeada de atravessamento da passagem para peões [4].

A linha de encaminhamento pode ser colocada em forma de “T” invertido, no caso de se tratar de uma passagem para peões sem sinalização luminosa, encaminhando assim o peão pela trajetória desejada, ou em forma de “L” no caso de se tratar de uma passagem com sinalização luminosa e, neste caso, encaminha o peão até ao semáforo para lhe permitir o uso da botoneira [4].

A área rampeada de aproximação à via deve ser pavimentada com pavimento de perigo com uma largura compreendida entre 0,80 m e 1,60 m e deve ser aplicada a toda a largura do rebaixamento de forma a indicar a dimensão transversal da passagem para peões [4].

Se a largura do passeio for inferior a 2,00 m, o rebaixamento deve ser efetuado a toda a sua largura, suavemente no sentido da marcha, impondo uma inclinação igual ou inferior a 5% na direção da circulação pedonal. A zona rebaixada deve ser à mesma cota da via como ilustrado na figura 30 [4].

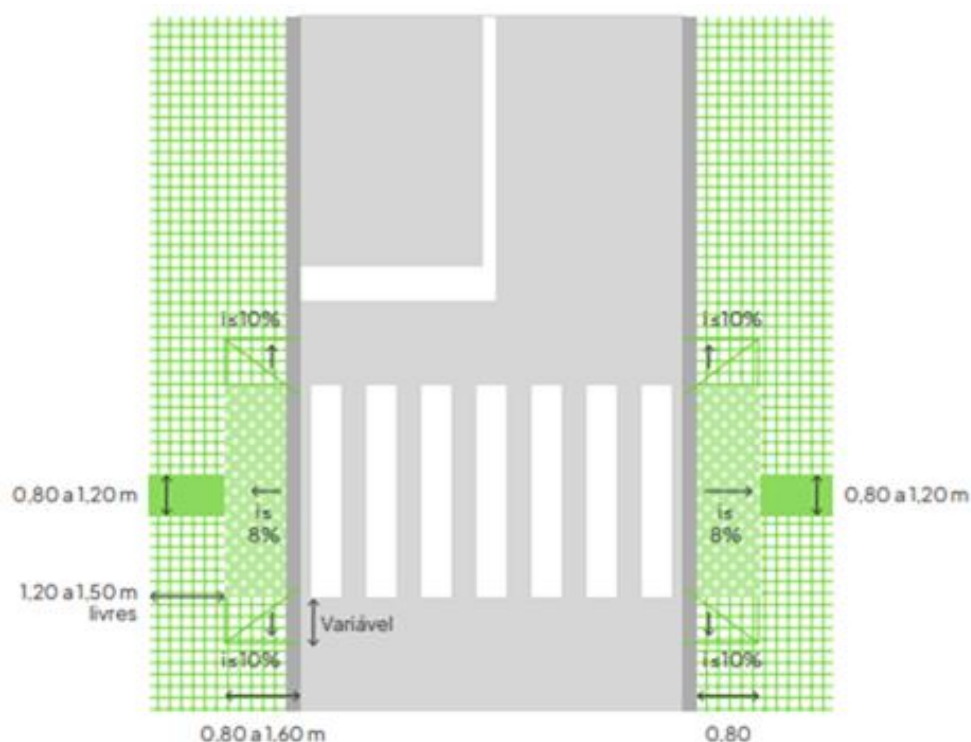


Figura 30 – Rebaixamento do passeio se a largura do mesmo for maior a 2 m [4]

Relativamente à sinalização para peões com limitações visuais, é aconselhável que a área de passeio rebaixada possua informação tátil de apoio ao atravessamento antes e depois da interceção com a passagem para peões [4].

A linha guia em piso direcional colocada em forma de “T” invertido deve ter uma largura que pode variar entre 0,80 m a 1,20 m, a indicar a existência e o eixo da passagem para peões ou, nas passagens de peões com sinalização luminosa, colocada em forma de “L” a indicar a localização dos semáforos. Esta faixa deve ser colocada apenas até 0,40 m do limite do passeio, preenchendo o restante com pavimento de perigo com pelo menos 0,80 m de largura, definindo a dimensão total da zona de atravessamento [4].

Existem, ainda, outros fatores determinantes para a acessibilidade e segurança das passagens para peões [4]:

- Visibilidade, as passagens para peões devem ser implementadas de forma a proporcionar ao peão e ao condutor boas condições de visibilidade;
- Iluminação, os elementos de iluminação pública devem destacar a passagem para peões do ambiente rodoviário e, simultaneamente, iluminar os peões, para que os condutores os consigam avistar;
- Para tal, os elementos de iluminação devem estar perto das passagens para peões, sem obstáculos que os encubram, tais como árvores ou painéis publicitários, iluminando os peões pelo lado de aproximação dos veículos;
- Pavimento, a superfície do pavimento na passagem para peões deve ser desempenada e proporcionar boa aderência. Assim, deve ser evitada a aplicação de paralelepípedos nas passagens para peões [4].

5.1 Regras aplicadas a travessia de passadeiras

As vias são partilhadas por peões, automobilistas, motociclistas e ciclistas. Para uma convivência pacífica, é importante saber os direitos e deveres de cada um. Só assim é possível partilhar o espaço e circular em segurança [4].

Os peões são os utentes das vias mais vulneráveis e desprotegidos e devem circular nos passeios ou passagens que lhes estão reservados. Caso não existam, podem utilizar as bermas da estrada. A faixa de rodagem só deve ser usada para ser atravessada nos locais indicados para o efeito ou caso o trânsito esteja proibido a veículos nessa mesma estrada [4].

5.1.1 Regras de travessia das estradas por peões

De acordo com o artigo 101.º do Código da Estrada, os peões “só podem atravessar a faixa de rodagem nas passagens especialmente sinalizadas para esse efeito ou, quando nenhuma exista, a uma distância inferior a 50 metros, perpendicularmente ao eixo da faixa de rodagem”. Caso estas regras não sejam cumpridas, o transeunte pode incorrer numa coima [4].

O atravessamento da faixa de rodagem em segurança - através das passadeiras para peões ou não - deve ser feito o mais rápido possível e sempre com a certificação de que estão reunidas as regras de segurança [4].

Quando não existe por perto a passagem apropriada para os peões, a atenção deve ser redobrada. No Guia do Peão, a ANSR aconselha a que este veja com precaução e se faça ver aos condutores, fazendo, sempre que possível, contacto visual com os mesmos, para ter a certeza de que é visto [4].

A lei não obriga os transeuntes a parar antes de atravessarem as passadeiras para peões, mas em muitos casos pode ser mais seguro e aconselhável. O Código da Estrada refere: “Os peões não podem atravessar a faixa de rodagem sem previamente se certificarem de que, tendo em conta a distância que os separa dos veículos que nela transitam e a respetiva velocidade, o podem fazer sem perigo.” [4]

5.1.2 Obrigações dos condutores

Sempre que um condutor se aproxima de passadeiras para peões deve reduzir, de imediato, a velocidade. Se estas passagens se encontrarem reguladas por sinalização luminosa que permita ao condutor avançar, este deve deixar passar os transeuntes ou velocípedes que já tenham iniciado a travessia da faixa de rodagem. Caso a passadeira não tenha qualquer sistema de regulação (semáforos ou agente), cabe ao condutor abrandar e, se necessário, parar, para deixar passar peões ou velocípedes que já tenham iniciado a travessia ou que a vão iniciar [4].

O artigo 103º do Código da Estrada indica que se forem infringidas estas regras, o condutor pode ser sancionado com uma coima [4].

6. CARACTERIZAÇÃO DA GESTÃO ENERGÉTICA

De acordo com o “Manual da Iluminação Pública” de outubro 2016 da EDP distribuição, são referenciados dispositivos como os relógios astronómicos e tecnologias de regulação de fluxo luminoso, que possibilitam a implementação de sistemas de gestão inteligentes. Neste contexto, apresenta-se uma proposta de gestão energética aplicada à iluminação pública, baseada no controlo do fluxo luminoso das luminárias.

O objetivo desta gestão é reduzir o consumo energético durante os períodos de menor utilização da via pública, contribuindo para uma maior eficiência e sustentabilidade do sistema.

6.1 Tecnologia

O avanço tecnológico tem permitido o desenvolvimento de equipamentos capazes de regular com precisão o fluxo luminoso das luminárias. Entre as tecnologias mais relevantes no controlo e gestão de sistemas de iluminação destaca-se o protocolo DALI.

6.1.1 DALI

Esta tecnologia corresponde a um protocolo padronizado utilizado para a comunicação digital entre dispositivos de iluminação, *dimmers* e sensores. Estabelecido pela norma IEC 62386, o DALI permite a criação de sistemas de controlo de iluminação robustos e flexíveis, essenciais para aplicações de iluminação modernas [5].

O DALI foi desenvolvido para ultrapassar as limitações dos sistemas analógicos de controlo de iluminação, e de precisão no controlo. Ao basear-se num protocolo digital, o DALI possibilita o comando e a monitorização individual de cada dispositivo de iluminação numa rede. Isto é alcançado através de comunicação bidirecional, permitindo que cada dispositivo envie e receba sinais. O sistema utiliza uma cablagem simples e de baixa tensão, normalmente constituída por um cabo de dois condutores, o que facilita a modernização de instalações existentes ou a implementação de novos sistemas [5].

Uma das principais características do protocolo DALI é a sua capacidade para endereçar até 64 dispositivos individuais numa única rede. Isso significa que cada luminária ou equipamento de controlo pode receber um endereço exclusivo, permitindo um comando específico sobre os respetivos parâmetros de funcionamento. Adicionalmente, o DALI permite o controlo de múltiplos grupos e a definição de cenários, possibilitando aos utilizadores criar configurações de iluminação predefinidas que podem ser ativadas com um único comando [5].

No contexto do *design* de iluminação contemporâneo, em que a eficiência energética, a flexibilidade e a facilidade de gestão assumem importância central, o DALI desempenha um papel fundamental. As principais razões para a crescente relevância do DALI nos sistemas de iluminação são as seguintes [5]:

- Eficiência energética, os sistemas DALI podem ser integrados com sensores e temporizadores para ajustar os níveis de iluminação com base na ocupação e na disponibilidade de luz natural, reduzindo o consumo energético e os custos operacionais [5];
- Flexibilidade, a capacidade de controlar luminárias individualmente e de criar cenários de iluminação dinâmicos torna o DALI adequado para diversos ambientes [5];
- Controlo preciso, o DALI permite regulação e comutação rigorosas, o que é essencial para criar condições de iluminação confortáveis e adaptáveis a diferentes necessidades [5];
- Manutenção simplificada, as funcionalidades de monitorização e diagnóstico são nativas do protocolo. Assim, a manutenção pode identificar e resolver problemas de forma rápida, minimizando tempos de interrupção [5].

Ao tirar partido das capacidades do DALI, os sistemas de iluminação podem atingir um nível elevado de sofisticação, assegurando o cumprimento das exigências dos utilizadores e das regulamentações vigentes. Tal torna o DALI uma ferramenta indispensável para soluções de iluminação modernas, impulsionando progressos significativos em eficiência energética, conforto do utilizador e desempenho global do sistema [5]. A figura seguinte exemplifica algumas aplicações em sistemas de iluminação.

