



Sistema de Iluminação Inteligente associado a Túneis e Plataformas Ferroviárias

DIOGO JOÃO MOURA DE CARVALHO
outubro de 2024

Sistema de Iluminação Inteligente associado a Túneis e Plataformas Ferroviárias

Diogo João Moura de Carvalho

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia**

Orientador: Rui Paulo Ramos de Castro

Júri:

Presidente:

Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Sérgio Filipe Carvalho Ramos, Professor Adjunto, ISEP

Rui Paulo Ramos de Castro, Professor Adjunto, ISEP

Resumo

Ao longo dos últimos anos a União Europeia, em conjunto com os seus estados-membros, têm desenvolvido e proposto medidas com o objetivo de reduzir a emissão de gases com efeito estufa para a atmosfera. A implementação dessas medidas é perceptível, não só através da aposta em meios de transporte menos poluentes, como o transporte ferroviário, como também na implementação de sistemas de iluminação mais eficientes associado a toda a infraestrutura envolvente. Desta forma, este relatório apresenta dois sistemas de controlo de iluminação inteligentes que permitem um controlo dinâmico e eficiente da iluminação, em Túneis Ferroviários e Plataformas de Passageiros. Os sistemas desenvolvidos são constituídos por diversas Unidades de Controlo que, associados a uma rede de sensores e conectadas por vários módulos de comunicação *wireless*, permitem uma monitorização da zona a iluminar e consequente controlo das luminárias respetivas. Além disso, os sistemas são associados a um servidor *web* permitindo o controlo remoto das fontes luminosas, através de quatro modos de operação distintos. A realização de uma análise simulada verifica que, a implementação dos sistemas se traduz numa redução considerável dos consumos energéticos, diminuindo a pegada ecológica da infraestrutura ferroviária.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Plataformas de Passageiros, Túneis Ferroviários, Sistemas de Controlo, Sistemas de Iluminação Inteligentes.

Abstract

Over the last few years, the European Union and its member states have developed and proposed measures to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere. The implementation of these measures can be seen not only in the focus on less polluting means of transport, such as rail, but also in the implementation of more efficient lighting systems associated with the surrounding infrastructure. This report therefore presents two intelligent lighting control systems that enable dynamic and efficient lighting control in railway tunnels and passenger platforms. The systems developed are made up of several control units which, associated with a network of sensors and connected by various wireless communication modules, allow monitoring of the area to be illuminated and consequent control of the respective luminaires. In addition, the systems are associated with a web server, allowing remote control of the light sources through four different operating modes. A simulated analysis showed that the implementation of the systems resulted in a considerable reduction in energy consumption, reducing the ecological footprint of the railway infrastructure.

Keywords: Energy Efficiency, Passenger Platforms, Railway Tunnels, Control Systems, Intelligent Lighting Systems.

Índice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Contextualização e Enquadramento | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Organização do Relatório | 2 |
| 2 | Conceitos Luminotécnicos | 3 |
| 2.1 | Fluxo Luminoso | 4 |
| 2.2 | Eficácia e Eficiência Luminosa | 4 |
| 2.3 | Quantidade de Luz | 5 |
| 2.4 | Intensidade Luminosa..... | 5 |
| 2.5 | Iluminância | 6 |
| 2.6 | Luminância | 7 |
| 2.7 | Síntese das Diferentes Grandezas | 7 |
| 3 | Fontes Luminosas na Iluminação Ferroviária | 9 |
| 3.1 | Lâmpadas de Descarga | 10 |
| 3.2 | Lâmpadas em Estado Sólido - Díodo Emissor de Luz (LED)..... | 12 |
| 3.3 | Comparação entre as diferentes tecnologias de Lâmpadas..... | 13 |
| 4 | Sistemas de Controlo de Iluminação | 15 |
| 4.1 | Controlo em função de horários pré-definidos (<i>Time scheduling</i>)..... | 16 |
| 4.2 | Controlo da Iluminação em função da Ocupação | 16 |
| 4.2.1 | Sistemas de Detecção de Comboios na Ferrovia Portuguesa..... | 17 |
| 4.2.2 | Alternativas às tecnologias existentes..... | 18 |
| 4.2.3 | Classificação dos sistemas de controlo em função da ocupação..... | 23 |
| 4.2.4 | Fatores que afetam a eficiência do sistema de controlo com base na ocupação | 24 |
| 4.3 | Controlo da Iluminação através da Luz Natural..... | 25 |
| 4.3.1 | Fatores que afetam a eficiência do sistema de controlo com base na luz natural | 27 |
| 4.3.2 | Poupanças associadas ao sistema de controlo com base na luz natural | 27 |
| 4.4 | Controlo de Iluminação Misto | 28 |
| 4.5 | Comparação entre os diferentes sistemas de controlo | 28 |
| 4.6 | Sistemas de Iluminação Inteligente | 29 |
| 4.6.1 | Arquitetura dos SII | 31 |
| 4.6.2 | Camada 1 - Nível de Perceção e Controlo | 32 |
| 4.6.3 | Camada 2 - Nível de Comunicação | 32 |
| 4.6.4 | Camada 3 - Nível de Aplicação..... | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.6.5 | Implementação de Sistemas de Iluminação Inteligente no Controlo de Iluminação Rodoviária | 35 |
| 4.6.6 | Vantagens dos sistemas de controlo de iluminação inteligente..... | 38 |
| 4.6.7 | Principais Desafios associados à Iluminação Inteligente | 39 |
| 5 | Sistemas de Controlo de Iluminação em Túneis e Plataformas de Passageiros | 41 |
| 5.1 | Requisitos do sistema - EN 13201:2015 | 42 |
| 5.2 | Estrutura dos Sistemas de Controlo de Iluminação Inteligente..... | 44 |
| 5.3 | Tecnologias e Protocolo de Comunicação utilizados | 45 |
| 5.3.1 | Modo de Operação | 45 |
| 5.3.2 | Taxa de Comunicação de dados pelo ar | 46 |
| 5.3.3 | Frequência do canal RF | 47 |
| 5.3.4 | Controlo do Amplificador de Potência..... | 48 |
| 5.3.5 | Protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> | 48 |
| 5.3.6 | Comunicação <i>Serial Peripheral Interface (SPI)</i> | 51 |
| 5.4 | Topologia da rede <i>wireless</i> constituída por múltiplos nRF24L01+ | 52 |
| 5.5 | Constituição e Componentes utilizados nas Unidades de Controlo | 53 |
| 5.5.1 | Microcontroladores e Transformador Associados | 53 |
| 5.5.2 | Módulo <i>nRF24L01+</i> e periféricos associados | 54 |
| 5.5.3 | Unidades de Controlo Locais | 55 |
| 5.5.4 | Unidade de Controlo Intermédia | 60 |
| 5.5.5 | Unidade de Controlo <i>Master</i> | 60 |
| 5.6 | Estrutura dos códigos associados às Unidades de Controlo | 64 |
| 5.6.1 | Túneis Ferroviários: Fluxogramas associados às Unidades de Controlo Locais | 64 |
| 5.6.2 | Túneis Ferroviários: Fluxogramas associados às Unidades de Controlo Intermédias..... | 67 |
| 5.6.3 | Túneis Ferroviários: Fluxogramas associados à Unidade de Controlo <i>Master</i> .. | 70 |
| 5.6.4 | Plataformas de Passageiros: Fluxogramas associados às Unidades de Controlo Locais..... | 76 |
| 5.6.5 | Plataformas de Passageiros: Fluxograma associado às Unidades de Controlo Intermédias..... | 78 |
| 5.6.6 | Plataformas de Passageiros: Fluxogramas associados à Unidade de Controlo <i>Master</i> | 78 |
| 5.6.7 | Fluxograma associado ao microcontrolador <i>NodeMCU ESP32</i> | 81 |
| 5.6.8 | Túneis Ferroviários: Poupanças Energéticas associadas à implementação..... | 83 |
| 5.6.9 | Plataformas de Passageiros: Poupanças Energéticas associadas à implementação | 87 |
| 6 | Conclusões | 93 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Onda Eletromagnética [4]..... | 3 |
| Figura 2 – Espetro Eletromagnético [4]..... | 4 |
| Figura 3 – Sensibilidade do olho humano consoante o comprimento de onda característico da radiação [3]. | 4 |
| Figura 4 – Esquema Representativo: Intensidade Luminosa [3]..... | 5 |
| Figura 5 – Esquema Representativo: Iluminância [3]. | 6 |
| Figura 6 – Esquemas Representativos de Iluminância relativamente a diferentes orientações de incidência [8]..... | 7 |
| Figura 7 – Esquema Representativo dos Conceitos Luminotécnicos abordados [7]..... | 7 |
| Figura 8 – Classificação das lâmpadas utilizadas na iluminação pública [10]. | 9 |
| Figura 9 – Princípio da Emissão de Radiação Visível através de um LED [10]..... | 12 |
| Figura 10 – Esquema Representativo: Circuito de Via [33]..... | 17 |
| Figura 11 – Esquema Representativo: Sistema de Contagem de Eixos [34] | 18 |
| Figura 12 – Sensor PIR : (a) Circuito pré-amplificador(b) Vista Superior com quatro elementos piroelétricos [39]..... | 19 |
| Figura 13 – Esquema Representativo: Sensor PIR [37]..... | 19 |
| Figura 14 – Sensor PIR: Padrão típico de deteção [36]..... | 20 |
| Figura 15 – Sensor Ultrassónico: Princípio de Funcionamento [49]. | 21 |
| Figura 16 – Fluxograma correspondente a controlo em malha aberta, em função da luz natural [25]..... | 26 |
| Figura 17 – Fluxograma correspondente a controlo em malha fechada, em função da luz natural [25]. | 26 |
| Figura 18 – Iluminação Inteligente: Rodovia [101]..... | 30 |
| Figura 19 – Representação Hierárquica da constituição de um SII [109]. | 31 |
| Figura 20 – Estrutura de um sistema de iluminação público inteligente, baseado em <i>IoT</i> [110]. | 31 |
| Figura 21 – Arquitetura do sistema de controlo baseado na tomada de decisão em grupo [149]..... | 36 |
| Figura 22 – Sistema Controlo de Iluminação em Túneis Ferroviários..... | 41 |
| Figura 23 – Sistema Controlo de Iluminação em Plataformas Ferroviárias. | 42 |
| Figura 24 – Constituintes de uma Secção..... | 44 |
| Figura 25 – Formato do pacote gerado pelo protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> | 49 |
| Figura 26 – Configuração Sistema <i>MultiCeiver</i> | 50 |
| Figura 27 – Comunicação <i>slave</i> para <i>master</i> | 51 |
| Figura 28 – Comunicação <i>master</i> para <i>slave</i> | 52 |
| Figura 29 – Topologia em Árvore dos sistemas desenvolvidos. | 52 |
| Figura 30 – Representação da distribuição dos “ <i>pipes</i> ” pelos nós. | 53 |
| Figura 31 – Módulo nRF24L01+ e periféricos associados: Esquema de ligação. | 55 |
| Figura 32 – Deteção de utilizadores através de sensor PIR: Esquema de ligação. | 56 |
| Figura 33 – Módulo PWM para Sinal 0 – 10 V: Esquema de ligação..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 34 – Unidade de Controlo Local – Túnel Ferroviário: Esquema de ligação. | 58 |
| Figura 35 – Unidade de Controlo Local – Plataformas de Passageiros: Esquema de ligação. | 59 |
| Figura 36 – Unidade de Controlo Intermédia: Esquema de Ligação. | 60 |
| Figura 37 – Página HTTP para Controlo Iluminação. | 61 |
| Figura 38 – Comunicação Central de Controlo / ESP32 / <i>Master</i> | 62 |
| Figura 39 – <i>Master</i> em Túneis Ferroviários: Esquema de ligação. | 62 |
| Figura 40 – <i>Master</i> em Plataformas de Passageiros: Esquema de ligação. | 63 |
| Figura 41 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função <i>loop()</i> | 65 |
| Figura 42 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função “ <i>distancia_sensor()</i> ”. | 66 |
| Figura 43 – Identificação do estado cada secção pelo an respetivo. | 66 |
| Figura 44 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função “ <i>enviar_mensagem()</i> ”. | 67 |
| Figura 45 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função “ <i>controlo_iluminação()</i> ”. | 67 |
| Figura 46 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função <i>loop()</i> | 68 |
| Figura 47 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função <i>leitura_RF()</i> | 68 |
| Figura 48 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função <i>enviar_mensagem()</i> | 69 |
| Figura 49 – Troca de Pacotes entre as diferentes Unidades de Controlo. | 69 |
| Figura 50 – Representação gráfica de possível situação onde o comboio não é detetado. | 70 |
| Figura 51 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma associado à Interrupção do <i>Timer/Counter 1</i> | 71 |
| Figura 52 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>loop()</i> | 72 |
| Figura 53 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>leitura_estado_WIFI()</i> | 72 |
| Figura 54 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>leitura_sensores</i> <i>_comunicacaoRF()</i> | 73 |
| Figura 55 – Esquema exemplificativo relativo à determinação do sentido de movimento. | 73 |
| Figura 56 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>definição_sentido()</i> | 74 |
| Figura 57 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>valor_iluminacao()</i> | 75 |
| Figura 58 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>analise_estado_WIFI()</i> | 76 |
| Figura 59 – Túneis Ferroviários (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>enviar_mensagem()</i> | 76 |
| Figura 60 – Plataformas de Passageiros (UCL): Fluxograma da função <i>loop()</i> | 77 |
| Figura 61 – Plataformas de Passageiros (UCL): Fluxograma da função <i>controlo_iluminacao()</i> | 78 |
| Figura 62 – Plataformas de Passageiros (<i>master</i>): Fluxograma associado à Interrupção gerada no <i>Timer/Counter 3</i> | 79 |
| Figura 63 – Plataformas de Passageiros (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>loop()</i> | 80 |
| Figura 64 – Plataformas de Passageiros (<i>master</i>): Fluxograma da função <i>valor_iluminacao()</i> | 81 |
| Figura 65 – Fluxograma função <i>loop()</i> no <i>NodeMCU ESP32</i> | 82 |
| Figura 66 – Estrutura da Rede de Comunicação entre as diversas unidades, no Túnel do Juncal. | 84 |
| Figura 67 – Estrutura da Rede de Comunicação entre as diversas unidades, numa das Plataformas de Ovar. | 88 |
| Figura 68 – Hora do Nascer/Pôr do Sol, ao longo do ano. | 89 |
| Figura 69 – Número de horas estimado que o sistema opera, nos diferentes modos e consumo previsto, por mês. | 90 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Grandezas, Símbolos, Unidades e Fórmulas dos diferentes conceitos luminotécnicos..... | 8 |
| Tabela 2 – Classe das diferentes temperaturas de cor correlacionadas [7]. | 10 |
| Tabela 3 – Características Luminotécnicas: Lâmpadas de Mercúrio de Alta Pressão, Sódio de Alta Pressão e Iodetos Metálicos [9]–[12]..... | 11 |
| Tabela 4 – Características Luminotécnicas: Lâmpadas fluorescentes e de Indução [9]–[12]. ... | 12 |
| Tabela 5 – Características Luminotécnicas: LEDs [9]–[12]..... | 13 |
| Tabela 6 – Comparação entre as diferentes tecnologias de deteção de ocupação. | 23 |
| Tabela 7 – Efeito dos diferentes fatores no desempenho de um sistema baseado na ocupação [25]..... | 24 |
| Tabela 8 – Sistema de Controlo Baseado na Ocupação: Poupanças Percentuais. | 24 |
| Tabela 9 – Comparação entre <i>Daylight-linked Switching</i> e <i>Daylight-linked Dimming</i> [25]..... | 25 |
| Tabela 10 – Fatores que afetam a eficiência sistemas de controlo de iluminação, em função da natural..... | 27 |
| Tabela 11 – Sistema de Controlo Baseado na Luz Natural: Poupanças Percentuais..... | 27 |
| Tabela 12 – Poupança associada a um sistema de controlo de iluminação misto. | 28 |
| Tabela 13 – Poupanças Percentuais associadas aos três sistemas de controlo analisados. | 29 |
| Tabela 14 – Características dos protocolos de comunicação utilizados em <i>IoT</i> | 33 |
| Tabela 15 – Poupança associada à Iluminação Inteligente..... | 38 |
| Tabela 16 – Classes M de Iluminação [163]..... | 43 |
| Tabela 17 – Classes P de Iluminação [163]. | 43 |
| Tabela 18 – Comparação das velocidades de comunicação: 250kbps, 1Mbps e 2Mbps | 47 |
| Tabela 19 - Configuração da Potência RF de saída. | 48 |
| Tabela 20 – Módulo nRF24L0: Condições de Operação. | 54 |
| Tabela 21 – Módulo PWM para 0 – 10V: Condições de Operação. | 57 |
| Tabela 22 - Unidade de Controlo Local associada a Túneis Ferroviários: Componentes e Custos Associados..... | 58 |
| Tabela 23 - Unidade de Controlo Local associada a Plataformas: Componentes e Custos Associados..... | 59 |
| Tabela 24 - Unidade de Controlo Intermédia: Componentes e Preços Associados..... | 60 |
| Tabela 25 – <i>Master</i> em Túneis Ferroviários: Componentes e Preços Associados | 63 |
| Tabela 26 – <i>Master</i> em Plataformas de Passageiros: Componentes e Preços Associados | 64 |
| Tabela 27 – Configurações associadas à comunicação RF..... | 65 |
| Tabela 28 – Variação do conteúdo da variável sensores consoante a deteção do comboio por secções..... | 68 |
| Tabela 29 – Possíveis valores da variável “ <i>sentido</i> ”. | 73 |
| Tabela 30 – Principais Características do Túnel do Juncal e dos Comboios considerados..... | 83 |
| Tabela 31 – Investimento Total: Túneis Ferroviários..... | 84 |
| Tabela 32 – Características Luminária “ <i>BGP235 740 LED 50</i> ” | 84 |