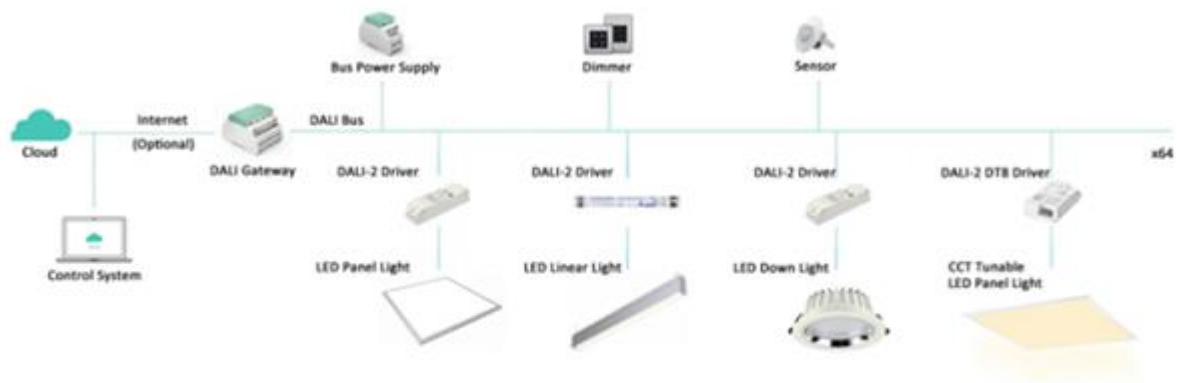


Figura 31 – Sistemas de iluminação DALI [5]

O protocolo DALI permite a comunicação digital entre dispositivos de iluminação no âmbito de uma rede definida pela norma IEC 62386. O DALI utiliza um barramento de dois fios para a transmissão de dados, com endereços exclusivos, possibilitando um controlo rigoroso. Este protocolo bidirecional permite que os dispositivos recebam comandos e enviem atualizações de estado, garantindo um sistema de iluminação eficiente e responsivo [5].

Um sistema típico DALI é constituído pelos seguintes elementos:

- Sistema de controlo, gere e envia comandos para os dispositivos da rede, desde *dimmers* simples até unidades programáveis avançadas [5];
- *Gateway* DALI, faz a interface entre o DALI e outros sistemas de automação, permitindo integração e controlo centralizado [5];
- Fonte de alimentação do barramento, unidade dedicada responsável pela alimentação do barramento DALI [5];
- Sensores, fornecem dados sobre ocupação e luz ambiente, permitindo ajustes de iluminação adaptativos [5];
- Equipamentos de controlo, controlam lâmpadas LED, ajustando a saída luminosa de acordo com os comandos recebidos [5];

- Luminárias, integram componentes compatíveis para controlo direto [5].

Numa rede DALI, os controladores transmitem comandos e os dispositivos respondem sempre que são endereçados. Os dispositivos enviam igualmente relatórios de estado aos controladores, permitindo monitorização e manutenção em tempo real. Esta comunicação utiliza pacotes de dados padronizados, garantindo interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes e tornando o DALI num sistema de controlo de iluminação robusto e flexível [5].

Um sistema DALI utiliza uma cablagem simples de dois fios, através da qual todos os dispositivos de controlo e equipamentos de iluminação são ligados em paralelo. Os dois condutores, que podem ser conectados sem preocupação com polaridade, transportam tanto os sinais de alimentação como os de comunicação. A ligação pode ser configurada segundo topologias de barramento, estrela, árvore ou linha, sendo importante evitar configurações em malha fechada. A figura seguinte ilustra os diferentes tipos de configuração [5].

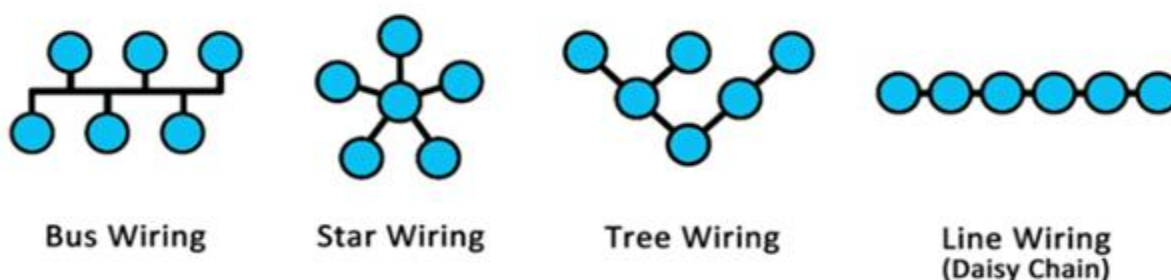


Figura 32 - Diagramas de configurações de rede DALI [5]

6.1.2 Sensor de movimento

A utilização de sensores de movimento é essencial para o correto funcionamento do sistema, uma vez que este assenta fortemente na deteção de presença para controlar a iluminação pública. Estes sensores deverão ser instalados nas luminárias, de modo a detetar a aproximação ou presença de peões na via. Na figura 33 ilustra um exemplo de instalação do sensor na luminária.

Os sensores de movimento deverão cumprir, no mínimo, os seguintes requisitos:

- Índice de proteção igual ou superior a IP54;
- Alcance de 10 metros, garantindo uma deteção eficaz;
- Imunidade a intempéries, evitando interferências causadas por chuva, vento, poeiras ou variações de temperatura.

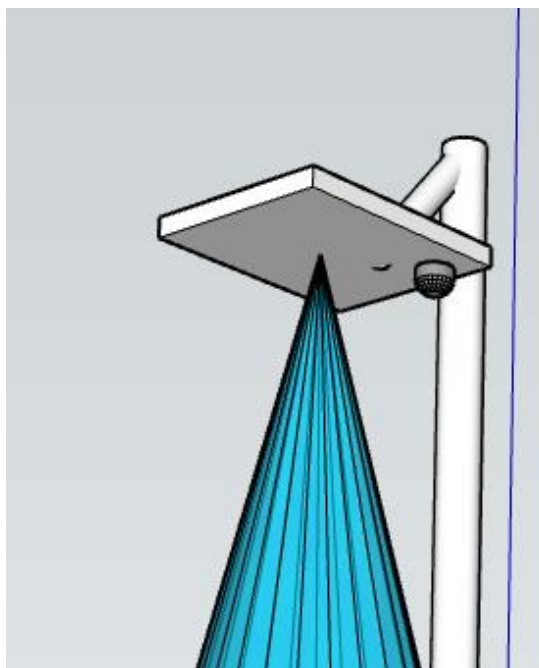


Figura 33 – Exemplo de instalação do sensor de movimento

6.1.3 Sensor crepuscular

Um sensor crepuscular é um dispositivo que mede os níveis de luminosidade ambiente e aciona cargas elétricas quando a intensidade luminosa exterior desce abaixo (ou sobe acima) de um determinado limiar. Por norma, os sensores crepusculares possuem apenas uma saída destinada a ligar ou desligar um circuito de iluminação. Contudo, em aplicações mais avançadas, especialmente em sistemas LED, podem incluir duas saídas independentes, permitindo o controlo da temperatura de cor em função da quantidade de luz natural disponível.

Este tipo de configuração é utilizado em espaços exteriores ou interiores onde se pretende adaptar a tonalidade da iluminação artificial à iluminação natural, promovendo maior conforto visual, eficiência energética e coerência cromática ao longo do dia.

6.1.4 Lâmpadas de variação de fluxo e temperatura da cor

As luminárias com capacidade de variação de fluxo luminoso e temperatura de cor permitem ajustar a iluminação em função das condições ambientais. Este conceito é conhecido como *Tunable White*, também designado por CCT Dinâmico ou *Correlated Color Temperature Variable*, constituindo uma evolução significativa da tecnologia LED.

O conceito *Tunable White*, consiste no ajuste dinâmico da temperatura de cor da luz branca, podendo variar entre:

- Branco quente: 2700 K – 3500 K;
- Branco frio: 5000 K – 7000 K.

Para obter esta funcionalidade, a luminária integra dois conjuntos de LED's:

- LEDs *Warm White* (WW) – 2700 K a 3500 K;
- LEDs *Cool White* (CW) – 5000 K a 7000 K.

Através da utilização de um módulo LED CCT, um *driver* CCT e um controlador, é possível regular eletronicamente a intensidade relativa de cada conjunto de LED's, criando qualquer tom de branco intermédio.

Este tipo de controlo contribui significativamente para o conforto visual:

- No início da noite e ao amanhecer, recomenda-se a utilização de valores mais quentes (≈ 4000 K);
- Durante o período noturno, para reforçar a visibilidade e a sensação de segurança, podem ser utilizados valores mais frios (≈ 7000 K).

6.1.5 Dimmer

Um *dimmer* é um dispositivo eletrónico utilizado para ajustar a intensidade luminosa de luminárias, através da alteração controlada da potência ou do sinal de comando enviado ao equipamento de iluminação. A sua função principal é permitir a

regulação contínua ou por níveis da luminosidade, adequando-a às necessidades da instalação ou do utilizador [21].

Em sistemas de iluminação modernos, sobretudo com tecnologia LED, os *dimmers* podem operar por meio de diferentes métodos de controlo, tais como:

- Sinal analógico 0–10 V ou 1–10 V, o *dimmer* fornece uma tensão proporcional que o *driver* LED interpreta para definir o nível de luminosidade [21];
- Controlo digital, baseado em protocolos como DALI;
- Controlo por corte de fase, utilizado em luminárias compatíveis com regulação por variação da forma de onda de corrente alternada.

O uso de um *dimmer* permite benefícios como poupança energética, aumento da vida útil dos equipamentos de iluminação e melhoria do conforto visual, possibilitando criar diferentes cenários ou níveis de luminosidade conforme a aplicação.

6.1.6 Driver LED

Um *driver LED* é um dispositivo eletrónico responsável por alimentar e controlar adequadamente os díodos emissores de luz. Como os LED's são componentes semicondutores sensíveis a variações de corrente, não podem ser ligados diretamente a uma fonte de alimentação convencional. O *driver* LED atua, como um regulador, garantindo que o LED receba a corrente e a tensão corretas para funcionar de forma segura, eficiente e com maior durabilidade [19].

Do ponto de vista funcional, o *driver* LED possui dois papéis fundamentais:

1. Regulação de corrente, a função de um *driver* é fornecer corrente constante aos LED's. O *driver* estabiliza a corrente, compensando flutuações provenientes da rede elétrica.
2. Conversão de tensão, converte a corrente alternada em corrente contínua e ajusta o nível de tensão para o valor adequado, garantindo compatibilidade entre a fonte e o LED.

Alguns *drivers* também oferecem funcionalidades adicionais, como controlo de intensidade luminosa, comunicação digital e gestão térmica, permitindo maior eficiência energética e integração em sistemas inteligentes de iluminação.

6.1.7 Modulo de comunicação

Um módulo de comunicação *wi-fi* para luminárias é um dispositivo eletrónico integrado no sistema de iluminação pública ou privada, cujo objetivo principal é permitir a comunicação sem fios entre cada luminária e um sistema central de gestão, como um PLC, servidor de controlo ou plataforma de supervisão.

Estes módulos atuam como interface entre o protocolo de comunicação digital proveniente da infraestrutura de controlo e os sinais elétricos destinados ao *driver* LED da luminária. Estes comandos são convertidos em sinais adequados ao *driver*, tipicamente através de interfaces analógicas 0–10 V, ou através de protocolos digitais como DALI.

Para além da função de receção e execução de comandos, estes módulos desempenham um papel relevante no âmbito da monitorização, onde são capazes de enviar informações sobre o estado da luminária, como consumos elétricos, horas de funcionamento, temperatura de operação, falhas no *driver* ou na fonte luminosa, e eventuais incidências na comunicação. Com esta informação a ser recebida na supervisão, é possível implementar estratégias de manutenção preditiva e a otimização do desempenho global da rede de iluminação.

6.2 Criação supervisão

A implementação do sistema permite criar uma plataforma de supervisão dedicada, garantindo o seu correto funcionamento através dos sinais e dados recolhidos pelos diversos sensores. Esta supervisão pode ainda incluir:

- Detecção de avarias, permitindo intervenções rápidas;
- Menu de análise de poupança energética, com registo histórico;
- Informação sobre padrões de presença, que pode ser útil para apoio às forças de segurança durante o período noturno.

Sendo que este sistema deteta a presença de pessoas na via pública, esta supervisão deverá ser controlada pelas forças de segurança pública, que têm valências legais para o controlo de massas, garantindo assim a privacidade dos pedestres. Deverão ter o apoio de operadores municipais, para a manutenção e monitorização do sistema.

7. CARACTERIZAÇÃO DAS PASSADEIRAS INTELIGENTES

Com o objetivo de reduzir a sinistralidade associada à falta de visibilidade e de informação aos condutores, nomeadamente nas áreas de travessia de peões, propõe-se o desenvolvimento de um sistema inteligente de deteção de aproximação e aviso visual. O objetivo é alertar os condutores para a presença de peões, aumentando a segurança nas passadeiras.

7.1 Tecnologia

Com os avanços tecnológicos, existe atualmente uma grande diversidade de sensores capazes de detetar objetos e movimentos com elevada precisão. Este progresso permite desenvolver novas metodologias de controlo aplicadas à segurança rodoviária, melhorando significativamente as condições do meio envolvente.

7.1.1 Sensor

Para esta aplicação propõe-se a utilização de sensores de radar seguro, uma vez que estes criam uma área de deteção abrangente e são projetados para funcionar em ambientes adversos. Estes sensores apresentam elevada resistência a fatores externos como poeiras, chuva, luminosidade intensa ou sujidade, garantindo uma deteção fiável.

O sensor deverá ser instalado num pilar localizado no centro da passadeira, de forma a maximizar a eficácia da sua área de deteção. Uma limitação a considerar é a presença de uma banda morta de 20°, o que pode requerer a instalação de barreiras físicas de encaminhamento, garantindo que os peões entram pela zona de deteção ativa. A figura 34 mostra um exemplo de instalação do sensor em um pilar centrado na passadeira, e a figura 35 ilustra a zona de ação do sensor.

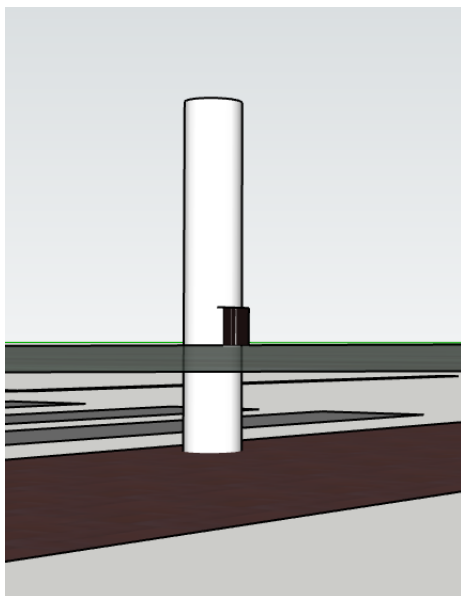


Figura 34 – Suporte para sensor

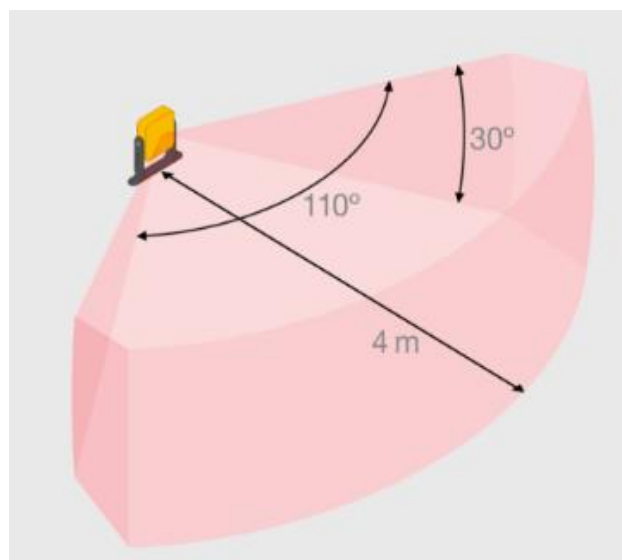


Figura 35 – Ângulo medição do sensor [20]

7.1.2 Iluminação

Idealmente, todas as passareiras deveriam dispor de iluminação dedicada, garantindo a máxima visibilidade para peões e condutores. Neste sistema é proposto uma metodologia de sinalização luminosa que consiste em LED's embutidos ao longo da passareira, que alertam os condutores através de luz intermitente sempre que o sensor deteta presença na área de aproximação à passareira.

A cor amarela dos LED's é propositadamente selecionada para transmitir aviso e diferenciar-se do vermelho utilizado no Código da Estrada para sinalizar paragem. A figura 36 exemplifica uma instalação das luzes de aviso na via em paralelo com a passareira.

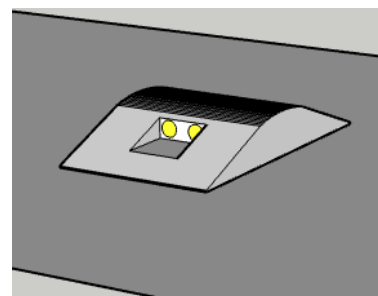
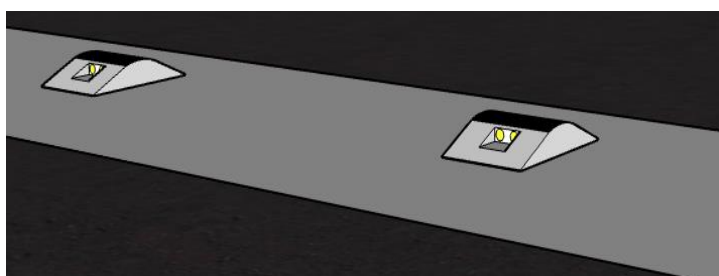


Figura 36 – Exemplo de instalação dos LED's de aviso para as passareiras

7.2 Sistema a implementar

O sistema funcionará com base num sensor de área colocado no centro da passadeira, um em cada extremidade, montado num suporte com altura mínima de um metro, garantindo visibilidade e utilidade até para cidadãos com limitações visuais. A figura 37 ilustra a proposta do sistema numa visão mais afastada onde se verifica a iluminação no paralelo da passadeira, a área de atuação do sensor e a iluminação dedicada.

Quando o sensor detetar a aproximação de um peão, os LED's de alerta instalados junto à passadeira acendem de forma intermitente com a frequência de 1 Hz, alertando os condutores.

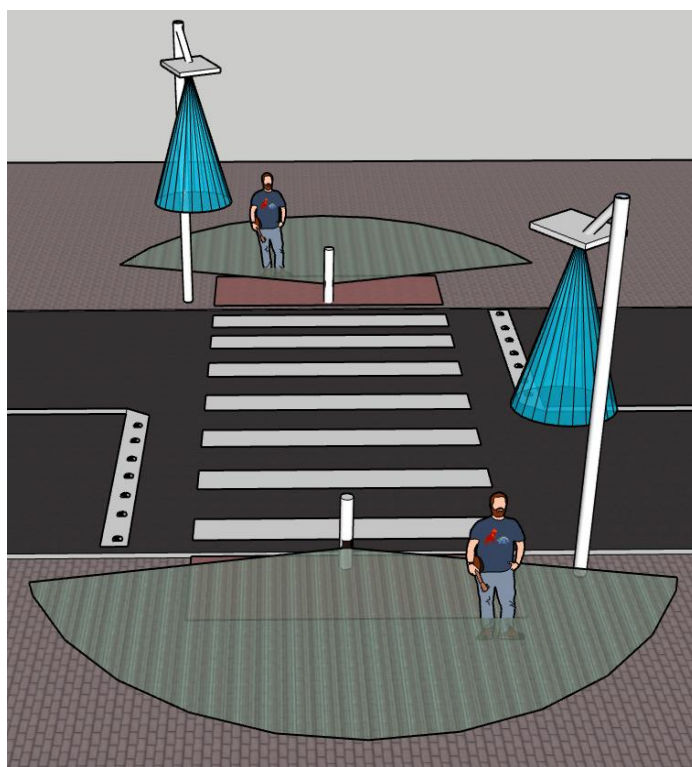


Figura 37 – Exemplo de passadeira com sensores

O sistema manter-se-á ativo durante aproximadamente 40 segundos, tempo estimado para a travessia segura, este tempo terá de ser ajustado e validado na implementação devido a passadeiras de diferentes dimensões. Caso não sejam detetadas novas presenças após este período, o sistema regressa ao modo *Standby*.

Com a aplicação deste sistema e considerando que grande parte dos acidentes ocorre devido à falta de visibilidade ou de aviso oportuno, pode estimar-se uma redução potencial até 50% nos incidentes em passadeiras.

8. ESTUDO PRÁTICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar um estudo prático assente na simulação aplicado a uma parte da cidade de Setúbal. A implementação foi realizada com base num autómato programável (PLC), permitindo reproduzir o funcionamento conceptual da solução desenvolvida.

Para a concretização desta simulação, tornou-se necessária a utilização de ferramentas de software dedicadas do PLC da marca *Omron*, nomeadamente o *CX-Programmer*, utilizado para o desenvolvimento da lógica de controlo em linguagem *Ladder*, e o *CX-Supervisor*, destinado à criação da interface de supervisão e monitorização do sistema. Será apresentado nos anexos 1 e 2, exemplos de programação com ilustração do código desenvolvido, e no anexo 3 representação da supervisão.

8.1 Caracterização da Cidade de Setúbal

O concelho de Setúbal encontra-se cerca de 50 km a sul de Lisboa, e integra a Área Metropolitana de Lisboa. Possui uma área de 230,33 km², sendo limitado por [16]:

- Oeste – Município de Sesimbra;
- Noroeste – Município do Barreiro;
- Norte e Leste – Município de Palmela;
- Sul – Estuário do Sado.

Administrativamente, o concelho está dividido em cinco freguesias:

S. Sebastião, Sado, Azeitão, União das Freguesias de Gambia, Pontes e Alto da Guerra, e União das Freguesias de S. Julião, N^a Sra. da Anunciada e Santa Maria da Graça, sendo nesta última que se insere o estudo prático.

Segundo os Censos de 2021, Setúbal tinha 123 519 habitantes, correspondendo a uma densidade populacional de 536 habitantes/km².

A Câmara Municipal de Setúbal informou que o concelho possui aproximadamente 25 060 luminárias, com tecnologia variada (vapor de sódio de alta pressão, iodetos metálicos e LED).

8.2 Arquitetura da solução

A arquitetura da solução foi implementada na área da União das Freguesias de S. Julião, Nossa Senhora da Anunciada e Santa Maria da Graça, incidindo especificamente sobre o Bairro do Liceu, com especial foco na Avenida de Moçambique. Esta zona caracteriza-se por uma elevada circulação pedonal e automóvel, tornando-se um local adequado para desenvolver a simulação do sistema proposto.

Para suportar o modelo, foi realizado um levantamento presencial de todas as luminárias existentes no percurso definido, contabilizando-se cada ponto de luz, bem como as passadeiras incluídas na área de estudo. Esta recolha de dados no terreno garantiu a precisão necessária para o desenvolvimento da simulação.

O levantamento resultou na seguinte caracterização da infraestrutura luminosa:

Número de luminárias por via:

- 27 na Av. de Moçambique;
- 10 na Rua de Cabo Verde;
- 5 na Praceta Quinta do Paraíso;
- 2 na Rua de Goa;
- 2 na Praceta de Diu;
- 3 na Praceta de Olivença;
- 12 na Rua Cidade Debrecen;
- 2 na Praceta dos Açores;
- 5 na Praceta Ilha da Madeira;
- 6 na Rua de Nova Lisboa;
- 7 na Rua Cidade da Beira;
- 5 na Rua Club Setubalense;
- 5 na Rua de São Tomé e Príncipe;
- 4 na Rua de Badajoz;
- 6 na Rua José Gregório;
- 9 na Rua “desconhecida” (sem nome atribuído, junto à Escola do Bocage);
- 22 na Av. Dr. António Rodrigues Manito.

Número de passadeiras por via:

- 4 na Av. de Moçambique;
- 2 na Rua de Goa;
- 1 na Rua Nova de Lisboa;
- 1 na Rua Cidade da Beira;
- 1 na Rua Club Setubalense;
- 1 na Rua Cidade Debrecen;
- 2 na Rua de Cabo Verde;
- 1 na Praceta de Olivença.

A arquitetura da solução funciona com base de dois sensores instalados na própria luminária, em que um é o sensor crepuscular, que inicia o funcionamento da iluminação pública, quando é ativado o primeiro estado do mesmo, irá iniciar com a temperatura da cor a 4000k. Quando anoitece, será ativado o segundo estado do sensor crepuscular, e a temperatura de cor passará para 7000k. A partir das 23h, conforme a programação, o sistema entrará em modo *standby*, isto é, a iluminação pública passa para 25% da sua intensidade luminosa até o sensor de movimento ser ativado, o que irá fazer com que a iluminação transite para os 100%.