| | |
|--|----|
| Tabela 33 – Valores calculados relativos ao tempo de travessia do comboio, no túnel do Juncal. | 85 |
| Tabela 34 - Potência Necessária e Energia Consumida durante a passagem de comboio..... | 85 |
| Tabela 35 – Potência Necessária e Energia Consumida no intervalo de 1 minuto após passagem de comboio..... | 86 |
| Tabela 36 – Custo Anual de Eletricidade Consumida, com a implementação do sistema de controlo, no Túnel do Juncal. | 86 |
| Tabela 37 - Custo Anual de Eletricidade Consumida, sem a implementação do sistema de controlo, no Túnel do Juncal. | 87 |
| Tabela 38 – Poupanças Energéticas e Tempo de Retorno associado à implementação do sistema de controlo inteligente, no túnel do Juncal..... | 87 |
| Tabela 39 - Investimento Total: Plataforma Ferroviária | 88 |
| Tabela 40 - Características Luminária “BGP283 LED190-4S/830” | 88 |
| Tabela 41 – Potência Necessária associada a cada Plataforma. | 89 |
| Tabela 42 – Custo Anual de Eletricidade Consumida, com a implementação do sistema de controlo, de uma Plataforma em Ovar. | 90 |
| Tabela 43 - Custo Anual de Eletricidade Consumida, sem a implementação do sistema de controlo, de uma Plataforma em Ovar. | 90 |
| Tabela 44 – Poupanças Energéticas e Tempo de Retorno associado à implementação do sistema de controlo inteligente numa das Plataformas de Passageiros de Ovar. | 91 |

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

| | |
|-------------|--|
| CRI | Índice de Reprodução de Cor |
| CSN | <i>Chip Select Not</i> |
| GUI | <i>Interface Gráfica de Utilizador</i> |
| IoT | <i>Internet of Things</i> |
| LED | Díodo Emissor de Luz |
| MISO | <i>Master In Slave Out</i> |
| MOSI | <i>Master Out Slave In</i> |
| PIR | Infravermelho Passivo |
| PRX | Recetor Primário |
| PTX | Transmissor Primário |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| RF | Radiofrequência |
| SCK | <i>Serial Clock</i> |
| SII | Sistemas de Iluminação Inteligentes |
| SPI | <i>Serial Peripheral Interface</i> |
| UCI | Unidade de Controlo Intermédia |
| UCL | Unidade de Controlo Local |

Lista de Símbolos

| | |
|-----------------------------|--|
| Ω | Ângulo sólido elementar |
| A | Área de projeção da Luz |
| λ | Comprimento de onda |
| R | Distância da fonte luminosa à superfície |

| | |
|------------------|---------------------------------------|
| Φ | Fluxo Luminoso |
| E | Iluminância |
| I | Intensidade Luminosa |
| L | Luminância |
| Q | Quantidade de Luz |
| Φ_e | Potência necessária para gerar Φ |
| Δt_{INT} | Intervalo de Tempo entre Interrupções |

1 Introdução

1.1 Contextualização e Enquadramento

Ao longo dos últimos anos, a evolução das sociedades modernas tem sido acompanhada pelo combate às alterações climáticas, implementando medidas que visam diminuir a emissão de gases com efeito estufa para a atmosfera. Dos principais impulsionadores deste combate destaca-se a União Europeia que, em conjunto com os seus estados-membros, e em concordância com o mundo científico, estudam formas cada vez mais inovadoras de dar resposta às necessidades atuais da sociedade, sem comprometer o futuro do planeta. Estas medidas começam, desde logo, por uma produção de energia de forma renovável, aproveitando os recursos solares, hídricos e eólicos provocando uma diminuição das emissões de gases poluentes para a atmosfera. No entanto, dadas as necessidades energéticas atuais, tão importante como a produção de energia de forma renovável é a implementação de medidas que promovam um consumo dessa mesma energia de forma eficiente [1].

Assim, sendo o setor dos transportes um dos principais emissores de gases para a atmosfera, diversas medidas têm sido implementadas tendo em vista a aposta de meios de transporte com emissões reduzidas. Desses meios de transporte, destaca-se o transporte ferroviário, onde se têm realizado esforços para eletrificar as linhas e substituir as luminárias antigas por luminárias mais eficientes. Associado a este investimento, os diferentes estados estão a unir esforços para modernizar a frota ferroviária, tornando os comboios mais confortáveis e rápidos, enquanto aumentam o número de ligações entre cidades de diferentes países. Por tudo isto, a União Europeia prevê um aumento da utilização do meio de transporte ferroviário, em detrimento por exemplo do transporte aéreo, trazendo assim novos desafios à infraestrutura ferroviária já existente [2].

Desta forma, devido ao aumento previsto da utilização do transporte ferroviário, torna-se imperativo uma modernização das infraestruturas envolventes à linha férrea. Neste sentido, este relatório foca-se no estudo de medidas e sistemas que permitam aumentar a eficiência energética dos sistemas de iluminação, associados a túneis ferroviários e plataformas de passageiros.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste relatório focam-se:

- Estudo das aplicações existentes no Sistema Ferroviário, que permitam a gestão da iluminação nas plataformas de passageiros e túneis ferroviários, mediante a aproximação de comboios;
- Estudo de Equipamentos que permitam levar a uma melhoria na eficiência energética no seu conjunto;
- Estudo de Propostas e medidas tecnológicas que conduzam à redução dos consumos de energia, numa atitude que favoreça de forma inequívoca a eficiência energética de forma sustentável.

1.3 Organização do Relatório

Este relatório está dividido em 6 secções, com o intuito de fornecer os conceitos teóricos e posterior análise dos sistemas de controlo de iluminação inteligentes desenvolvidos.

Primeiramente, é realizada uma breve introdução onde se descreve o enquadramento relativo ao trabalho a realizar, enumeram-se os principais objetivos a atingir e a organização do relatório.

Posteriormente, é apresentada uma secção onde são retratados os conceitos luminotécnicos essenciais para uma correta compreensão das principais grandezas físicas consideradas em projetos de iluminação.

Na terceira secção, é realizado um levantamento dos principais tipos de fontes luminosas, e características respetivas, das luminárias utilizadas na ferrovia. Além disso, é realizada uma análise a essas mesmas características, modo de funcionamento e comparação entre as diferentes tecnologias de fontes luminosas.

Na quarta secção é realizada uma análise aos diferentes sistemas de controlo de iluminação existentes na atualidade, abordando-se os seus princípios de funcionamento e enumerando-se as principais vantagens e desvantagens de cada tipo de sistema de controlo.

Na quinta secção é realizada uma análise aos dois sistemas de controlo de iluminação desenvolvidos abordando a estrutura e topologia do sistema de comunicação utilizado, constituição e componentes escolhidos e explicação das diferentes funções que constituem o código desenvolvido para cada Unidade de Controlo. Posteriormente, é realizada uma análise simulada às poupanças energéticas associadas à implementação dos dois sistemas de controlo, associados a Túneis Ferroviários e Plataformas de Passageiros.

Por fim, na última secção são apresentadas as principais conclusões.

2 Conceitos Luminotécnicos

A luminotécnica consiste no estudo da aplicação da iluminação artificial, com o objetivo de garantir o conforto, a segurança e um aumento da eficiência energética em espaços interiores e exteriores [3]. Deste modo, compreender as propriedades da luz e os conceitos básicos de luminotecnia é necessário para projetar um sistema de iluminação eficiente em plataformas e túneis de ferroviários, dado que, são essas grandezas que permitem descrever as propriedades das fontes de luz e efeitos físicos produzidos [3].

O espectro eletromagnético é o intervalo de todas as ondas eletromagnéticas existentes, caracterizadas pelas frequências associada. Estas ondas, retratadas na Figura 1, são formadas por campos elétricos e magnéticos variáveis e perpendiculares entre si. Do mesmo modo, são ondas transversais, onde a sua oscilação é perpendicular à direção de deslocamento, como é comprovado através das equações de Maxwell e através dos estudos de *Heinrich Hertz* [4].