Conforme referido anteriormente, a simulação foi desenvolvida nos ambientes *CX-Programmer* e *CX-Supervisor*, recorrendo a programação em *Ladder*. O percurso simulado representa o deslocamento de uma pessoa que sai da sua habitação, situada na Praceta Quinta da Princesa, por volta da 01h00, período em que o sistema opera em modo *Standby* (25% da intensidade luminosa).

O funcionamento do sistema (caso de estudo) ao longo do trajeto decorre da seguinte forma:

- Ao sair de casa, o utilizador encontra a via com iluminação reduzida (25%);
- Quando é detetado pela luminária mais próxima, esta aumenta automaticamente para 100%, garantindo visibilidade adequada;
- Antes de entrar na Rua de Cabo Verde, é detetado pela última luminária da via anterior, ativando antecipadamente a zona seguinte;

- À aproximação de uma passadeira, o sensor associado aciona o modo intermitente de aviso e, simultaneamente, aumenta a iluminação da rua perpendicular (Rua de Goa);
- Na primeira interação com a Rua de Goa, a travessia da passadeira desencadeia o mesmo comportamento;
- Ao alcançar a metade da passadeira, o sensor da luminária seguinte deteta a presença e mantém a iluminação ativa;
- Já na Rua de Goa, a luminária seguinte ativa uma parte da Avenida de Moçambique;
- Ao chegar à Avenida de Moçambique, o utilizador atravessa uma nova passadeira, seguindo a mesma lógica de deteção e reforço de iluminação;
- Após a travessia, uma luminária do sentido oposto deteta o movimento e ativa a iluminação da Praceta Ilha da Madeira, apesar de não pertencer ao trajeto seguinte;
- Continuando no mesmo sentido, outra luminária ativa a Rua Nova Lisboa;
- Prosseguindo na Avenida de Moçambique, o utilizador atravessa outra passadeira e passa por duas luminárias; a segunda ativa a Rua Cidade da Beira;
- Após esta travessia, entra na Rua Cidade da Beira e percorre-a até ao final, sendo sucessivamente detetado por três luminárias adicionais.

A Figura 38 apresenta graficamente o trajeto utilizado na simulação, permitindo visualizar claramente ao longo do percurso a sequência de ativação das luminárias e passadeiras.

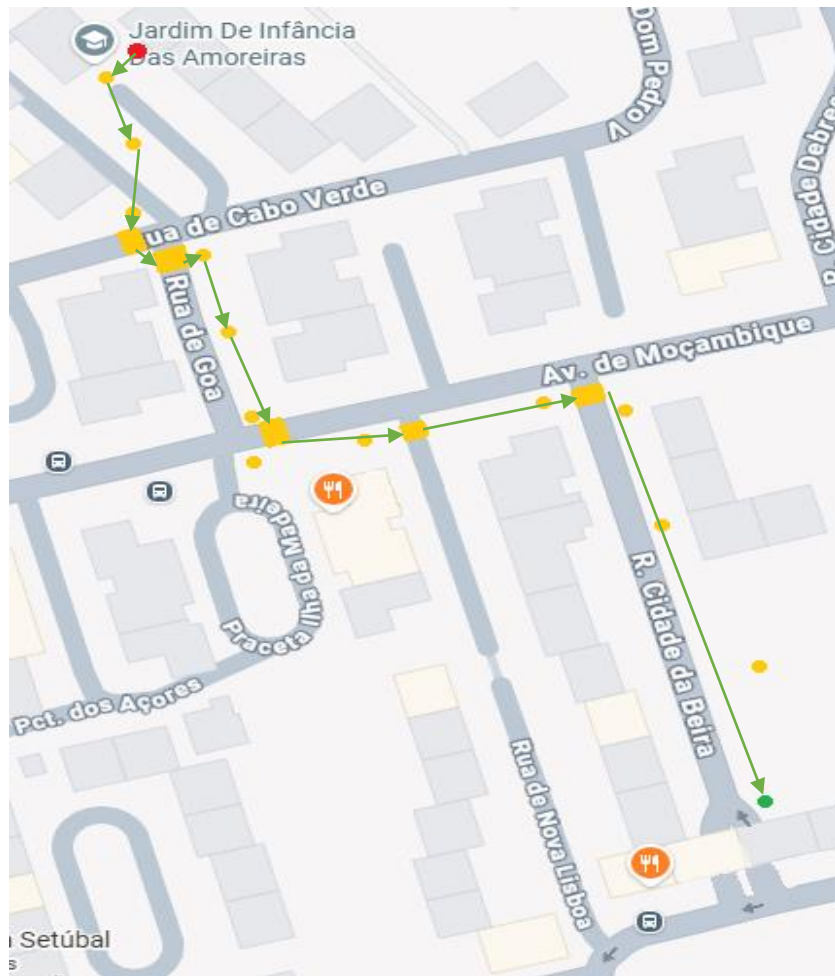


Figura 38 - Percorso percorso

A estratégia de iluminar as vias adjacentes garante:

- Maior segurança para o utilizador;
- Continuidade visual;
- Redução de zonas escuras;
- Antecipação de movimentos.

Conforme a deslocação do pedestre, poderão ser ativadas luminárias pelo algoritmo não corresponde ao caminho do pedestre, mas como entra no sensor de ativação, a mesma por indefinição de trajeto acende, esse comportamento é intencional para garantir segurança pedestre.

8.3 Sistema de controlo

O PLC encontra-se instalado no quadro elétrico da via pública, permitindo centralizar o controlo do sistema de iluminação sem necessidade de executar intervenções no pavimento para instalação de cablagem adicional. Esta abordagem reduz significativamente os custos de infraestrutura e agiliza a implementação. Assim, o controlo das luminárias é realizado através de módulos de comunicação instalados em cada luminária, capazes de receber informação via *wi-fi* proveniente do PLC.

Cada luminária é equipada com um controlador *wi-fi* que funciona como nó ativo da rede de comunicação. Este módulo recebe os comandos transmitidos pelo sistema central e converte-os em sinais compatíveis com o *driver* LED, normalmente através da interface analógica 0–10 V. Esta conversão permite regular a intensidade luminosa, ativar ou desativar luminárias, ou aplicar perfis programados de funcionamento, possibilitando tanto o controlo individual como o controlo por grupos.

Para aumentar a robustez e a escalabilidade do sistema, é implementada uma topologia de rede *wi-fi* em modo *mesh*. Nesta configuração, cada luminária não só atua como recetor de comandos, mas também como repetidor de sinal, estabelecendo uma malha interligada de dispositivos capazes de distribuir eficientemente os dados ao longo da via. Uma característica fundamental das redes *mesh* é a sua capacidade de autorregeneração. Em caso de falha de um nó causada por avaria, falta de alimentação, interferências radioelétricas ou degradação do sinal os nós vizinhos detetam automaticamente a interrupção e ajustam as tabelas de rotas, selecionando caminhos alternativos para manter a comunicação. Esta redundância natural aumenta significativamente a fiabilidade do sistema, assegurando continuidade operacional mesmo em ambientes com condições adversas.

A estrutura funcional da rede *mesh* baseia-se no comportamento cooperativo entre os diferentes nós. Inicialmente, o PLC estabelece comunicação com um ou mais *access points*, que servem como porta de entrada da malha. A partir daí, cada módulo de comunicação integrado nas luminárias realiza um processo automático de deteção de vizinhança, analisando parâmetros como intensidade de sinal, estabilidade da ligação e número de saltos necessários para alcançar o controlador central.

Uma vez integrados na malha, os módulos passam a atuar como elementos ativos na retransmissão dos dados. Quando o PLC emite comandos, como a regulação da intensidade luminosa ou a ativação de um conjunto de luminárias, os dados são encaminhados automaticamente de nó para nó até atingirem o destino final. O

processo de encaminhamento é gerido por algoritmos de *routing* otimizados, capazes de avaliar a qualidade das ligações em tempo real e selecionar o caminho mais adequado. Importa referir que as rotas utilizadas no envio podem diferir das rotas usadas no retorno de dados, uma vez que a malha define autonomamente o percurso mais eficiente para cada direção de comunicação.

Em termos globais, o sistema de comunicação assenta numa estrutura hierárquica:

- O PLC, localizado no quadro elétrico, comunica com os access points;
- Os access points, estabelecem a rede *wi-fi mesh* que interliga todos os controladores instalados nas luminárias;
- Cada controlador converte os comandos recebidos em instruções para o *driver* LED, garantindo a regulação precisa do fluxo luminoso.

Esta integração entre controlo centralizado, comunicação sem fios e gestão individual de luminárias constitui uma solução eficiente, flexível e escalável para a modernização da iluminação pública.

A tabela seguinte demonstra as diferenças entre uma ligação *wi-fi* tradicional e uma ligação *wi-fi mesh*.

Tabela 7 - Diferença entre *wi-fi* tradicional e *wi-fi mesh*

Característica	Wi-Fi Tradicional	Wi-Fi Mesh
Topologia	Estrutura centralizada; Equipamentos ligam-se diretamente ao AP.	Estrutura distribuída; Cada nó comunica entre si.
Dependência do AP	Elevada, uma falha no AP implica perda de comunicação	Reduzida, os nós comunicam por rotas alternativas
Alcance total	Limitado ao raio do AP	Expandido através de vários nós encadeados
Robustez da comunicação	Fraca em ambientes com obstáculos ou interferências	Elevada, devido à redundância e <i>self-healing</i>
Resiliência a falhas	Baixa, com a desconetividade de um nó isolado perde-se a conectividade	Alta, com a falha de um nó, redireciona automaticamente o tráfego
Escalabilidade	Para aumentar a cobertura é necessário mais APs	Cada novo nó reforça e expande a rede
Instalação em vias públicas	Necessita planeamento rigoroso de cobertura	Adapta-se naturalmente ao alinhamento das luminárias

A figura seguinte ilustra um exemplo da arquitetura de comunicação e do esquema de ligação entre o PLC, os *access points* e as luminárias equipadas com módulos de comunicação.

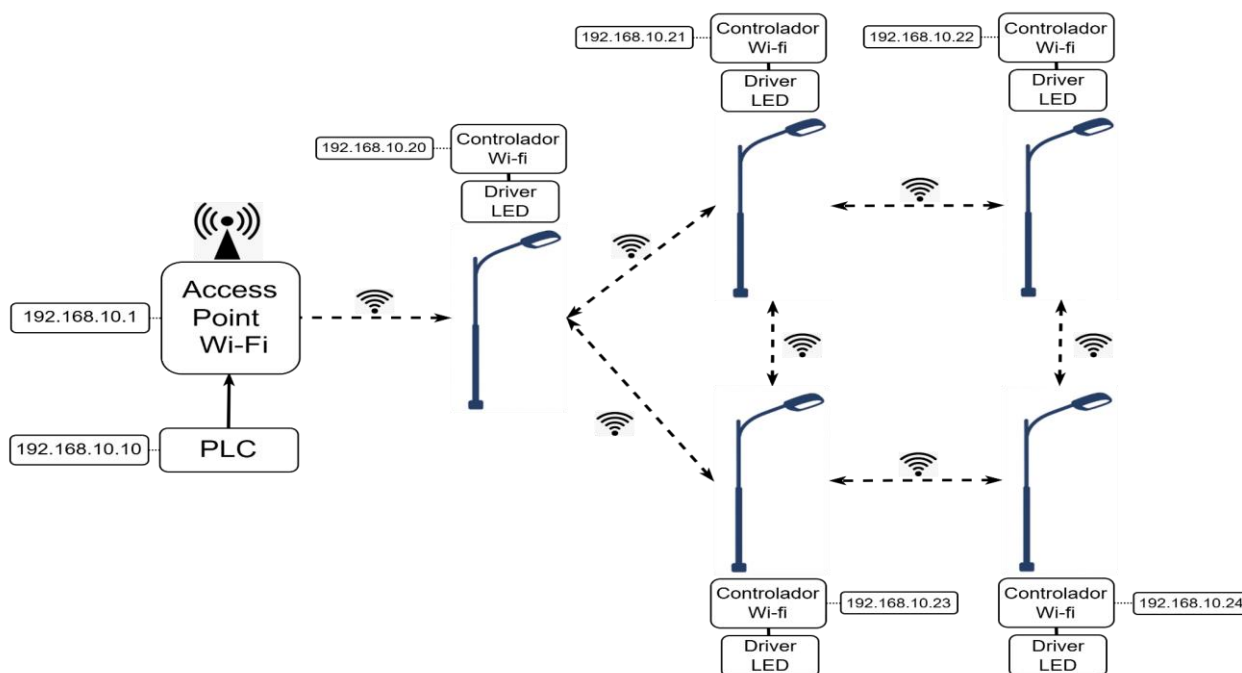


Figura 39 - Ligação da rede aplicada às luminárias

8.4 Hardware da arquitetura

A implementação de um sistema integrado de gestão inteligente da iluminação pública e de passadeiras seguras exige uma infraestrutura de hardware robusta, fiável e compatível com as exigências operacionais do meio urbano. Neste capítulo é apresentada a arquitetura física necessária para tornar o sistema funcional, desde os equipamentos instalados no campo, como as luminárias, sensores e módulos de sinalização, até aos controladores, dispositivos de comunicação e plataformas de supervisão que asseguram o seu funcionamento coordenado.

Este enquadramento é essencial para demonstrar a exequibilidade do sistema proposto e para garantir que a sua implementação possa ser possível.

8.4.1 Hardware a implementar

i. Luminárias LED com *driver* programável

As luminárias LED selecionadas integram *drivers* programáveis com capacidade de *dimming* e tecnologia *tunable white*, permitindo ajustar tanto a

intensidade luminosa como a temperatura de cor. Estas funcionalidades possibilitam uma adaptação dinâmica da iluminação às condições ambientais e aos requisitos de segurança da via. As luminárias necessitam de estar sempre alimentadas a 230V, para garantir a funcionalidade do sistema.

ii. Sensores de movimento

Os sensores de movimento instalados nas luminárias permitem detetar a aproximação de peões, ativando automaticamente o aumento de potência da luminária. Este mecanismo assegura uma iluminação reforçada em situações de utilização real, contribuindo simultaneamente para a eficiência energética. Necessita estar sempre alimentado a 230V

iii. Sensores crepusculares

Os sensores crepusculares, montados nas luminárias, possuem duas saídas independentes que permitem acionar diferentes estados de temperatura de cor. Desta forma, possibilitam a transição automática entre cenários luminosos, de acordo com a intensidade da luz natural.

iv. Sensores para passadeiras

Os sensores destinados a monitorizar as passadeiras são instalados em estruturas metálicas posicionadas de forma central em relação à passadeira, garantindo a deteção eficaz de peões na zona de travessia. A sua função é ativar os sistemas de alerta. Alimentação a 24V, logo é necessário ter uma fonte de alimentação para estes sensores.

v. Fonte de alimentação 24VDC

Para alimentação da eletrónica de controlo, como sensores e módulos periféricos.

vi. PLC

O PLC atua como controlador central de todo o sistema, sendo responsável pela leitura dos sinais provenientes dos sensores, execução da lógica de controlo, comando dos *drivers* das luminárias e interface com o módulo de comunicação. Constitui o elemento principal da automação e garante a

operação coordenada entre todos os dispositivos. O PLC pode ser alimentado diretamente a 230V, como a 24VDC, dependendo do modelo utilizado.

vii. Módulos de interface

Os módulos de interface asseguram a ligação entre o PLC e as luminárias LED, permitindo a gestão individual dos seus endereços, o controlo do *dimming* e a leitura do estado dos *drivers*. Este componente é essencial para garantir a comunicação eficiente e o controlo granular de cada ponto de luz.

8.4.2 Ligação de rede comunicação

Para garantir a comunicação entre os PLCs e o sistema de supervisão, é necessária uma infraestrutura de rede. Idealmente, seria utilizada uma ligação Ethernet/IP via cabo RJ45 a um bastidor central. Contudo, como no cenário real nem todas as vias estão preparadas para passagem de cabos, optou-se por utilizar *bridges wi-fi*, permitindo que os PLCs comuniquem sem fios.

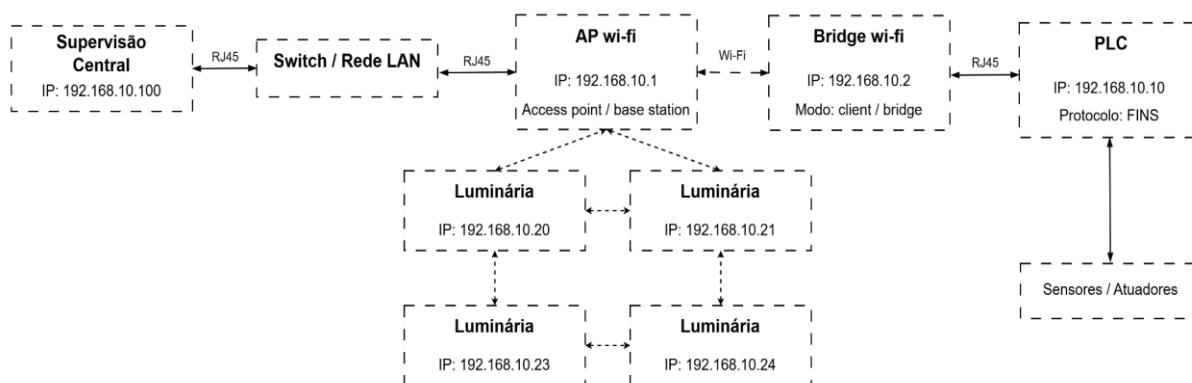


Figura 40 – Fluxo da comunicação

A figura 40, representa um exemplo em diagrama de blocos, em que o sistema começa na supervisão central, onde tem o software de controlo instalado. Este computador tem o endereço IP 192.168.10.100 e é responsável por monitorizar e controlar.

Este computador está ligado um *switch* da rede LAN. A partir do *switch*, o sinal segue por cabo Ethernet até um *access point wi-fi*, configurado como ponto de acesso principal da rede sem fios e com IP 192.168.10.1. Este é o responsável por criar a

rede *wi-fi* que cobre a área onde se encontra os equipamentos remotos, como as luminárias.

Do lado remoto, existe uma *bridge wi-fi* configurada em modo cliente (*Client / Bridge*), que recebe o sinal do AP e o converte novamente para Ethernet. Esta *bridge* tem o IP 192.168.10.2 e funciona como uma extensão transparente da rede principal.

A saída Ethernet desta *bridge* liga-se diretamente ao PLC *Omron CP1L-E*, responsável pelo controlo. O PLC opera com IP 192.168.10.10.

Por fim, o PLC está ligado aos sensores e atuadores, que constituem os elementos físicos.

8.4.3 Hardware da simulação

Para a realização da simulação, foi necessário recorrer a um conjunto de hardware específico, adequado às necessidades de controlo e aquisição de dados do sistema. A infraestrutura é composta por uma fonte de alimentação de 24 VDC, que por sua vez é responsável pela alimentação do autómato programável, um PLC *Omron CP1L-E*, configurado e programado para reproduzir o comportamento funcional do sistema proposto, e ainda por um conjunto de bornes de ligação e cablagem técnica destinados à interligação entre os diferentes componentes do circuito de comando.

A figura 40 ilustra o esquemático da montagem desenvolvida com as imagens da respetiva fonte e PLC instalados, no anexo 4 encontra-se o esquema elétrico.

O anexo 4 apresenta uma imagem da montagem cujo esquema de ligações se encontra no anexo 5.

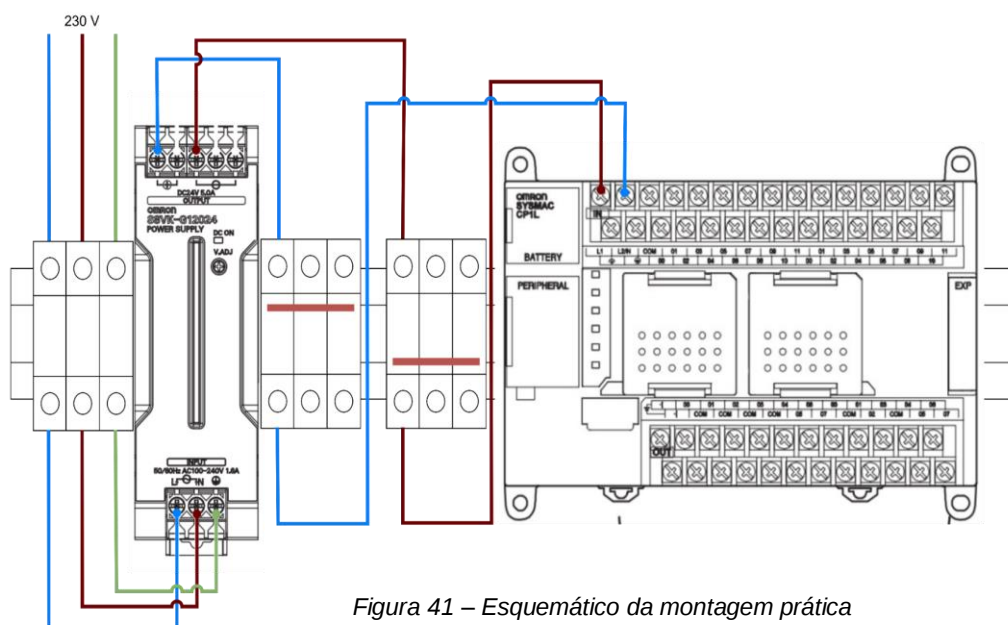


Figura 41 – Esquemático da montagem prática

8.5 Consumo energético

De acordo com a informação disponibilizada pelo Município de Setúbal, o consumo energético associado à iluminação pública nos últimos anos apresenta os valores seguintes:

Tabela 8 - Consumos município Setúbal na Iluminação Pública

	2023 (kW/h)	2024 (kW/h)	2025 (Outubro) (kW/h)	2025 (Estimativa) (kW/h)
IP	9031412	5274040	3842165	4622165

A análise destes dados evidencia que a substituição progressiva das luminárias por tecnologia LED originou uma redução muito significativa no consumo energético do concelho. Esta modernização, aliada à elevada eficiência das luminárias LED face às tecnologias tradicionais, contribuiu decisivamente para a redução da fatura energética municipal.

A adoção de um sistema de gestão inteligente, como o proposto neste estudo, poderá representar uma nova etapa na estratégia de eficiência energética, permitindo uma poupança adicional relevante no consumo associado à iluminação pública.

Tendo como o exemplo prático da simulação, na Avenida de Moçambique existem 27 luminárias, que se estima serem de 60 W cada.

Com este número de luminárias ficamos com uma potência instalada de 1620 W/h, em que considerando as 10 horas de funcionamento noturno, no solístico de verão, ficamos com 16200 W/h / dia, isto sem o sistema instalado.

Com o sistema instalado ficamos com um funcionamento de 3h no máximo, que faz com que fiquemos com 4860 Wh, e como temos 7h em modo standby ficamos com 2825 Wh, o que faz um somatório de 7695 Wh / dia

A poupança obtida será de 8505 Wh /dia

Apesar deste valor, numa única rua, poder parecer modesto, a sua extrapolação para a escala municipal traduz-se num impacto altamente significativo. Segundo a informação disponibilizada pelo Município de Setúbal, existem aproximadamente 25 060 luminárias de diversas potências distribuídas pelo concelho.

A implementação de um sistema de gestão inteligente neste universo poderá, portanto, representar uma redução expressiva na fatura energética municipal, contribuindo para a sustentabilidade económica e ambiental do concelho.