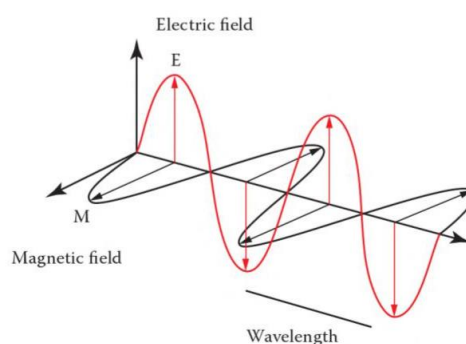


Figura 1 – Onda Eletromagnética [4].

Como se pode observar na Figura 2, a luz visível corresponde a uma pequena porção do espectro total, caracterizada por comprimentos de onda compreendidos aproximadamente entre os 380 nm e os 740 nm. Por outro lado, o espectro é constituído por ondas rádio, ondas infravermelhas, ondas ultravioleta, raio-x e raio gama [4].

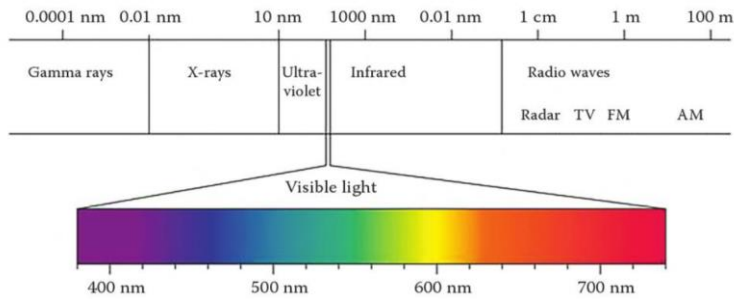


Figura 2 – Espectro Eletromagnético [4].

De seguida, são abordados os diversos conceitos luminotécnicos, associados a projetos de iluminação, com as respetivas grandezas e unidades.

2.1 Fluxo Luminoso

O Fluxo Luminoso (Φ), representado na Figura 3, descreve a quantidade total de luz visível emitida pela fonte de luz, em todas as direções. Com intuito de se considerar a sensibilidade espectral do olho, descrevendo-se assim de forma adequada o efeito ótico da fonte de luz, o fluxo luminoso é medido em lúmen (lm) [3].

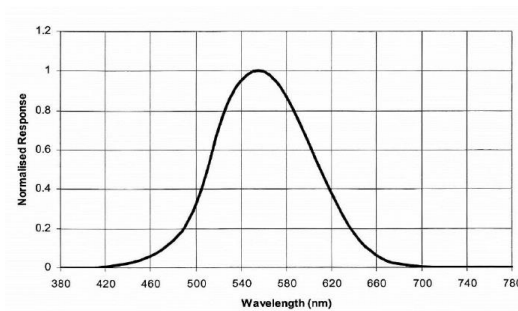


Figura 3 – Sensibilidade do olho humano consoante o comprimento de onda característico da radiação [3].

Isto difere do “fluxo radiante”, que apenas considera a potência total de luz emitida [5]. Desta forma, o fluxo radiante, consoante o comprimento de onda (λ) da radiação emitida, produz diferentes valores de fluxo luminoso. Por exemplo, se a radiação emitida possuir um fluxo radiante de 1 W, o valor máximo de fluxo luminoso será de 683 lm, quando a radiação é emitida no pico de sensibilidade espectral ($\lambda = 555 \text{ nm}$) [3].

2.2 Eficácia e Eficiência Luminosa

A Eficácia Luminosa, geralmente expressa em lmW^{-1} , descreve a relação entre o Fluxo Luminoso (Φ), emitido pela fonte de luz visível, e a potência necessária para gerar esse fluxo (Φ_e) [3], segundo a Equação 1. Se a fonte emitir radiação luminosa com o comprimento de

onda igual a 555 nm, a eficácia luminosa será próxima do valor teoricamente máximo, 683 lmW^{-1} [5]. A eficácia luminosa depende de fonte para fonte, mas nunca atinge este valor, dado que, isso significaria que toda a potência entregue à fonte seria convertida em luz visível [3]. Por outro lado, a Eficiência Luminosa, também denominada de Coeficiente Luminoso, apresenta os resultados no intervalo entre zero e um, onde o valor 1 corresponde a uma eficácia luminosa de 683 lmW^{-1} [5].

$$\text{Eficácia Luminosa} = \frac{\Phi}{\Phi_e} \quad (1)$$

2.3 Quantidade de Luz

A quantidade de luz é uma grandeza que corresponde ao fluxo luminoso emitido por uma determinada fonte de luz durante um intervalo de tempo específico, geralmente expresso em $\text{lm} * \text{s}$, cujo valor pode ser determinado através da Equação 2 [4].

$$Q = \Phi * t \quad (2)$$

, onde Q representa a Quantidade de Luz [$\text{lm} * \text{s}$], Φ representa o Fluxo Luminoso [lm] e t representa o intervalo de tempo [s]

2.4 Intensidade Luminosa

Uma fonte luminosa irradia o espaço, com uma intensidade luminosa uniforme, em todas as direções. Porém, na prática, o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente devido à forma de como a luz é direcionada. Assim, a intensidade luminosa, como representado na Figura 4, é o valor fotométrico que exprime a capacidade de um fonte de luz pontual fornecer iluminação numa determinada direção [3][6].

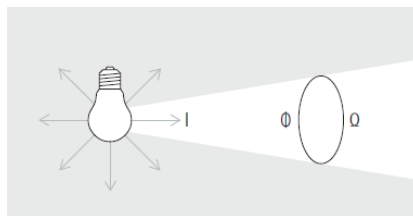


Figura 4 – Esquema Representativo: Intensidade Luminosa [3].

Em termos matemáticos, a intensidade luminosa de uma fonte pontual é definida como o quociente do fluxo luminoso elementar pelo ângulo sólido elementar (Ω) em que se propaga [6], como representado através da Equação 3. A unidade de medida da Intensidade Luminosa é a candela (cd) [7].

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (3)$$

, onde I representa a Intensidade Luminosa [cd] e Ω representa o Ângulo Sólido Elementar [sr]

O ângulo sólido elementar corresponde a uma medida na geometria tridimensional que representa a quantidade de espaço angular que a luz ocupa a partir do centro de uma esfera [7]. Por outras palavras, corresponde a uma versão tridimensional do conceito de ângulo de geometria plana, como representado através da Equação 4 [4].

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (4)$$

, onde A representa a área de projeção de luz na esfera centrada na fonte luminosa e R representa a distância da fonte luminosa à superfície onde se pretende medir a intensidade luminosa.

2.5 Iluminância

A iluminância, como representado na Figura 5, traduz o fluxo luminoso que incide numa determinada área, a uma certa distância da fonte luminosa. Esta grandeza tem como unidade o lux (lx) e pode ser calculada através da equação 5 [3].

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (5)$$

, onde E representa a iluminância (lx).

Devido à não uniformidade na distribuição da luz, o fluxo luminoso incidente não será uniforme em todos os pontos da área em análise. Por essa razão, é utilizado o conceito de iluminância média como representação média da quantidade de fluxo luminoso incidente na área em causa [3].

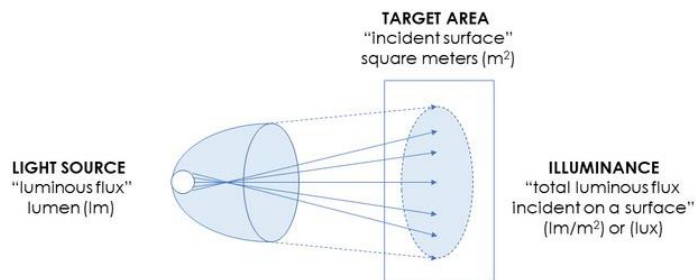


Figura 5 – Esquema Representativo: Iluminância [3].

Na iluminação pública de vias de peões e veículos, normalmente considera-se: iluminância média horizontal, iluminância média vertical, iluminância hemisférica e iluminância semicilíndrica, cujos esquemas representativos se apresentam na Figura 6 [8].

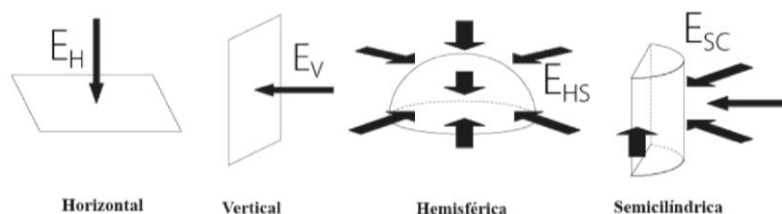


Figura 6 – Esquemas Representativos de Iluminância relativamente a diferentes orientações de incidência [8].

2.6 Luminância

Enquanto a iluminância indica o fluxo luminoso incidente em uma determinada superfície, a luminância traduz o brilho da superfície iluminada. A luminância é assim medida através do quociente entre a intensidade luminosa presente em uma superfície e a área dessa mesma superfície (A) [3], como retratado através da Equação 6.

$$L = \frac{I}{A} \quad (6)$$

, onde L representa a Luminância (cd/m^2).

Consequentemente, este fenómeno é influenciado pelo estado de adaptação do olho à iluminação existente e por fenómenos de reflexão e de transmitância provocados pela superfície em causa [3]. A Luminância é dos conceitos mais importantes em projetos de iluminação, dado que, influencia diretamente a perceção visual e o conforto da iluminação num determinado espaço. Desta forma, o controlo de forma adequada da mesma permite evitar situações de ofuscamento e criar ambientes visualmente confortáveis e funcionais [3].

2.7 Síntese das Diferentes Grandezas

Com o intuito de compreender os diferentes conceitos e grandezas luminotécnicas analisadas, é apresentada a Figura 7, que traduz graficamente os conceitos de Fluxo Luminoso, Intensidade Luminosa, Iluminância e Luminância.

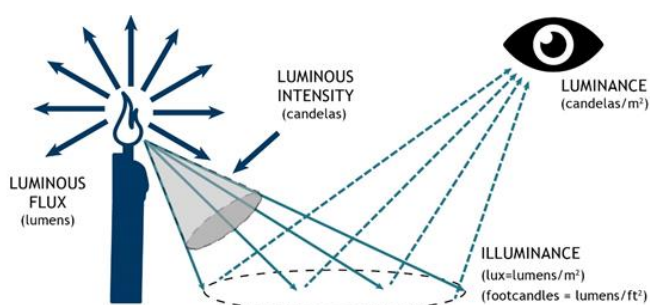


Figura 7 – Esquema Representativo dos Conceitos Luminotécnicos abordados [7].

Para complementar a informação tratada é apresentada a Tabela 1, que retrata as diferentes fórmulas necessárias para calcular o valor de cada uma das grandezas e as respetivas unidades.

Tabela 1 – Grandezas, Símbolos, Unidades e Fórmulas dos diferentes conceitos luminotécnicos.

| Grandeza | Símbolo | Unidade | Fórmula de Cálculo |
|----------------------|----------------|--|---|
| Fluxo Luminoso | Φ | Lúmen (lm) | |
| Quantidade de Luz | Q | lm * h ou lm * s | $Q = \Phi * t$ |
| Eficácia Luminosa | | Lúmen/Watt (lm/W) | Eficácia Luminosa = $\frac{\Phi}{\Phi_e}$ |
| Intensidade Luminosa | I | Candela (cd) | $I = \frac{\Phi}{\Omega}$ |
| Iluminância | E | Lux (lx) | $E = \frac{\Phi}{A}$ |
| Luminância | L | Candela/ m ² (cd/m ²) | $L = \frac{I}{A}$ |

A correta definição do valor destas grandezas possui um papel fundamental para garantir que os requisitos dos sistemas de iluminação são cumpridos, garantindo assim uma iluminação do espaço confortável para o utilizador e uma utilização segura da área a iluminar.

3 Fontes Luminosas na Iluminação Ferroviária

Apesar de um sistema de controlo de iluminação bem dimensionado permitir uma redução dos consumos energéticos, uma adequada escolha relativamente à tecnologia associada às fontes luminosas pode provocar ainda diminuição mais acentuada dos consumos energéticos da instalação, garantindo ao mesmo tempo a segurança de pessoas, bens e infraestruturas [9]. Desta forma, antes de uma análise aos diversos tipos de sistemas de controlo de iluminação existentes, nesta secção são analisadas as principais tecnologias de fontes luminosas com as respetivas características.

Uma das abordagens mais utilizadas para distinguir as diversas tecnologias é o agrupamento das mesmas segundo seu princípio de funcionamento: lâmpadas de descarga e lâmpadas de estado sólido [10]. O esquema presente na Figura 8 retrata essa mesma classificação, através das diferentes tecnologias presentes na Iluminação Pública.