Na zona escolhida para o desenvolvimento prático, encontram-se instaladas 132 luminárias, cada uma com uma potência estimada de 60 W. Para avaliar o impacto energético do sistema proposto, foram considerados dois cenários distintos:

- Solstício de Verão: funcionamento entre as 21h e as 07h (10 horas)
- Solstício de Inverno: funcionamento entre as 18h e as 07h (13 horas)

Foram calculadas as potências totais, os consumos energéticos e as respetivas poupanças com e sem o sistema de gestão inteligente, tanto em regime de funcionamento a 100% da intensidade luminosa como em modo de redução para 25%.

A tabela seguinte apresenta o cálculo da potência total instalada, dos consumos para cada cenário e das poupanças associadas à implementação do sistema, tomando como referência os períodos definidos para o solstício de verão:

Tabela 9 – Potências no solstício verão

Solstício Verão						
Valor kWh [€]	Potência [W]	Nº luminárias [uni]	P. Total 100% [W/h]	Valor total [€h]	P.Total 25% [W/h]	Valor 25% [€h]
0.145	60	132	7920	1.15	1980	0.29

A tabela seguinte detalha os valores referentes ao consumo diário do sistema sem a solução aplicada e com a solução no solstício de verão:

Tabela 10 - Poupança no solstício verão

	Diária sem sistema		Diária com sistema		Poupança Diária	Poupança Mensal	Poupança Anual
	nº horas	Valor	nº horas	Valor			
100%	10	11 €	3	3.4 €			
25%			7	2.0 €			
Total		11 €		5.5 €	6.0 €	180.9 €	1,296.3 €

A tabela seguinte refere o cálculo das potências totais, consumo total para a quantidade e tipo de luminária quer para 100%, quer para 25%, bem como o cálculo do consumo para o solstício de inverno:

Tabela 11 - Potências no solístico inverno

Solístico Inverno						
Valor kWh [€]	Potência [W]	Nº luminárias [uni]	P. Total 100% [W/h]	Valor total [€h]	P.Total 25% [W/h]	Valor 25% [€h]
0.145	60	132	7920	1.15	1980	0.29

A tabela seguinte detalha os valores referentes ao consumo diário do sistema sem a solução aplicada e com a solução no solístico de inverno:

Tabela 12 – Poupança no solístico inverno

	Diária sem sistema		Diária com sistema		Poupança Diária	Poupança Mensal	Poupança Anual
	nº horas	Valor	nº horas	Valor			
100%	13	15 €	6	7 €			
25%			7	2.0 €			
Total		15 €		9 €	6 €	267 €	904 €

Tendo em conta os valores apurados, ficamos então com uma poupança anual de:

Tabela 13 - Total poupança

Total Poupança	2,201 €
---------------------------	---------

Estes valores representam um cenário teórico, assumindo que o sistema permanece em modo *standby*, ou seja, a 25% da intensidade luminosa durante toda a noite, sem qualquer alteração de estado.

Em termos comparativos, teremos as seguintes potências sem a solução aplicada e com a solução instalada, para a zona de estudo.

Tabela 14 - Poupança em termos de potência

Sem sistema		Com sistema	
P. Anual (V) [Wh]	P. Anual (I) [Wh]	P. Anual (V) [Wh]	P. Anual (I) [Wh]
17028000	15444000	8088300	9207000

O que resulta numa poupança anual de:

- 6237 kW de poupança no solstício de inverno;
- 8940 kW de poupança no solstício de verão.

Tendo em consideração o somatório destes valores, teremos uma poupança de aproximadamente 15,177 kW por ano.

8.6 Programação do sistema

A programação do sistema foi desenvolvida com base na informação recolhida pelos sensores de movimento, luminosidade e presença nas passadeiras, permitindo ajustar a intensidade luminosa, a temperatura de cor e o estado de alerta das travessias. Todo o controlo foi implementado através de um PLC *Omron*, sendo posteriormente simulado no software *CX-Programmer* e visualizado na supervisão.

8.6.1 Lógica de Funcionamento

A lógica geral do sistema baseia-se na interação entre sensores e luminárias, seguindo diferentes fases de controlo ao longo da noite:

i. Funcionamento no crepúsculo

Assim que o sensor crepuscular deteta baixa luminosidade solar, o sistema ativa a iluminação pública a 100% de intensidade luminosa e com uma temperatura de cor de 4000K, com ajuda do *tunable white*.

ii. Variação da temperatura de cor ao anoitecer

Quando a luminosidade solar diminui até perto do anoitecer, a temperatura de cor das luminárias transita para 7000K, proporcionando melhor visibilidade e segurança.

iii. Redução automática num horário específico

Quando atinge uma determinada hora, neste caso as 24h, o sistema vai reduzir a intensidade luminosa para 25%.

iv. Deteção de movimento

Quando um detetor de movimento é ativado no horário após as 24h, o mesmo irá fazer com que eleve a intensidade luminosa dessa rua para 100%.

v. Tempo de funcionamento a 100% após as 24h

Sempre que um detetor numa determinada rua for acionado, irá iniciar um temporizador de 10 min. Após este tempo caso não tenha detetado nenhuma mudança de estado, fará com que a iluminação retome os 25%.

vi. Funcionamento ao amanhecer

Ao amanhecer fará o inverso do crepúsculo, mas caso o estado do sistema seja a 25% o mesmo mantém-se e altera a temperatura da cor consoante a informação do sensor.

8.6.2 Desenvolvimento da Programação

O desenvolvimento da programação foi realizado no software *CX-Programmer* da *Omron*, utilizando linguagem *Ladder*, devido à familiaridade técnica e à necessidade de simular o comportamento real do sistema.

Para garantir a organização e facilidade de manutenção do programa, o código foi dividido em vários subprogramas, cada um responsável por uma função específica:

a) Subprograma – Iluminação individual por ruas, avenidas, praças

Inclui toda a lógica de controlo das luminárias:

- Arranque noturno;
- Gestão da temperatura de cor;
- Modos 25% e 100%;
- Ações sobre deteção de movimento;
- Sincronização entre ruas adjacentes.

No anexo 1, encontra-se a programação feita para uma rua. Esta programação baseia-se na simulação do trajeto do pedestre. O programa terá de ter em conta todas as variantes possíveis para a ativação da iluminação das vias.

b) Subprograma – Passadeiras individuais por ruas, avenidas, praças

Controla o funcionamento das passadeiras inteligentes:

- Detecção de presença de peões;
- Ativação de luzes LED intermitentes;
- Aumento da intensidade luminosa da luminária dedicada;
- Temporização do estado de travessia.

No anexo 2, encontra-se a programação feita para uma passadeira. Esta programação baseia-se na simulação do trajeto do pedestre. O programa terá de ter em conta outro pedestre a percorrer o sentido contrário.

8.7 Supervisão

A supervisão desempenha um papel fundamental na gestão do sistema de iluminação inteligente, permitindo visualizar em tempo real todas as interações entre sensores, luminárias e passadeiras. Através desta plataforma é possível monitorizar:

- A atuação de sensores;
- A intensidade luminosa e temperatura de cor das luminárias;
- O estado das passadeiras (livre/ocupada);
- Os consumos energéticos e respetiva poupança;
- As falhas de luminárias e alertas do sistema;
- A manutenção.

A supervisão foi desenvolvida no software *CX-Supervisor* da *Omron*, escolhida pela sua robustez, familiaridade técnica e capacidade de criar interfaces gráficas adequadas ao objetivo do sistema.

Foram criadas várias páginas funcionais, cada uma representando áreas distintas do sistema. Segue-se uma breve descrição de cada uma:

i. Página Introdutória

Apresenta o ecrã inicial da aplicação, com logotipos, título do sistema e botões de acesso às páginas principais.

ii. Página Geral

é a central de toda a supervisão. A partir da qual consegue-se navegar para todas as restantes, como por exemplo, selecionar a junta de freguesia.

iii. União de Freguesias / Sado / S. Sebastião / Azeitão / Gâmbia-Pontes-Alto da Guerra

A seguinte página é um mapa das áreas envolventes, que servem para poder localizar as zonas onde iremos verificar as iluminações e passeadeiras.

iv. Liceu

Página específica para a área envolvente ao Bairro do Liceu. Esta página irá servir de passagem para zonas mais dedicadas.

v. Avenida de Moçambique

É a zona que representa a área principal da simulação dedicada onde será possível visualizar o estado dos sensores de movimento, bem como o estado da iluminação e passadeiras.

A partir daqui, será permitido acompanhar o percurso definido e as reações do sistema às deteções.

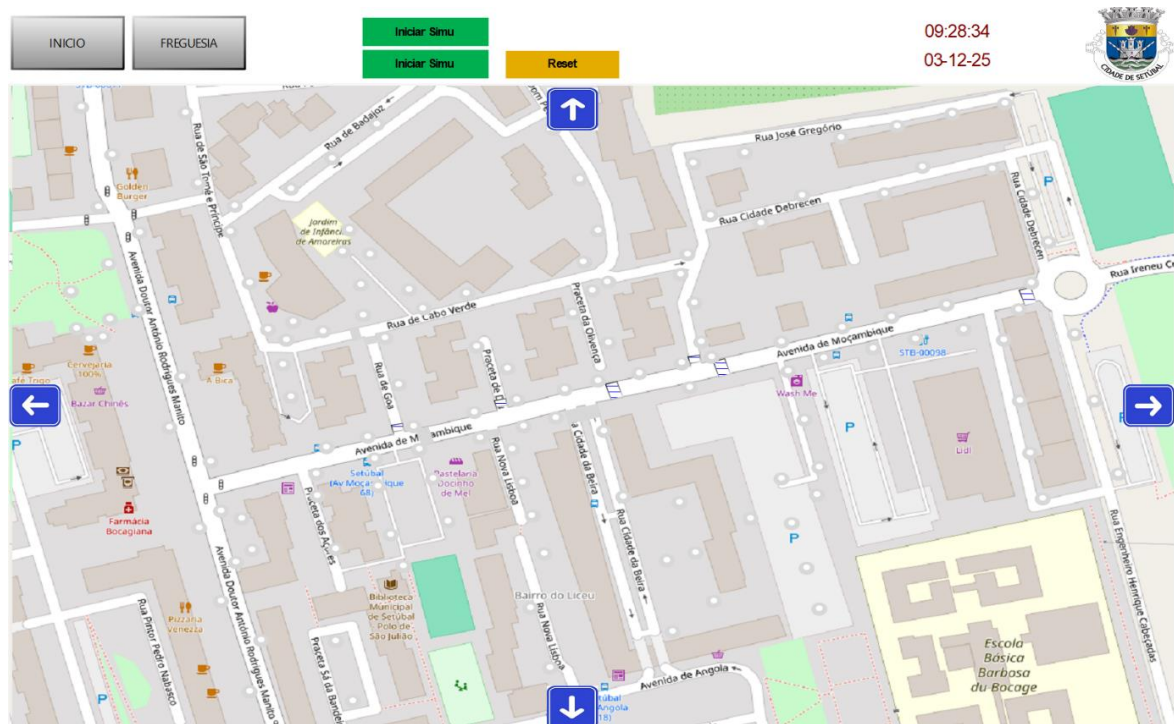


Figura 42 – Layout da zona da Av. de Moçambique

9. CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como objetivo desenvolver e analisar uma solução integrada para a gestão energética da iluminação pública e para a implementação de passadeiras inteligentes na cidade de Setúbal, com foco na zona da Avenida de Moçambique. Partindo do estudo das tecnologias de iluminação, dos princípios de luminotécnica, das normas aplicáveis e das necessidades reais do município, foi possível conceber um sistema capaz de reduzir consumos energéticos e simultaneamente melhorar as condições de segurança rodoviária.

A análise do cenário de referência demonstrou que a iluminação pública, tal como se encontra instalada, possui um potencial significativo de otimização, quer ao nível da potência instalada, quer ao nível do controlo horário e da regulação de fluxo luminoso. A integração de sensores de movimento e luminosidade, combinada com a utilização de um PLC para controlo inteligente, revelou ser uma estratégia eficaz para ajustar o nível luminoso às necessidades reais de utilização, permitindo reduções de consumo sem comprometer os níveis de segurança e conforto dos utilizadores.