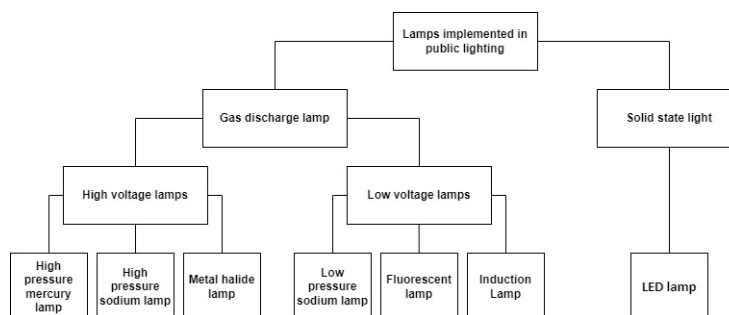


Figura 8 – Classificação das lâmpadas utilizadas na iluminação pública [10].

Além do modo de funcionamento da fonte luminosa e dos conceitos luminotécnicos analisados na secção 2, existem outros fatores que complementam a caracterização de cada tipo de lâmpada como: temperatura de cor, índice de reprodução de cor (CRI), tempo médio de vida e tempo de arranque [11].

A Temperatura da Cor, denominada também de temperatura da cor correlacionada (CCT) é dada em Kelvin (K) e indica a aparência de cor emitida pela fonte de luminosa [7]. Assim, para cores mais “quentes” os valores em kelvin serão mais baixos quando comparado com os valores de cores “frias”, como retrata a Tabela 2.

Tabela 2 – Classe das diferentes temperaturas de cor correlacionadas [7].

| Classe | CTT |
|------------|--|
| Quente | $CCT \leq 3\,300\text{ K}$ |
| Intermédio | $3\,300\text{ K} < CCT \leq 5\,300\text{ K}$ |
| Frio | $5\,300\text{ K} < CCT$ |

O Índice de Reprodução de Cor (CRI), também denominado de *Color Rendering Index*, traduz e avalia a capacidade de uma fonte luminosa reproduzir de forma fidedigna as cores do espaço iluminado, tendo em consideração o aspeto cromático desse mesmo espaço quando iluminado por uma fonte de luz ideal ou por luz solar. Este índice possui valores entre 0 e 100, sendo que, o valor máximo apenas é atingido pela luz natural. Desta forma, em ambientes cuja reprodução de cor é crítica, como áreas de pintura, design, moda, estúdios de fotografia, lojas de roupa e espaços de saúde, é necessário implementar lâmpadas com CRI mais elevado com o intuito de garantir uma maior precisão nas cores presentes [11]. O Tempo Médio de Vida de uma lâmpada traduz a duração, geralmente em horas, que uma fonte luminosa funciona dentro dos parâmetros aceitáveis de utilização e pode variar de tecnologia para tecnologia [7]. O Tempo de Arranque de uma lâmpada traduz-se no tempo que esta demora para atingir os seus níveis luminosos de funcionamento após ser alimentada e varia, inevitavelmente, com a tecnologia utilizada [7]. A consideração deste fator é importante principalmente em áreas onde se pretenda obter níveis de iluminação desejável de forma imediata, como corredores, casas de banho e áreas de trabalho [7]. De seguida, é realizada uma análise às diferentes tecnologias de fontes luminosas.

3.1 Lâmpadas de Descarga

As lâmpadas de descarga são constituídas por dois elétrodos colocados nas extremidades de um tubo de descarga que contém um gás ou um vapor metálico. A emissão de luz visível ocorre quando, aos terminais dos elétrodos, é aplicada uma tensão que desencadeia uma descarga elétrica, provocando a excitação dos eletrões e, conseqüentemente, a ionização do gás presente. Durante o processo de transição do estado de excitação para um estado estável, é irradiada energia luminosa [9].

As lâmpadas de mercúrio de alta pressão, desenvolvidas na década de 30, possuem um tubo de descarga constituído por quartzo, com o seu interior preenchido através de uma atmosfera de mercúrio e um gás inerte, onde estão imersos dois elétrodos onde se realiza a descarga. Com o intuito de isolar o tubo de descarga, este está envolvido num invólucro de vidro que é revestido interiormente com pó fluorescente. Através da utilização deste pó

fluorescente, é feita uma compensação do déficit radiações espectrais vermelhas melhorando a eficiência luminosa da tecnologia [9], [10]. O espectro de radiação emitida por esta tecnologia está maioritariamente associada aos comprimentos de onda entre os 495 nm e os 570 nm [10]. Os valores típicos associados às diversas grandezas luminotécnicas encontram-se descritos através da Tabela 3.

Por outro lado, as lâmpadas de sódio de alta pressão começaram a ser implementadas na década de 60 com o intuito de substituírem as lâmpadas de mercúrio de alta pressão. O tubo de descarga é constituído por alumina policristalina e cerâmica possuindo, no seu interior, uma mistura de mercúrio e sódio metálico e uma atmosfera de gás xénon para facilitar o arranque. As características luminotécnicas desta tecnologia, estão diretamente relacionadas com a pressão a que é sujeito o vapor de sódio no tubo de descarga. A pressão a que se atinge o valor máximo de eficiência é de 10 kPa [10]. Aumentando a pressão do gás é possível aumentar a temperatura de cor e aumentar o CRI, porém, a eficiência da tecnologia pode diminuir significativamente [10]. Para o valor de pressão de 10 kPa são apresentados, igualmente, na Tabela 3 os valores característicos associados às diversas grandezas luminotécnicas.

Por fim, associado a este segmento de lâmpadas, existem as lâmpadas de iodetos metálicos. Esta tecnologia é semelhante às lâmpadas de mercúrio de alta pressão, no entanto, no interior do tubo de descarga, para além do mercúrio, são adicionados iodetos metálicos. De igual modo, os valores associados às principais características desta tecnologia, encontram-se descritos na Tabela 3, que permite uma comparação destas três tecnologias [10].

Tabela 3 – Características Luminotécnicas: Lâmpadas de Mercúrio de Alta Pressão, Sódio de Alta Pressão e Iodetos Metálicos [9]–[12].

| Características | Mercúrio de Alta Pressão | Sódio de Alta Pressão | Iodetos Metálicos |
|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Pressão durante a descarga | 106 Pa | 10 kPa | - |
| Eficácia Luminosa | 65 lm/W | 140 lm/W | 65 - 120 lm/W |
| CRI | 40 - 60 | 20 | 65 - 90 |
| CCT | 3 500 - 4 500 K | 2000 K | 2 700 - 4500 K |
| Vida útil | 12 000 – 15 000 h | 12 000- 16 000 h | 6 000 – 12 000 h |
| Regulação de intensidade luminosa | Não permite | Difícil implementação | Difícil implementação |
| Tempo de Arranque | 5 - 7 min | 3 - 4 min | 5 min |
| Tempo de Reativação | 2 - 5 min | 2 - 5 min | 5 - 10 min |
| Custos de Instalação | Moderado | Elevado | Elevado |
| Custos de Operação | Baixo | Baixo | Baixo |

Apesar destas tecnologias serem amplamente utilizadas em aplicações exteriores existem diversos fatores que tornam estas tecnologias pouco adequadas para uma implementação de um sistema de controlo de iluminação que consiga dar resposta às necessidades atuais das instalações. Por um lado, estas tecnologias possuem elevados tempos de arranque e de reativação. Por outro, a dificuldade associada à regulação da intensidade luminosa pode não

permitir que os sistemas de controlo de iluminação respondam eficaz e dinamicamente a determinados *inputs*, como a presença de um comboio num túnel ou de pessoas em plataforma de passageiros.

Por outro lado, os sistemas de iluminação também podem ser constituídos por lâmpadas fluorescentes e de indução. De forma a tornar esta análise mais sucinta, é apresentada a Tabela 4 que apresenta os valores associados às principais características luminotécnicas, por tecnologia.

Tabela 4 – Características Luminotécnicas: Lâmpadas fluorescentes e de Indução [9]–[12].

| Características | Fluorescente | Indução |
|-----------------------------------|---------------------|--|
| Eficácia Luminosa | 50 - 100 lm/W | 60 – 80 lm/W |
| CRI | 80 | > 80 |
| CCT | 4 000 K | 2 700 - 6 500 K |
| Vida útil | 10 000 h - 16 000 h | 60 000 - 100 000 h |
| Regulação de intensidade luminosa | Possível | Não permite |
| Tempo de Reativação | Imediato | Imediato |
| Custos de Instalação | Baixos | Altos |
| Custos de Operação | Baixos | Baixos |
| Aplicações | Geral | Locais onde o acesso para manutenção é difícil |

3.2 Lâmpadas em Estado Sólido – Díodo Emissor de Luz (LED)

As Lâmpadas de Díodo Emissor de Luz (LED) são das tecnologias mais promissoras e com maior possibilidade de responder às necessidades energéticas do mundo atual. Estas, possuem um dispositivo eletrónico semicondutor com a capacidade de converter energia elétrica em radiação visível. Quando alimentado, os eletrões presentes na região “N” e as lacunas presentes em “P” são recombinadas na junção PN [10]. Nesse processo são emitidos os fotões responsáveis pela emissão da radiação visível. Este funcionamento é traduzido graficamente através da Figura 9.

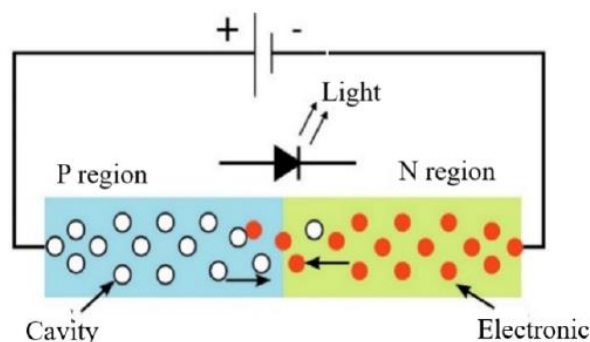


Figura 9 – Princípio da Emissão de Radiação Visível através de um LED [10].

As principais características das Lâmpadas LED são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características Luminotécnicas: LEDs [9]–[12].

| Características | LED |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Eficácia Luminosa | 100 - 200 lm/W |
| CRI | > 80 |
| CCT | 2 700 K - 7 000 K |
| Vida útil | 20 000h - 100 000h |
| Regulação de intensidade luminosa | Excelente |
| Tempo de Reativação | Imediato |
| Custos de Instalação | Moderado |
| Custos de Operação | Baixos |
| Aplicações | Todo o tipo de Aplicações |

3.3 Comparação entre as diferentes tecnologias de Lâmpadas

Cada tecnologia de lâmpada possui características específicas que permitem que estas apresentem diferentes pontos positivos e negativos. A análise para a tecnologia mais adequada a implementar deve ser realizada considerando os valores de eficácia luminosa, consumo de energia, CRI, CCT, vida útil, capacidade de regulação de intensidade luminosa, tempo de reativação e custos de instalação e operação.

Desta forma, através de uma análise comparativa às Tabelas 3, 4 e 5, é possível constatar que a tecnologia LED possui várias vantagens evidentes relativamente a outras tecnologias:

1. Elevada Eficácia Luminosa: Os LEDs comercializados atualmente podem atingir valores de eficácia luminosa de 200 lm/W o que, comparativamente com a segunda tecnologia com maior eficácia (lâmpada de sódio de alta pressão), se traduz num aumento de 60 lm/W.
2. Longa vida útil: As tecnologias mais recentes de LEDs podem atingir uma durabilidade de até 100 000 horas. Este valor representa o valor máximo de durabilidade comparativamente a todas as outras tecnologias analisadas. Desta forma, a utilização desta tecnologia pode provocar uma diminuição das ações de manutenção associadas a troca de luminárias, na infraestrutura ferroviária.
3. Índice de Reprodução de Cor Elevado: Com um CRI superior a 80, a utilização da tecnologia LED é indicada para praticamente todo o tipo de aplicações, incluindo plataformas de passageiros, onde uma correta perceção cromática da zona a iluminar é essencial para o conforto visual dos utilizadores.
4. Temperatura de Cor: A existência de LEDs com uma diversidade de temperaturas de cor de 3 000 K a 7 000 K permite que a mesma seja ajustada consoante o tipo de espaço a iluminar.
5. Elevada Capacidade de Regulação da Intensidade Luminosa: Uma elevada capacidade de regulação, associado a um tempo de reativação imediato, permite a criação de

sistemas de iluminação dinâmicos, com capacidade de resposta instantânea às necessidades luminotécnicas do local a iluminar.

Apesar de as lâmpadas de iodetos metálicos, sódio de alta pressão e fluorescentes possuírem a capacidade de regulação intensidade luminosa, as tecnologias associadas a essa regulação são de difícil de implementação. Além disso, a redução da intensidade luminosa nestas lâmpadas pode reduzir o tempo de vida útil e a eficácia luminosa das mesmas [9], [10], [12].

Deste modo, pelas razões enumeradas para sistemas de controlo de iluminação em túneis e plataformas de passageiros a tecnologia considerada mais indicada é a LED.

No entanto, é necessário referir que o custo inicial de aquisição da tecnologia pode ser mais elevado, quando comparado com outras tecnologias. Do mesmo modo é necessário ter em consideração que a temperatura ambiente pode influenciar consideravelmente o desempenho da tecnologia [10]. Desta forma, produto adquirido tem de possuir a capacidade de operar no intervalo de temperatura previsto associado à localização da plataforma ou o túnel ferroviário.

4 Sistemas de Controlo de Iluminação

A evolução dos métodos e tecnologias para a obtenção de energia de forma renovável encontram-se em constante evolução, apesar de, em algumas vertentes já se encontrarem bem consolidadas. Não obstante a essa evolução que permitiu um aumento na eficiência de produção, com o crescimento previsto da população mundial para 11,2 mil milhões em 2100, segundo as Nações Unidas [13], a procura de energia irá aumentar inevitavelmente, tornando os atuais sistemas de produção de energia renováveis insuficientes para o aumento das necessidades energéticas [14]. Consequentemente, é essencial não só uma aposta no desenvolvimento de tecnologias de produção de energia renováveis, mas também o desenvolvimento de sistemas de controlo que permitam uma utilização eficiente da energia produzida, em todas as infraestruturas da sociedade [14]. Destas, destaca-se a necessidade de implementar sistemas de controlo eficientes na iluminação pública que, segundo a União Europeia, em 2015, era responsável por 30 a 50 % dos consumos energéticos dos municípios [15].

Os sistemas de controlo de iluminação podem ser caracterizados como uma interligação de diversos dispositivos que regulam a operação do sistema de iluminação, em resposta a um determinado sinal externo [16]. Estes possuem como principal objetivo uma resposta dinâmica às necessidades existentes, tendo em conta o conforto visual e a segurança, tanto do utilizador como do local a iluminar, através do menor consumo de energia possível. Desta forma, para um funcionamento eficiente destes sistemas, é essencial que estes consigam responder à imprevisibilidade de utilização do espaço a iluminar, variação das condições atmosféricas, fuso horário e variação do número de horas de sol ao longo do ano [17].

Associado a uma melhor eficiência, um sistema de controlo de iluminação para exterior bem dimensionado permite um aumento da segurança rodoviária e de pedestres [18]. Na Europa, cerca de 22% de todos os acidentes registados envolvem pedestres e a maioria deles ocorrem em zonas cuja iluminação é insuficiente ou inexistente [19]–[22]. Desta forma, é essencial que os sistemas de controlo permitam uma iluminação adequada, garantindo a correta deteção de pedestres, veículos e obstáculos [20].

Apesar das vantagens inerentes à utilização de sistemas de controlo que permitam uma resposta dinâmica às necessidades da instalação, a sua implementação ainda não se encontra massificada. Por exemplo, nos Estados Unidos da América em 2014, apenas 3,9% da iluminação exterior era controlada através da luz natural [23] e menos de 1% através da ocupação. Em contraste com os 11% de iluminação interior que é controlado através da ocupação [24]. Estes dados permitem observar a falta de investimento na implementação de soluções de controlo de iluminação eficientes, para exterior, quando comparado com a aplicação para interiores [23].

Desta forma, nas subsecções seguintes são apresentados os principais tipos de controlo de iluminação, que podem ser utilizados na iluminação pública, onde se apresentam as principais características e tecnologias utilizadas pelos mesmos.

4.1 Controlo em função de horários pré-definidos (*Time scheduling*)

Os sistemas de controlo com base em horários pré-definidos são os sistemas mais utilizados atualmente na iluminação de exterior e permitem a alimentação das luminárias em tempos de operação fixos [14],[23]. Estes sistemas são especialmente úteis quando a ocupação de uma determinada zona é previsível, como por exemplo, salas de aula, salas de espetáculos, entre outros [16],[25]. Do mesmo modo, apesar de em algumas situações não ser o sistema mais adequado, devido ao seu baixo custo de implementação é amplamente utilizado na iluminação exterior [23], incluindo na infraestrutura rodoviária e ferroviária [23],[26].

No entanto, para melhorar a eficiência deste sistema de controlo, surgiram os relógios astronómicos que, através das coordenadas geográficas do local a iluminar (pré-programadas ou obtidas via GPS), permitem ao sistema prever a hora do nascer e do pôr do sol e assim controlar a iluminação [26],[27]. Destes, existem sistemas mais avançados que permitem uma regulação da intensidade da iluminação variável mediante o horário de utilização da instalação. Desta forma é possível reduzir a intensidade da iluminação em horários onde se presume que não existe presença de utilizadores e veículos. No entanto, sendo esta regulação baseada em dados estatísticos o sistema torna-se suscetível às mais variadas falhas, associadas à falta de capacidade de o sistema responder de forma dinâmica às necessidades momentâneas do local [25],[26].

4.2 Controlo da Iluminação em função da Ocupação

O controlo de fontes luminosas com base na ocupação da zona a monitorizar é das abordagens mais utilizadas em locais onde a ocupação é pouco frequente ou irregular [25], [28]. Apesar de a sua aplicação em zonas exteriores ser bastante reduzida é essencial a compreensão do seu modo de funcionamento, assim como dos sensores utilizados, para o dimensionamento de um sistema de controlo dinâmico, aplicado em túneis e plataformas de passageiros.

Este tipo de sistemas utiliza um conjunto de sensores que detetam o movimento ou a presença de pessoas e ajustam automaticamente a iluminação conforme as necessidades momentâneas do local [29], [30]. Apesar da possibilidade de implementação deste sistema de controlo permitir a utilização de várias tecnologias de sensores, o algoritmo utilizado permanece praticamente idêntico em todas as abordagens [25]. Se não for detetada a presença de ocupantes na zona a monitorizar, um *timer*, cujo tempo é definido aquando do dimensionamento do sistema de controlo, inicia a contagem. No final da contagem, é verificado se a zona se encontra desocupada. Se sim, são enviados os sinais necessários para desligar ou diminuir a intensidade da iluminação. Por outro lado, se durante este período for detetada a presença de utilizadores, são desencadeadas as ações necessárias para ligar a iluminação [29].

Na Ferrovia Portuguesa, apenas existem dois sistemas de permitem a deteção da presença do comboio na linha. No entanto, a utilização dos mesmos não é destinada a controlo de iluminação, mas sim ao controlo da sinalização existente, como por exemplo semáforos. Desta forma, nos pontos seguinte é realizada uma análise a esses dois tipos de sistemas, modos de funcionamento e possíveis alternativas.

4.2.1 Sistemas de Deteção de Comboios na Ferrovia Portuguesa

4.2.1.1 Sistema de Circuito de Via (*Track Circuit*)

A utilização de Sistemas de Circuito de Via permite detetar a presença do comboio num determinado segmento da linha, através de seções de carris eletricamente isoladas, onde a presença de um comboio dita alterações na corrente elétrica que atravessa os carris. Num dos limites da zona a monitorizar é colocado um dispositivo de deteção, normalmente um relé que, quando o segmento de linha se encontra desimpedido, fica energizado devido à corrente que circula nos carris, como se observa em “A” através da Figura 10 [31], [32]. Através da energização do relé, confirma-se a ausência de um comboio na linha. Por outro lado, quando o comboio atravessa a secção monitorizada, a maioria da corrente elétrica flui pelas rodas e os eixos metálicos do comboio, ficando o sistema em curto-circuito, como se observa em “B”, através da Figura 10 [31], [32]. Desta forma, a corrente elétrica que flui sobre o relé é insuficiente para o manter energizado, mudando por isso para o estado de desenergizado. Assim, esta mudança de estado informa o sistema de sinalização que a via se encontra ocupada [31].

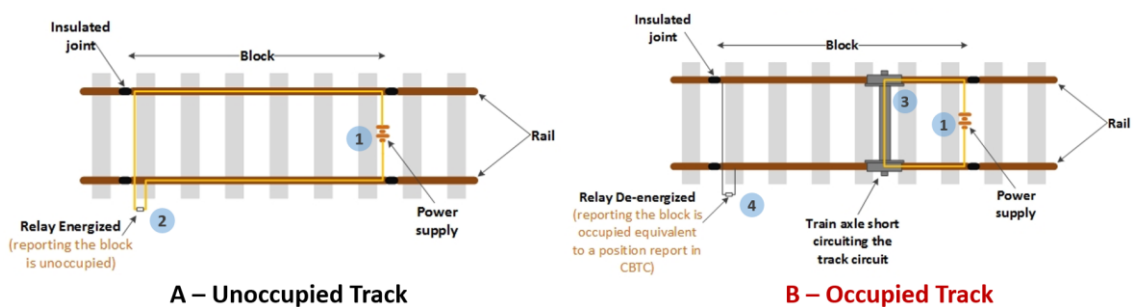


Figura 10 – Esquema Representativo: Circuito de Via [33].

Este princípio de funcionamento permite que qualquer curto-circuito provocado no sistema seja sinalizado, não permitindo a passagem de comboios enquanto essa informação permanecer [31].

4.2.1.2 Sistema de Contagem de Eixos

Os mecanismos de contagem de eixos, representando na Figura 11, são projetados para contar os eixos dos comboios e geralmente são instalados aos pares. Consequentemente, este esquema de instalação permite definir um ponto de entrada e um ponto de saída, normalmente distanciados por vários quilómetros. Para isso, os pedais são instalados muito próximos dos carris [34]. No ponto de entrada, cada roda do comboio irá pressionar o pedal e incrementar um valor no contador de eixos, aumentando esse valor até o veículo entrar todo na zona considerada. Quando o comboio atinge a zona de saída, os eixos são novamente contados, sendo que, apenas se considera que o comboio saiu na totalidade, da zona a monitorizar, quando todos os eixos contados na entrada forem totalmente contados à saída [34].

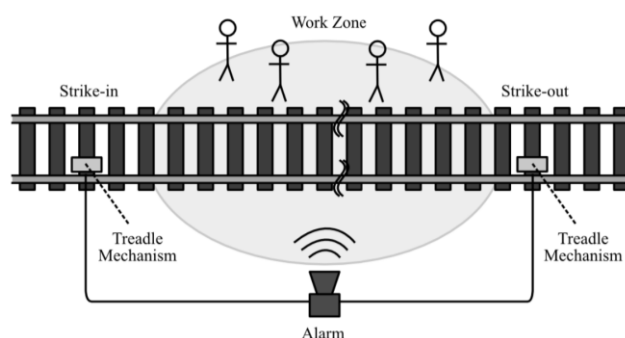


Figura 11 – Esquema Representativo: Sistema de Contagem de Eixos [34]

No entanto, pelo facto de estas tecnologias serem pouco utilizadas para controlo de iluminação, no ponto seguinte é realizada uma análise a várias tecnologias de sensores implementadas para o controlo de iluminação exterior em cidades inteligentes, que possuem a capacidade de detetar a presença de pedestres e veículos, como o comboio [35].

4.2.2 Alternativas às tecnologias existentes

4.2.2.1 Sensores de Infravermelho Passivos (PIR)

O sensor PIR é caracterizado pela capacidade de emissão de um sinal de controlo quando é detetada uma variação na radiação infravermelha (emitida pelos corpos em movimento), no campo de visão do sensor [36]–[39]. Os principais componentes dos sensores PIR são os sensores piroelétricos, cuja representação se encontra na Figura 12 (b), as lentes de *Fresnel*, um filtro ótico, um comparador e um amplificador [37].

Através do efeito fotoelétrico, quando existe uma variação de radiação infravermelha é gerada uma corrente pelos elementos piroelétricos proporcional a essa variação de radiação [36]. Este sinal, é canalizado para a entrada de um circuito pré-amplificador, Figura 12 (a), onde

irá ser amplificado com o objetivo de ser processado com uma maior eficácia nas etapas subsequentes do sistema [39].

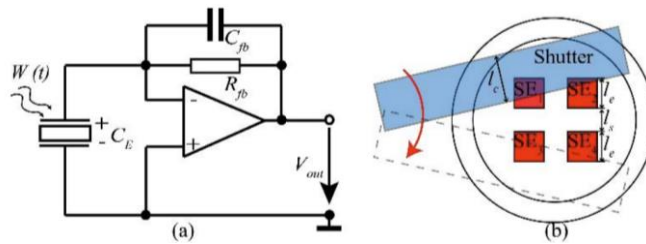


Figura 12 – Sensor PIR : (a) Circuito pré-amplificador (b) Vista Superior com quatro elementos piroelétricos [39].