Paralelamente, a conceção de um sistema de passadeiras inteligentes veio dar resposta a um problema atual e relevante, o elevado número de atropelamentos em passadeiras, muitas vezes associados a défice de visibilidade ou perceção por parte dos condutores. A solução proposta, baseada em sensores de deteção de peões e sinalização luminosa de alerta, mostrou ser tecnicamente viável, de implementação relativamente simples e com potencial para aumentar significativamente a segurança de travessia.

A criação de uma plataforma de supervisão permite acrescentar valor ao sistema, possibilitando a monitorização, diagnóstico e análise de desempenho em tempo real. Esta componente assume particular importância num contexto de cidades inteligentes, onde a integração e gestão centralizada das infraestruturas urbanas constitui um vetor estratégico de evolução.

Os resultados obtidos no estudo prático confirmam que a implementação do sistema proposto poderá proporcionar reduções energéticas relevantes, traduzidas em menor fatura elétrica para o município e menores emissões de CO₂, em alinhamento com os objetivos nacionais e internacionais de eficiência energética e sustentabilidade. Adicionalmente, a adoção de passadeiras inteligentes poderá contribuir para a redução da sinistralidade rodoviária, em particular em locais de maior risco.

Em síntese, este trabalho demonstrou que é tecnicamente exequível e energeticamente vantajoso com a integração de soluções para a gestão dinâmica de iluminação pública com sistemas inteligentes de segurança para peões. A solução concebida constitui um contributo realista e aplicável ao desenvolvimento de cidades mais eficientes, seguras e sustentáveis, estando alinhada com as políticas de transição energética e transformação digital dos municípios.

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas, sugerem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

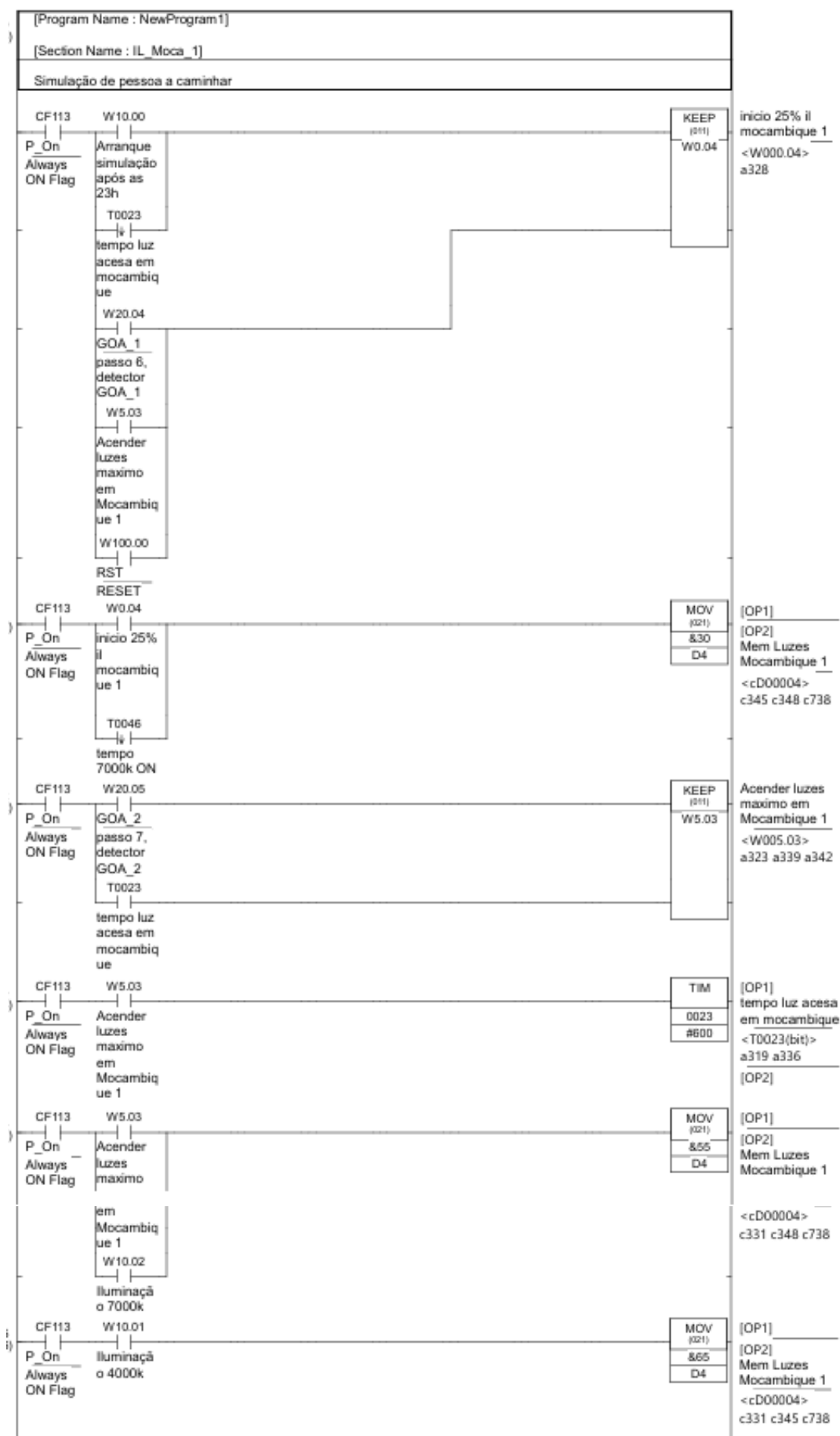
- a implementação piloto do sistema em duas ou três artérias urbanas com diferentes perfis de utilização, permitindo comparar resultados e ajustar parâmetros de controlo;
- a integração de dados em tempo real provenientes de outras fontes (por exemplo, tráfego, condições meteorológicas ou eventos especiais), de forma a adaptar dinamicamente os níveis de iluminação;
- o estudo da perceção dos utilizadores, relativamente às passadeiras inteligentes, através de inquéritos ou observação direta, de modo a avaliar o impacto na sensação de segurança;
- Implementação do sistema com a tecnologia DALI, visto ser a tecnologia mais dedicada para o controlo da iluminação.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

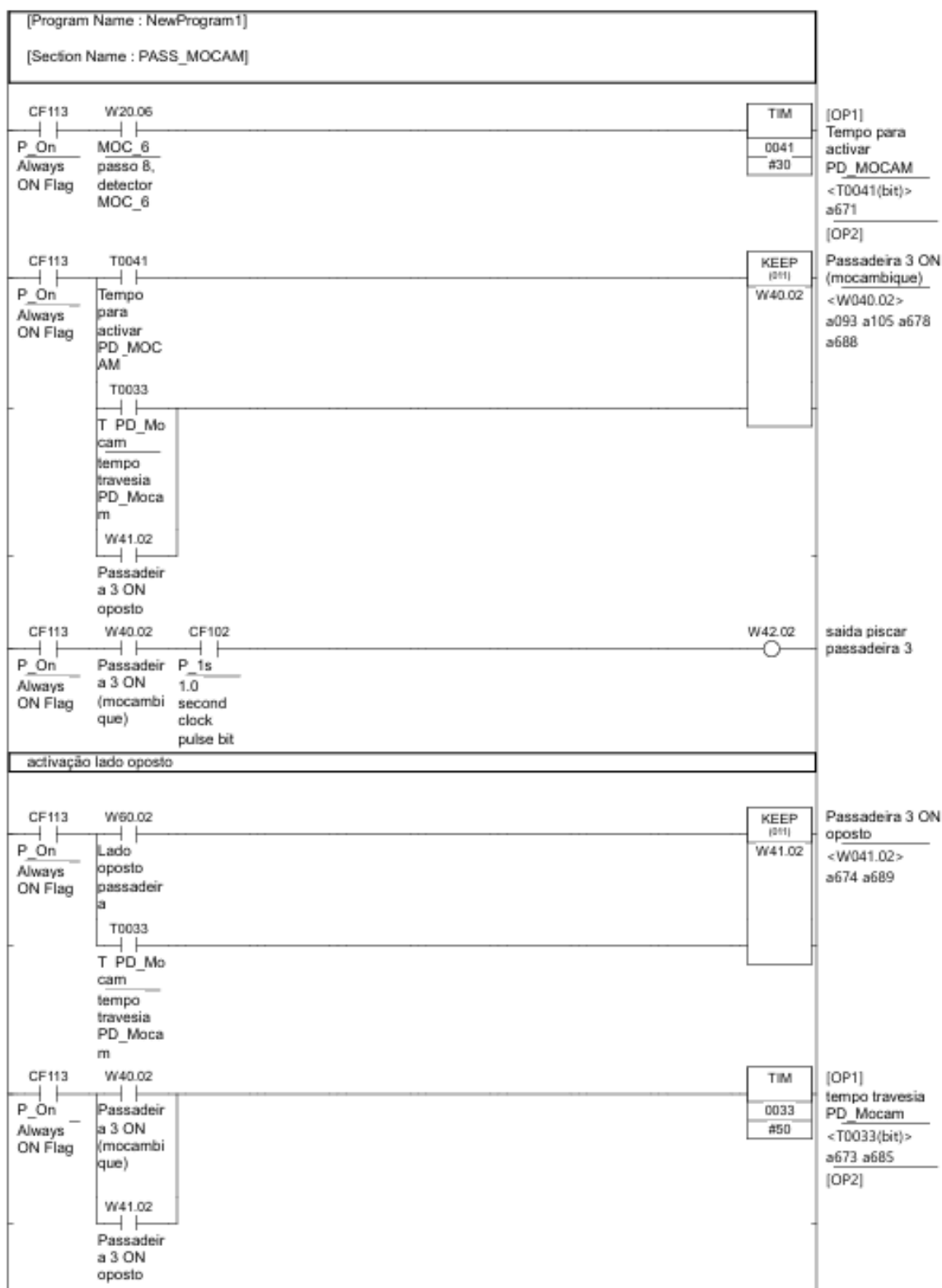
- [1] PNEC 2023,
https://www.dgeg.gov.pt/media/54fldci3/pnec2030_para_aprov_ar.pdf, 25-07-2025
22:30
- [2] Tromilux, história da iluminação, <https://www.tromilux.com/pt/a-historia-da-iluminacao>, 25-09-2025 18:40
- [3] EDP, Distribuição, Manual da iluminação, <https://www.e-redes.pt/pt-pt/transicao-energetica/iluminacao-publica>, 26-07-2025 20:30
- [4] IMT, Documento normativo para a aplicação a arruamentos urbanos
https://www.imt-ip.pt/wp-content/uploads/2025/01/imt_fasciculo_III_2024_digital.pdf,
05-10-2025 11:10
- [5] LOGOSLED, como funciona a iluminação DALI,
<https://logoslighting.com/pt/blog/how-does-dali-lighting-work-a-comprehensive-guide/>, 12-10-2025 11:30
- [6] Toda a matéria, Espectro eletromagnético,
<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/> (13-11-2025 16:54)
- [7] Sala de demonstrações da física, Reflexão de luz,
<https://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/81/1.-Reflexao-da-luz> (14-11-2025
15:30)
- [8] Shutterstock, Imagem, <https://www.shutterstock.com/pt/image-vector/pupil-size-different-lighting-dilated-undilated-2498807417> (14-11-2025 15:50)
- [9] Canal CECIERJ, Definição de ângulo sólido,
<https://canal.cecierj.edu.br/recurso/17617> (14-11-2025 16:20)
- [10] Wikipédia, Ângulo, <https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%82ngulo> (14-11-2025
16:30)
- [11] Qualificad, Iluminação no revit, <https://qualificad.com.br/iluminacao-no-revit-guia-basico/> (14-11-2025 16:40)
- [12] VectorStock, Light Measurement, <https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/lumens-lux-candela-measurement-concep-vector-50902354> (15-11-2025
10:20)