De seguida, este sinal amplificado é filtrado, com o intuito de remover possíveis ruídos, e, através de um comparador, é verificado se esse mesmo sinal, gerado inicialmente através do elemento piroelétrico, tem uma amplitude de saída magnitude suficiente para concluir se existem utilizadores na zona a monitorizar [39]. Pelo facto do sensor não necessitar de emitir qualquer de sinal para o “exterior” para detetar a presença de um corpo emissor de radiação infravermelho, é denominado de sensor “passivo” [36],[40]. Para uma melhor compreensão do funcionamento deste sistema, é apresentado na Figura 13 um sensor PIR constituído por dois elementos piroelétricos. O sensor é dividido em duas ranhuras, pertencentes cada uma delas a um elemento piroelétrico, com polaridades opostas. Desta forma, quando nenhum dos elementos deteta uma fonte de radiação infravermelha, a saída do sensor é zero. À medida que o corpo humano entra na zona de deteção do sensor, os elementos piroelétricos devolvem um valor de tensão proporcional à radiação infravermelha que cada um deles está a absorver. Estes sinais são posteriormente amplificados e são entregues a um comparador que compara as tensões dos diferentes elementos, gerando uma tensão à saída do sensor [37]. Este sinal é interpretado pelo sistema de controlo que irá desencadear as ações necessárias para controlar a iluminação do local.

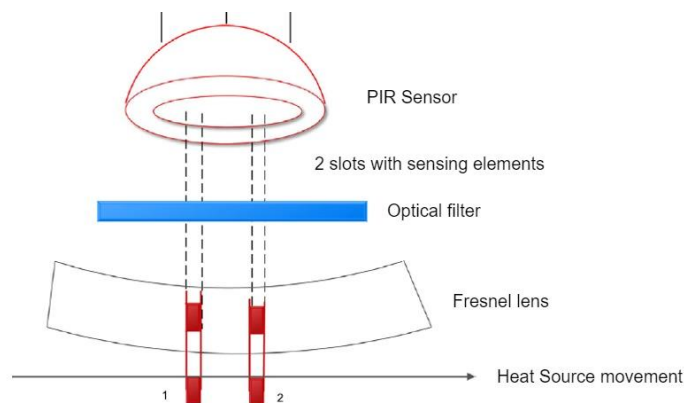


Figura 13 – Esquema Representativo: Sensor PIR [37].

Através da utilização de lentes de *Fresnel* é possível aumentar a eficiência do sistema a curtas distâncias, já que permite a absorção de radiação infravermelha de diferentes áreas da zona a monitorizar, por parte dos elementos piroelétricos. No entanto, a sensibilidade do

sensor tem tendência a diminuir à medida que a distância entre o corpo e o sensor aumenta. Tal facto é justificado pelo aumento das lacunas entre as zonas de deteção com o aumento da distância, como verificado através da Figura 14. Desta forma, a probabilidade do sensor detetar movimentos menos pronunciados diminui com o aumento da distância [39].

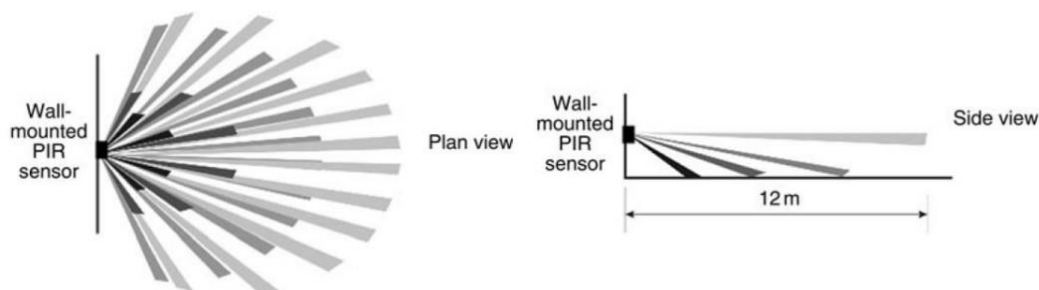


Figura 14 – Sensor PIR: Padrão típico de deteção [36].

Atualmente, os sensores existentes conseguem detetar até uma distância de 4,5 metros movimentos de mãos, até 6 metros movimentos da parte superior do tronco e braços e até cerca de 12 metros movimentos de corpo inteiro [36]. Pelo facto do modo de funcionamento do sensor ser baseado na absorção da radiação infravermelha, emitida pelo corpo humano, na zona a monitorizar não podem existir barreiras que obstruam a passagem dessa radiação sob pena de se gerar falsos negativos [36].

Estes dispositivos têm a particularidade de possuir resposta rápida, baixo custo, baixo consumo de energia e um desempenho confiável [37]–[39], [41]. No entanto, mediante a posição do corpo na área a monitorizar, se o movimento for realizado na área de uma das lacunas provocam-se falsos negativos que geram oscilações desconfortáveis na iluminação [39]. Para monitorização de zonas onde circulem veículos, é de realçar a sua incapacidade de deteção dos mesmos quando estes circulam a altas velocidades. Contudo, é dos dispositivos com melhores resultados em situações adversas [42]–[47].

4.2.2.2 Sensores Ultrassónicos

Os sensores ultrassónicos são outra alternativa utilizada para controlar a iluminação através da ocupação, porém estes possuem características diferentes quando comparadas com os sensores PIR [48]. Desde logo, esta tecnologia é agrupada no grupo dos dispositivos “ativos” devido à necessidade de emitirem uma onda ultrassónica para detetar a presença de utilizadores e veículos [36]. O sensor ultrassónico é constituído principalmente por um emissor, que tem a função de emitir uma onda sonora com frequências entre os 25 kHz e os 40 kHz, e um recetor, que irá receber essa mesma onda refletida. O princípio de funcionamento do sensor, cuja representação geral é apresentada na Figura 15, está diretamente relacionado com a forma de como a onda refletida é analisada.

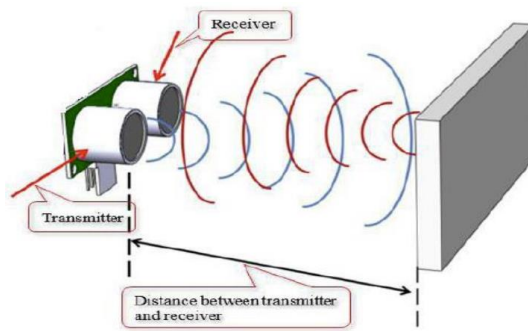


Figura 15 – Sensor Ultrassônico: Princípio de Funcionamento [49].

Uma das metodologias utilizadas para detetar movimento tem como base o Efeito de *Doppler*. Com base neste efeito, é feita uma comparação do comprimento de onda do sinal emitido com o sinal recebido no recetor. Quando a onda sonora é refletida num corpo estacionário, é rececionada no sensor com o mesmo comprimento de onda de quando foi emitida. Por outro lado, quando a onda é refletida num corpo em movimento é recebida no recetor com um comprimento de onda diferente do original [25]. Desta forma, é possível ao algoritmo determinar se na zona a iluminar estão presentes utilizadores através dos seus movimentos.

Outra metodologia utilizada não consiste diretamente na deteção do movimento, mas sim na constante medição da distância que o objeto ou corpo se encontram do sensor. Com base no tempo que a onda ultrassônica percorre o espaço, desde a sua emissão até à sua receção, é possível calcular a distância a que o objeto se encontra do sensor, como apresentado através da equação 7 [48], [50]–[53]. Através da distância, o algoritmo realiza as ações necessárias para interpretar se o valor calculado corresponde à entrada de um corpo na zona monitorizada e realiza as ações necessárias para controlar a iluminação [48].

$$distância = v_{som} * \frac{\Delta t}{2} = 0,0343 \frac{cm}{\mu s} * \frac{\Delta t}{2} \approx \frac{\Delta t}{58} \quad (7)$$

Vários autores consideram que os sensores ultrassônicos são mais eficazes no processo de deteção de veículos em movimento, comparativamente aos sensores PIR [36]. Apesar disso, qualquer movimento de um corpo, como por exemplo uma folha, pode provocar falsos positivos ligando a iluminação sem a presença de qualquer veículo na área monitorizada. Desta forma, é importante colocar o sensor numa posição que diminua a possibilidade de ocorrência de falsos positivos. Outra diferença significativa, como se observa na Figura 14, nos sensores PIR os movimentos são detetados à medida que o corpo vai entrando nas diferentes zonas de deteção, ao passo que, a área de deteção dos sensores ultrassônicos é contínua, não existindo a presença de lacunas entre as zonas de deteção. Porém, tal como nos sensores PIR, a sensibilidade dos sensores ultrassônicos vai diminuindo com a distância devido ao enfraquecimento das ondas refletidas [36]. Devido à fiabilidade dos sensores ultrassônicos na deteção de objetos a curtas distâncias, esta tecnologia é utilizada maioritariamente, por

exemplo, para detetar a proximidade de obstáculos no estacionamento de automóveis e deteção de pessoas em ambientes fechados [17].

4.2.2.3 Sensores Micro-Ondas

Os sensores micro-ondas possuem um funcionamento idêntico aquele que foi apresentado primeiramente pelo sensor ultrassónico na medida em que utilizam a variação da frequência do sinal emitido (normalmente 10 GHz) para detetar a presença de movimentos na zona onde se pretende controlar a iluminação [36], [40], [54]–[57]. Comparativamente aos sensores PIR e ultrassónicos, possuem uma distância de deteção consideravelmente maior, 60 metros, o que permite que estes sejam utilizados para aplicações de exterior, como deteção de veículos em estradas de várias faixas. Por outro lado, devido ao seu modo de funcionamento estar associado à emissão de ondas micro-ondas, estes conseguem detetar movimentos através de materiais não metálicos, como plásticos e tijolos, tornando o sistema suscetível a falsos positivos [55].

4.2.2.4 Outras tecnologias utilizadas

Para além das tecnologias anteriormente mencionadas que são consideravelmente mais utilizadas, é importante referir que existem outras tecnologias no mercado que podem ser utilizadas no controlo da iluminação através da ocupação. Destas destacam-se os sensores acústicos, as barreiras de luz e as câmaras de videovigilância [36].

Os sensores acústicos são tecnologias que, tal como os sensores PIR, são denominados de passivos e imitem um sinal de saída consoante a presença de ruído não relacionado com a voz humana. Devido à alta sensibilidade destes sensores é comum a deteção de ruídos que não são relacionados com a zona a monitorizar gerando frequentemente falsos positivos. Desta forma, esta tecnologia é raramente aplicada sozinha, sendo principalmente utilizada em complemento com outras tecnologias, maioritariamente em instalações industriais ou armazéns [36].

As barreiras de luz são uma tecnologia que, através de um emissor, emitem um feixe de radiação infravermelha que deve ser recebido pelo recetor quando não existe a presença de pessoas no local. Quando ocorre a passagem de um objeto ou pessoa pelo feixe, este é interrompido e é sinalizada a ocupação. Apesar de raramente ser utilizada para detetar a ocupação de pessoas com o intuito de controlo de iluminação, esta tecnologia é utilizada maioritariamente em instalações industriais para proteção dos trabalhadores contra lesões e em sistemas de segurança contra intrusos [36],[58]–[59].

Como analisado nas tecnologias anteriores, todas possuem uma determinada probabilidade de gerar falsos positivos ou falsos negativos no processo de deteção de ocupantes e veículos. Desta forma, vários investigadores têm estudado as potencialidades da implementação de câmaras de videovigilância para aumentar a eficiência dos sistemas de controlo de iluminação [25]. No entanto, devido à elevada complexidade e quantidade de informação que necessita de ser filtrada para permitir um controlo eficaz da iluminação, este sistema ainda se encontra em desenvolvimento. Neste sentido, e associado ao facto desta tecnologia possuir um preço de aquisição elevado, estes sistemas são raramente utilizados para controlo de iluminação [36].

4.2.2.5 Comparação entre as diferentes tecnologias utilizadas para deteção de ocupação

Realizada a análise às diferentes tecnologias utilizadas para detetar a ocupação de uma determinada zona, na Tabela 6, é apresentada uma análise comparativa entre as mesmas.

Tabela 6 – Comparação entre as diferentes tecnologias de deteção de ocupação.

| Tipo de sensor | Número de Ocupantes | Identidade dos Ocupantes | Localização Exata do Ocupante | Ocorrência Falsos Negativos | Ocorrência Falsos Positivos | Preço Inicial |
|------------------|---|--------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------|
| PIR | Não | Não Detetada | Não | Sim | Não | Baixo |
| Ultrassónico | Sim (dependendo da metodologia utilizada) | Não Detetada | Sim (dependendo da metodologia utilizada) | Não | Sim | Baixo |
| Micro-Ondas | Não | Não Detetada | Não | Sim | Não | Baixo |
| Acústico | Não | Não Detetada | Não | Não | Sim | Baixo |
| Barreiras de Luz | Não | Não Detetada | Não | Não | Sim | Baixo |
| Videovigilância | Sim | Detetada | Sim | Não | Não | Elevado |

4.2.3 Classificação dos sistemas de controlo em função da ocupação

Mediante o tipo de ações que são desencadeadas pelo sistema para controlar a iluminação, é possível dividir sistemas de controlo de iluminação através da ocupação em *motion-based switching* e *motion-based dimming* [25].