- [13] Instituto principia, Cores possuem temperatura?
<https://www.institutoprincipia.org/post/cores-possuem-temperatura> (15-11-2025 10:40)
- [14] Licenciatura Física, Introdução à astronomia,
https://www.virtual.ufc.br/solar/aula_link/SOLAR_2/Curso_de_Graduacao_a_Distancia/LFIS/I_a_P/Introducao_a_Astronomia/aula_03/05.html (15-11-2025 11:00)
- [15] Habidom, A segurança dos peões, <https://habidom.com/a-seguranca-dos-peoes/> (24-09-2025 19:20)
- [16] Wikipédia, Setúbal, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Set%C3%BAbal> (29-11-2025 11:30)
- [17] ResearchGate, figura 1, https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Representacao-da-Lampada-de-sodio-de-alta-pressao_fig1_311424849 (03-12-2025 11:20)
- [18] VivaDecora, A lâmpada de LED esquentar?,
<https://arquitetura.vivadecora.com.br/lampada-de-led-esquentar/> (03-12-2025 11:50)
- [19] EfectoLED.blog, o que são e como funcionam os Drivers LED,
<https://www.efectoled.com/blog/pt/o-que-sao-e-como-funcionam-os-drivers-led/> (02-12-2025 10:20)
- [20] PILZ, Sensor de radar seguro PSENradar, <https://www.pilz.com/pt-PT/products/sensor-technology/safe-radar-systems/psenradar-safe-radar-system>
- [21] LEDYI, O guia definitivo para o escurecimento de 0 a 10V,
<https://www.ledyilighting.com/pt/the-ultimate-guide-to-0-10v-dimming/>
- [22] ResearchGate, figure 5, https://www.researchgate.net/figure/Parts-of-the-metal-halide-lamp-Source-Manual-INDAL-lighting_fig3_340168375

ANEXO 1 – Programação da iluminação da Av. de Moçambique



ANEXO 2 – Programação da passadeira da Av. de Moçambique



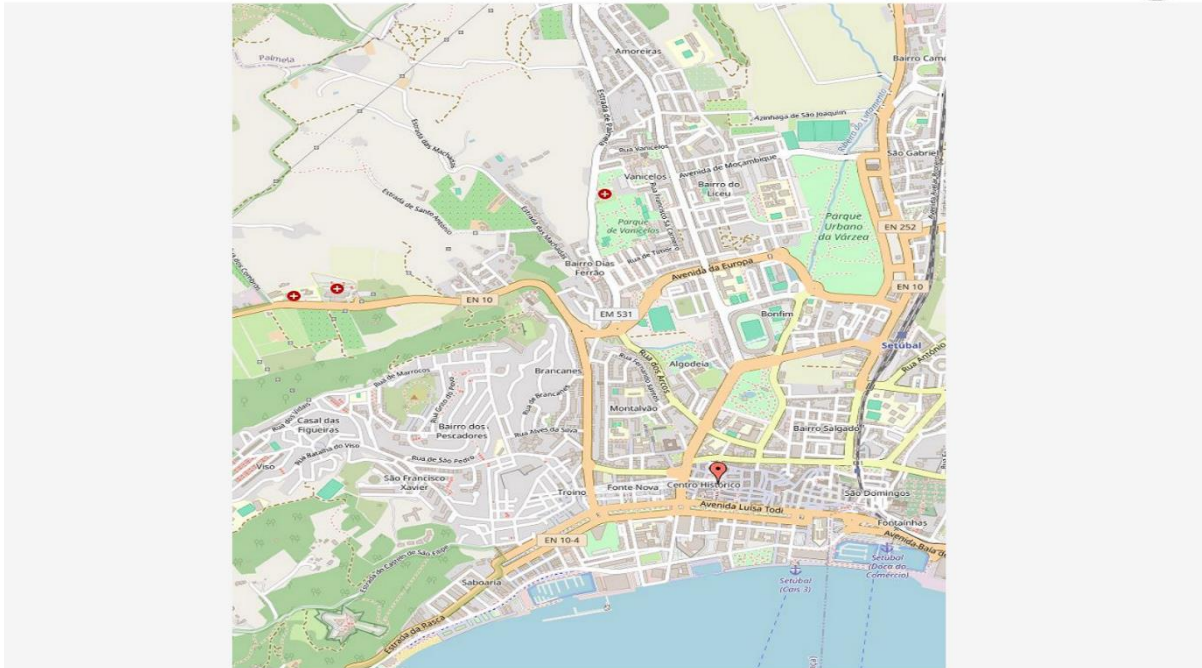
ANEXO 3 – Imagens da Supervisão



INICIO

11:36:49

09-12-25



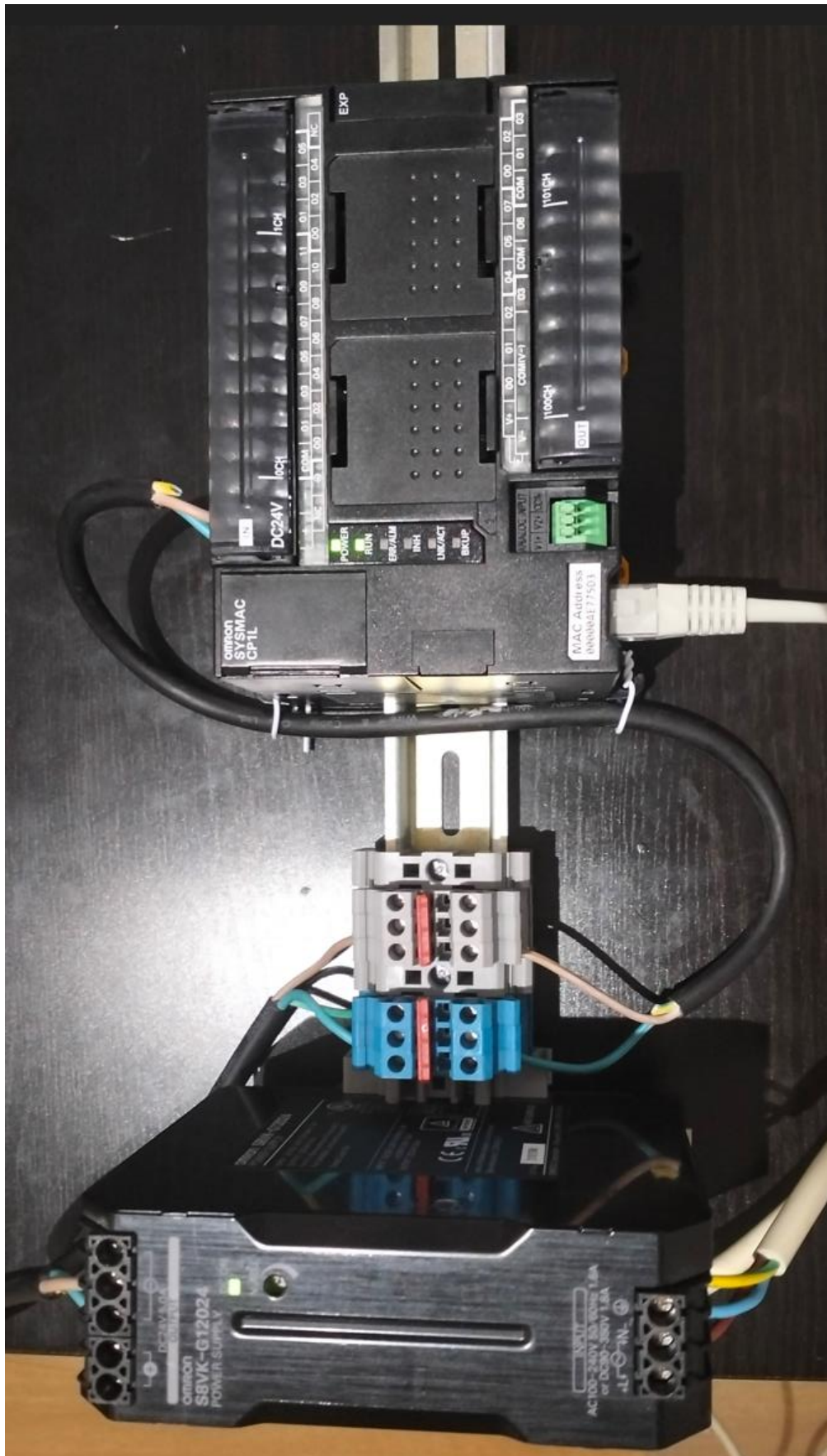
INICIO

11:37:41

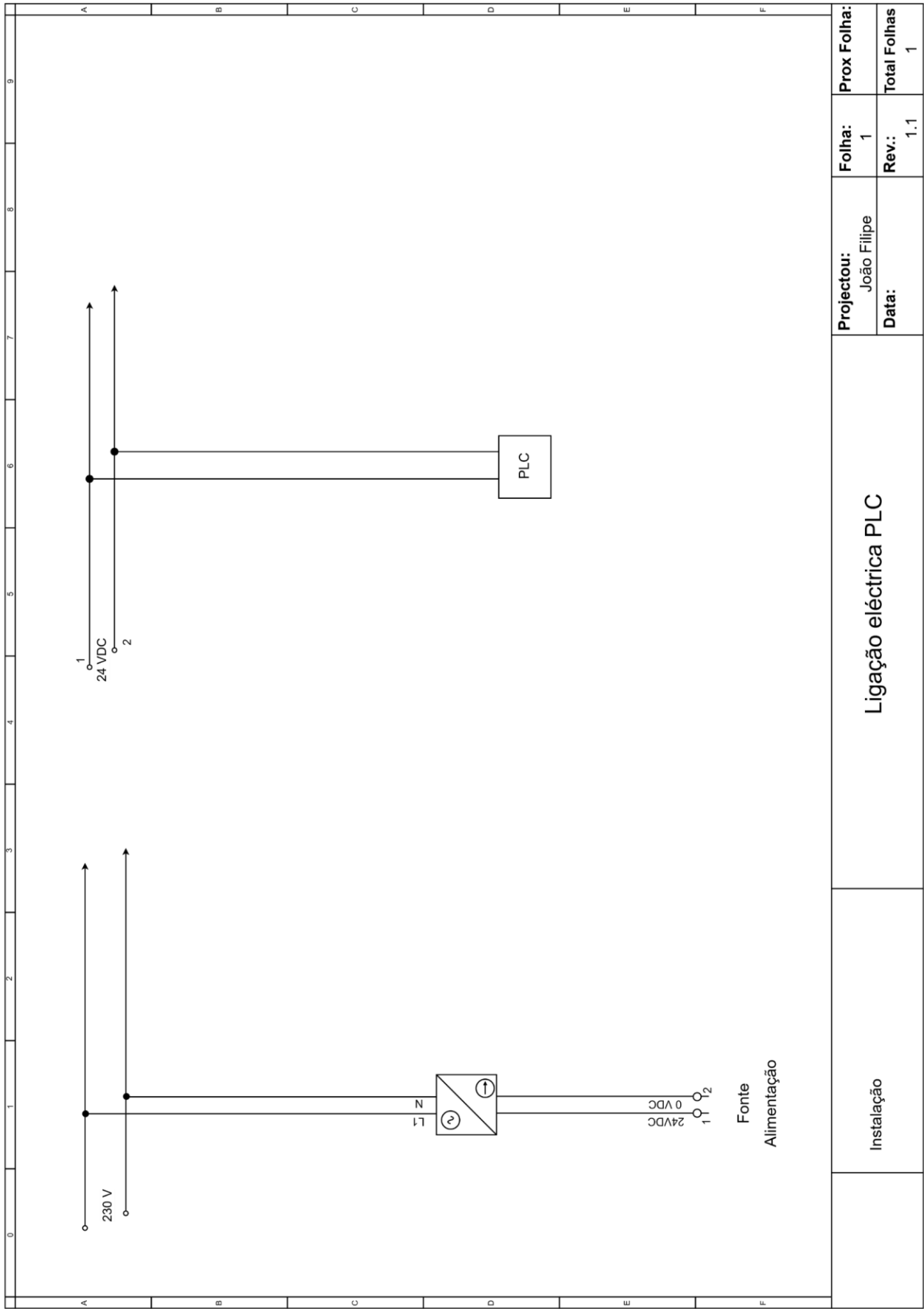
09-12-25



ANEXO 4 – Fotografia da montagem



ANEXO 5 – Esquema elétrico



ANEXO 6 – Exemplo de folha de informação fotométrica