O sistema classificado como *motion-based switching* permite ligar e desligar a iluminação consoante a presença ou não presença de ocupantes. Aquando da presença de ocupantes, a iluminação é ligada e mantida nesse estado durante um determinado intervalo de tempo denominado de *time delay*. Este intervalo de tempo deve ser corretamente ajustado às necessidades do local e influencia diretamente a eficiência energética da instalação [25], [30]. Por outro lado, o sistema classificado como *motion-based dimming* permite um controlo gradual da intensidade de luz emitida pelas fontes luminosas consoante a ocupação. Normalmente, este sistema é aplicado quando, por questões de segurança, não se pretende desligar completamente a iluminação. Por outro lado, em algumas aplicações o facto de a intensidade luminosa ir aumentando progressivamente, quando a ocupação é detetada, permite ao utilizador um maior conforto visual [36].

Comparativamente ao sistema de *switching*, o *motion-based dimming* tende a possuir eficiências mais baixas e o preço de instalação é mais elevado por necessitar de reguladores de fluxo para um correto funcionamento [25].

4.2.4 Fatores que afetam a eficiência do sistema de controlo com base na ocupação

Os sistemas de controlo de iluminação com base na ocupação possuem determinados fatores que, se não forem tidos em conta no dimensionamento do sistema, podem diminuir a eficiência do mesmo. Primeiramente, para existir um bom desempenho dos sistemas de controlo em função da ocupação, é necessário que haja uma compreensão adequada relativamente ao padrão de ocupação que a zona de controlo tem habitualmente [25]. Os sistemas de controlo em função da ocupação, possuem eficiências mais elevadas quando implementadas em zonas onde a ocupação é irregular ou pouco frequente. Por outro lado, é necessário determinar qual a distância de deteção pretendida dos sensores, a localização dos mesmos e o *time delay* mais adequado [36]. Na Tabela 7 são apresentados os principais efeitos no desempenho do sistema de iluminação em função destes parâmetros.

Tabela 7 – Efeito dos diferentes fatores no desempenho de um sistema baseado na ocupação [25].

| Fatores | Demasiado elevado | Demasiado baixo |
|-------------------|---|---|
| <i>Time Delay</i> | Menor poupança energética | Vida útil da lâmpada diminui devido à comutação frequente. |
| Sensibilidade | Falsos positivos devido à deteção de movimento de outras fontes que não os utilizadores | Falsos negativos levando a que as luzes sejam desligadas mesmo na presença de utilizadores. |
| Zona de Deteção | Muito abrangente | Pouco abrangente |
| | Eficiência diminui por deteção de movimentos fora da zona de controlo. | Utilizadores não detetados apesar da sua presença. |

De forma geral, um sistema de controlo com base na ocupação bem dimensionado pode provocar uma diminuição considerável do consumo de energia por parte da instalação. Apesar disso, esta poupança pode variar de instalação para instalação, dado que, esta variável depende de um número considerável de fatores, como os apresentados nesta subsecção. Na Tabela 8 é apresentado, através da análise diversos estudos, o valor percentual da poupança, que alguns investigadores obtiveram através da implementação de um sistema de controlo baseado na ocupação.

Tabela 8 – Sistema de Controlo Baseado na Ocupação: Poupanças Percentuais.

| Tipo de Espaço | <i>Time Delay</i> | Poupança Energética | Referência |
|----------------|-------------------|------------------------------------|------------|
| Escritórios | 2-20 min | 84 % - 3 % | [60] |
| | 7-15 min | 19 % - 10 % | [61] |
| | 5 - 20 min | 38 % - 28 % | [62] |
| | 15 - 20 min | 26 % - 20 % | [63] |
| | Não fornecido | 32 % (valor médio das referências) | [64]–[70] |
| Educativo | 10 min | 11 % | [61] |
| | 5 -20 min | 58 % - 52 % | [62] |

| | | | |
|--------------------------------|------------|-------------|------|
| | 5 -20 min | 60 % – 47 % | [62] |
| | - | 31 % | [66] |
| Espaços com ocupação irregular | 2 -20 min | 78 % - 46 % | [60] |
| | 5 - 20 min | 51 % – 17 % | [62] |
| Armazéns | - | 35 % | [66] |
| Alojamentos | - | 35 % | [66] |

Como verificado através da Tabela 8, diferentes valores de *time delay*, para uma mesma instalação, traduzem-se em poupanças energéticas diferentes. Apesar de nos estudos analisados as poupanças variarem entre os 3 % aos 84 %, estudos mais alargados consideram que a poupança média associada à implementação de sistemas de controlo baseados na ocupação é de 30% [36].

4.3 Controlo da Iluminação através da Luz Natural

Os sistemas de controlo através da luz natural possuem a capacidade de regular, ligar ou desligar a iluminação autonomamente em função da luz natural existente [23], [24]. No caso de o sistema de iluminação estar associado a espaços comuns ao ar livre, como estacionamento, estradas e parques, a configuração mais adequada corresponde ao método que comuta entre o estados ligado e desligado, denominado de *Daylight-linked Switching* [71], [72]. Esta configuração permite não só que a luz seja automaticamente desligada durante o dia como torna desnecessário a implementação de um sistema baseado em horários pré-definidos. Por outro lado, se a utilização deste sistema de controlo se destinar para aplicações interiores, a aplicação considerada mais eficiente centra-se na regulação constante da intensidade da iluminação artificial através de reguladores de fluxo, ajustando a iluminação à medida que a intensidade da luz natural varia [25]. A este método é dado o nome de *Daylight-linked Dimming*. Apesar do sistema de *dimming* fornecer um maior conforto visual, o preço de aquisição e implementação é mais elevado, tornando-se um fator importante que distingue as duas abordagens [72]. Na Tabela 9 é apresentada uma comparação entre as mesmas.

Tabela 9 – Comparação entre *Daylight-linked Switching* e *Daylight-linked Dimming* [25].

| Fatores | <i>Switching</i> | <i>Dimming</i> |
|----------------------------|---|--|
| Condições de Luz Natural | Ao longo do dia, a contribuição de luz natural é significativa e consistente. | As condições de luz natural são variáveis ao longo do dia. |
| Atividade dos Utilizadores | O comportamento dos utilizadores não é estacionário, como em áreas de circulação. | Ambiente de trabalho, como escritórios, onde por norma a movimentação dos utilizadores está condicionada ao local de trabalho. |
| Vantagens | Elevada eficiência em zonas onde a luz natural é significativa e consistente. | Elevada eficiência em ambientes de luz natural variável. |

| | | |
|--------------|--|---|
| | Custo da instalação reduzido comparativamente a sistemas reguláveis. | Conforto visual mais elevado devido à mudança gradual entre níveis de luz. |
| | Instalação relativamente fácil. | Precisão elevada. |
| Desvantagens | Precisão mais baixa. Mudanças proeminentes no estado de iluminação podem diminuir o nível de aceitação das pessoas. | Custo inicial elevado. Requer manutenções de ajuste do sistema para um desempenho ideal. |

Além da classificação que pode ser dada aos diferentes métodos de controlo, como analisado anteriormente, é possível dividir os sistemas de controlo com base no algoritmo utilizado: em malha aberta ou em malha fechada [73], [74]. No controlo em malha aberta, quando determinado o valor de iluminância natural existente, é enviado um sinal para o controlador com o intuito de que este forneça uma saída que permita uma iluminação adequada do local [16], [75], [76], como representado na Figura 16.

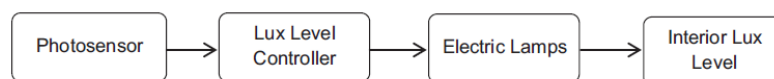


Figura 16 – Fluxograma correspondente a controlo em malha aberta, em função da luz natural [25].

O controlo em malha fechada determina, de forma continua, não só os níveis de iluminância da luz natural, mas também de iluminância artificial, utilizando do sensor fotossensível [16], [74]. Posteriormente, através do sistema de realimentação, o controlador controla as luminárias de acordo com uma comparação entre o valor medido pelo sensor e o valor de iluminância que se pretende obter [71], [75], [76]. Com base nesta comparação, o controlador envia o sinal necessário para se obter uma iluminação com as características que mais se ajustam às necessidades do local [25], como representado na Figura 17.

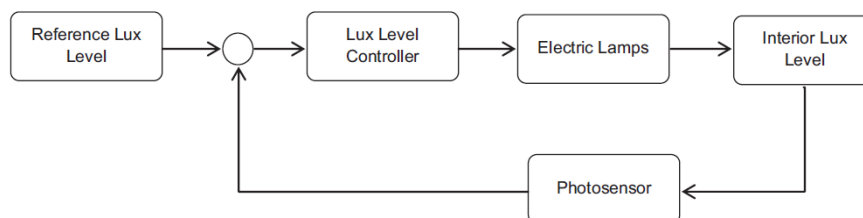


Figura 17 – Fluxograma correspondente a controlo em malha fechada, em função da luz natural [25].

Normalmente, para uma única zona de controlo ou áreas relativamente pequenas, tais como escritórios privados, a utilização de um circuito em malha fechada pode ser mais adequada. Em contraste, quando se pretende controlar várias zonas, ou uma zona mais abrangente, como é o caso das plataformas de passageiros, utilizando apenas um sensor, o circuito em malha aberta pode ser mais eficaz [25].

4.3.1 Fatores que afetam a eficiência do sistema de controle com base na luz natural

Apesar do custo inicial mais elevado em comparação com os sistemas de controle baseado na ocupação, o controle da iluminação em função da luz natural pode ser economicamente viável [25], devido ao seu elevado valor de poupança energética. Porém, para uma implementação correta e eficiente deste sistema, é necessário o estudo da zona de controle e dos níveis de ocupação da mesma [71], [77]. Na Tabela 10 são apresentados os principais fatores que afetam a eficiência dos sistemas de controle de iluminação, em função da luz natural, em zonas exteriores.

Tabela 10 – Fatores que afetam a eficiência sistemas de controle de iluminação, em função da natural.

| Fatores | Justificação |
|------------------------------|---|
| Disponibilidade de Luz Solar | Diferentes condições climáticas provocam uma variação na disponibilidade de luz natural. Desta forma, como as condições climáticas dependem do local, para avaliar a disponibilidade de luz natural é necessário ter em consideração a localização e a posição geográfica da instalação [25], [78]. |
| Obstáculos | Árvores, edifícios adjacentes e outras estruturas podem obstruir a passagem de luz natural [25]. |
| Posicionamento dos Sensores | Sensores colocados em zonas que não traduzem a iluminância natural do local têm como consequência uma comutação entre estado ligado/desligado inadequado [25], [77]. |
| Níveis de comutação | Os níveis de comutação devem ser bem configurados e incluídos num intervalo de valores, garantindo que não existem comutações entre estados perturbadoras para os utilizadores [25]. |

4.3.2 Poupanças associadas ao sistema de controle com base na luz natural

Existem vários estudos com o intuito de determinar as poupanças energéticas da implementação de sistemas de controle com base a luz natural. Apesar de os sistemas se basearem nos mesmos alicerces fundamentais, fatores como a zona a monitorizar, o tipo de ocupação, utilização de diferentes métodos e algoritmos, permitem que haja uma grande variedade de valores relativos à poupança registada, como observado na Tabela 11.

Tabela 11 – Sistema de Controle Baseado na Luz Natural: Poupanças Percentuais.

| Tipo de Espaço | Método de Controle | Poupança Energética (%) | Referência |
|----------------|--------------------|-------------------------|------------|
| Escritórios | <i>Dimming</i> | 20% | [79] |
| | <i>Dimming</i> | 20% | [64] |
| | <i>Dimming</i> | 30% | [80] |
| | <i>Dimming</i> | 25% | [81] |
| | <i>Dimming</i> | 20% | [65] |
| | <i>Dimming</i> | 27% | [63] |
| | <i>Dimming</i> | 31% | [82] |
| | <i>Switching</i> | 30,50% | [83] |
| | <i>Dimming</i> | 50 % - 75% | [84] |

| | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|------|
| Sala de Aula | <i>Switching</i> | 23,4% - 65,3% | [72] |
| Espaço de Interior Amplo | <i>Switching</i> | 11% - 17% | [85] |
| Laboratórios | <i>Dimming</i> | 40% | [86] |
| - | <i>Dimming</i> | 55% | [87] |

4.4 Controlo de Iluminação Misto

Como retratado ao longo desta subsecção, cada sistema de controlo possui características que os distanciam uns dos outros, traduzindo-se em sistemas com diferentes vantagens e desvantagens consoante o tipo de utilização a que se destinam. Um determinado esquema de controlo pode não possuir o melhor desempenho em um ambiente com determinadas características e ter um desempenho eficiente noutras condições [25]. Assim, para colmatar eventuais desvantagens e potenciar as vantagens dos diversos sistemas, vários autores propõem uma utilização conjunta das tecnologias com o intuito de aumentar a eficiência de todo o sistema [88]. Na Tabela 12 é apresentada a poupança percentual, da aplicação de um sistema de controlo misto, em diversos estudos, onde as poupanças energéticas podem variar entre os 35% e os 69,60%.

Tabela 12 – Poupança associada a um sistema de controlo de iluminação misto.

| Tipo de Espaço | Método de Controlo | Poupança Energética | Referência |
|--------------------------|--|---------------------|------------|
| Escritório | Ocupação + Luz Natural | 46% | [63] |
| | Ocupação + Luz Natural | 68% | [65] |
| | Ocupação + Luz Natural | 49% - 63% | [89] |
| Espaço de Interior Amplo | Ocupação + Luz Natural | 47,9 % - 64,2% | [88] |
| Sala de Aula | Ocupação + Luz Natural | 69,60% | [90] |
| | H.P.Definidos + Ocupação + Luz Natural | 35 % - 42% | [91] |

4.5 Comparação entre os diferentes sistemas de controlo

Nas subsecções 4.2, 4.3 e 4.4 é realizada uma análise isolada aos principais sistemas de controlo de iluminação respetivos. No entanto, para realizar uma comparação mais precisa, é necessário comparar as poupanças associadas, relativamente a uma mesma instalação, utilizando sistemas de controlo distintos. Essa análise, pode assim ser realizada através da Tabela 13, onde são apresentados os valores de poupança utilizando diferentes sistemas de controlo, para uma mesma instalação. Dos estudos analisados, a implementação do sistema de controlo misto nas instalações permitiu sempre os maiores valores de eficiência. Por outro lado, existe uma alternância entre o sistema mais eficiente, quando se faz a comparação apenas entre o sistema de controlo baseado na ocupação e o sistema de controlo baseado na luz natural.

Tabela 13 – Poupanças Percentuais associadas aos três sistemas de controlo analisados.

| Tipo de Espaço | Método de Controlo | Poupança Energética | Comparação de Poupança | Referência |
|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Edifício Comercial | Ocupação | 30% | Misto > Luz Natural > Ocupação | [66] |
| | Luz Natural | 41% | | |
| | Misto | 45% | | |
| Edifício Comercial | Ocupação | 41% | Misto > Luz Natural > Ocupação | [92] |
| | Luz Natural | 43% | | |
| | Misto | 49% | | |
| Escritório Pequeno | Ocupação | 75% | Luz Natural > Ocupação | [93] |
| | Luz Natural | 79% | | |
| Escritório | Ocupação | 46% | Misto > Ocupação | [94] |
| | Misto | 55% | | |
| Grande Edifício Empresarial | Ocupação | 27% | Ocupação > Luz Natural | [68] |
| | Luz Natural | 26% | | |
| Conjunto de Escritórios Pequenos | Ocupação | 94% | Misto > Ocupação | [95] |
| | Misto | 95% | | |
| Edifício Educacional | Ocupação | 40% | Misto > Ocupação > Luz Natural | [28] |
| | Luz Natural | 9% | | |
| | Misto | 48% | | |

Apesar dos métodos de controlo analisados anteriormente atingirem valores aceitáveis de poupanças energéticas, o sistema mais utilizado para a iluminação exterior continua a ser através do controlo com base em horários pré-definidos e relógios astronómicos. Este facto pode ser justificado por serem os métodos que oferecem mais garantias de uma iluminação estável, e sem falhas do espaço a iluminar, apesar das menores poupanças energéticas.

O sistema de controlo baseado na ocupação e luz natural, apesar de fornecer garantias de poupanças inequívocas, a comunicação entre os diferentes sensores e zonas a iluminar é praticamente inexistente. Desta forma, na grande maioria das situações, o controlo de iluminação através da ocupação ou da luz natural apenas é utilizado para realizar um controlo com resposta uniformizada em todas as luminárias. Assim, para colmatar esta falta de comunicação entre os diferentes componentes do sistema de iluminação, surgiram os sistemas de iluminação inteligentes (SII), abordados na secção 4.6.

4.6 Sistemas de Iluminação Inteligente

Os sistemas de iluminação de exteriores tradicionais, normalmente, ligam a iluminação entre as 18 – 21 horas e desligam-na pelas 6 – 8 horas. Desta forma, a iluminação mantém-se ligada mesmo que não exista um único pedestre ou carro na via pública. Esta realidade é igualmente verificada nas plataformas e túneis ferroviários, tendo como consequência um elevado desperdício de energia, redução do tempo de vida útil das lâmpadas e necessidade de ações de manutenção em curtos períodos de tempo [42].

Assim, diversos investigadores têm estudado a implementação de SII, nomeadamente na iluminação rodoviária. Estes permitem um controlo da iluminação através de uma densa rede de sensores que, colocados em locais estratégicos, monitorizam constantemente a zona a iluminar [62], [96]. Normalmente, os sensores que constituem uma rede utilizam diversas tecnologias o que permite ao sistema responder de forma eficaz às várias alterações do meio. Por sua vez, estes sensores agrupam-se em diferentes subsistemas que comunicam entre si. Esta comunicação entre subsistemas aliada a uma maior densidade de sensores, quando comparado com os sistemas analisados anteriormente, permite uma resposta mais dinâmica e precisa às necessidades luminotécnicas do local [12], [97]–[100]. Na Figura 18 é apresentado um exemplo da implementação de um sistema de iluminação inteligente, em resposta ao movimento de um automóvel.

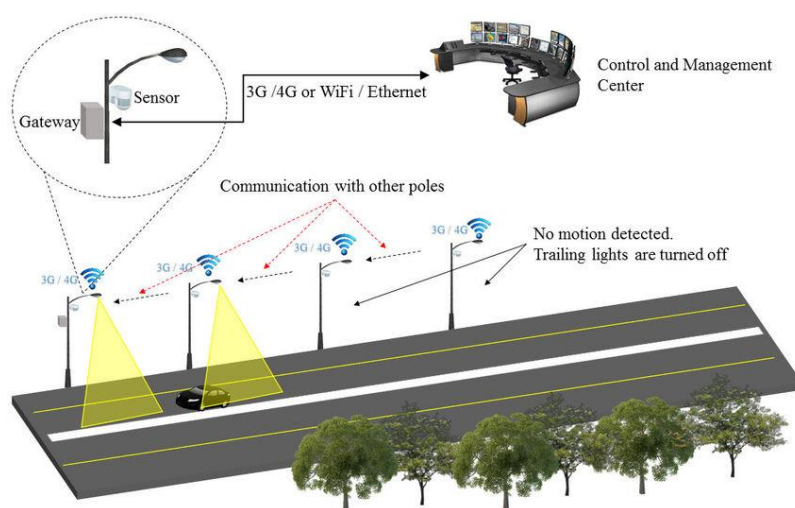


Figura 18 – Iluminação Inteligente: Rodovia [101].

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos [102], a implementação de sistemas de iluminação inteligente é inevitável pela maior precisão de controlo das fontes luminosas, o que se traduz em maiores poupanças energéticas [97]. Por outro lado, estes sistemas permitem não só a integração de sensores que são utilizados no controlo da iluminação, como também a integração de outros que fornecem informações sobre o ambiente envolvente, como sensores temperatura, humidade e poluição atmosférica [103], [104]–[107]. Consequentemente, a implementação deste tipo de sistemas representa, inevitavelmente, um impulso significativo relativamente à *Internet of Things* (IoT), com consequências diretas nos consumos associados às infraestruturas públicas [14].

Estruturalmente, para além da rede de sensores utilizada, os SII podem ser constituídos por mais dois subsistemas básicos [35], como representado na Figura 19:

- Unidade de Controlo Local (UCL): Tem a função de receber dados provenientes dos sensores instalados, através de protocolos de comunicação curto-alcance. Do mesmo modo, deve assegurar o envio dessa informação para o Centro de Controlo.

- Centro de Controlo (CC): Tem a função de receber todo o tipo de dados provenientes das UCLs e armazená-los num servidor ou na nuvem. Por outro lado, através da Central de Controlo é possível controlar a iluminação remotamente.

Os SII podem ser categorizados através de diversos tipos de arquiteturas, porém, na literatura, a que mais se destaca é a arquitetura em camadas. Esta, segundo os diversos investigadores pode conter de três a seis camadas [108]. Contudo, nesta dissertação será abordada a arquitetura de três camadas.

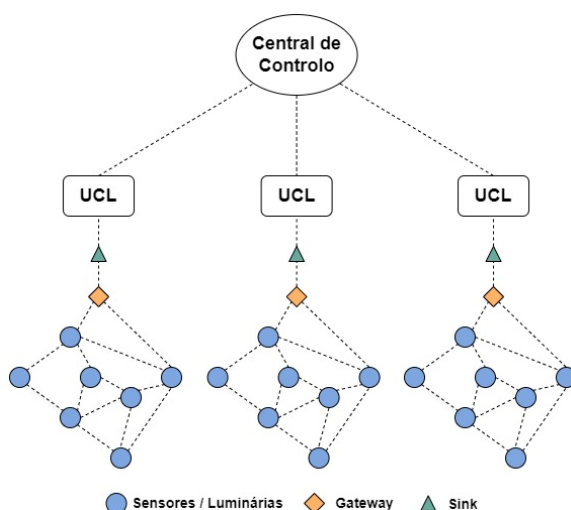


Figura 19 – Representação Hierárquica da constituição de um SII [109].

4.6.1 Arquitetura dos SII

A iluminação inteligente integra interfaces e funções que podem ser organizadas, como representado pela Figura 20, em três camadas: camada de perceção e controlo, camada de comunicação e camada de aplicação [110], [111].



Figura 20 – Estrutura de um sistema de iluminação pública inteligente, baseado em IoT [110].

A camada zero, denominada por “Things” ou “Embedded Level”, é comum a praticamente todas as arquiteturas e é constituída pelo mecanismo de iluminação ou pela própria fonte de luz, incluindo a luminária [96], [97]. A camada seguinte, denominada de “Perception & Control Tier”, inclui todos os sensores e aparelhos de controlo utilizados no sistema em causa. É através dos mesmos que é possível monitorizar e recolher informações do ambiente, em tempo real [112]. Estas informações são posteriormente enviadas através da Camada de Comunicação que

garante uma troca de dados segura entre as diversas camadas que constituem o sistema, permitindo um controlo de iluminação eficiente. Por fim, a camada de aplicação fornece uma plataforma computacional e gráfica, que pode ser acedida através da Internet, onde o gestor do sistema controla a iluminação. Do mesmo modo, e associado aos sensores presentes na instalação, esta camada também pode fornecer outros dados como: densidade de tráfego, estado de ocupação da via por pedestres, eficiência energética esperada, entre outros [113].

De seguida, é apresentada uma análise mais detalhada às diferentes camadas que constituem um sistema de iluminação inteligente.

4.6.2 Camada 1 – Nível de Perceção e Controlo

Como mencionado anteriormente, os sensores e os aparelhos de controlo necessários para uma iluminação inteligente pertencem à primeira camada da arquitetura do sistema [112], [114]. Dos sensores utilizados para o controlo de iluminação, destacam-se na literatura a implementação de sensores PIR, sensores ultrassónicos e sensores sensíveis à luz natural [110], cujo modo de funcionamento é analisado na subsecção 4.2.2. Com base na informação recolhida pelos sensores, é feita a regulação da intensidade luminosa para satisfazer as necessidades luminotécnicas do local. Geralmente, esta regulação é realizada com base na luz natural existente e presença de pedestres ou veículos, permitindo poupanças energéticas significativas [114]–[119].

Normalmente, a intensidade luminosa pode ser regulada através do método de regulação 0 – 10 V [120]. Este método, utiliza um sinal de tensão DC que varia de 0 a 10 V [117], para fornecer a luz artificial com as características que mais se adequam às necessidades. Posteriormente, este sinal é entregue ao *driver* do LED permitindo que, quando o valor for de 10 V a intensidade da iluminação é máxima e, quando for de 0 V, a intensidade da iluminação é mínima [121]. Esta regulação pode ser efetuada através do controlo de um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM), permitindo uma relação linear entre o valor de *duty-cycle* e a potência de saída da luminária [122], [123]. Por outro lado, existem autores que optam por utilizar protocolos de comunicação internacionalmente padronizados para realizar esta regulação, como por exemplo o protocolo *Digital Addressable Lighting Interface* (DALI) [124]. Através deste protocolo, cada luminária possui um endereço único, permitindo o controlo individualizado das mesmas [125]–[127].

4.6.3 Camada 2 – Nível de Comunicação

Parte do sucesso da implementação de um sistema de iluminação inteligente centra-se na eficácia de comunicação entre os diferentes componentes. Deste modo, para uma comunicação eficiente entre os diversos sensores, luminárias e sistemas de controlo é necessário definir os protocolos que garantam uma maior fiabilidade de comunicação, consoante as características do local a iluminar [35]. Além disso, o protocolo de comunicação deve satisfazer os seguintes requisitos: (1) capacidade de armazenar e gerir os dados enviados pelos diversos componentes,

(2) realizar as operações com o menor consumo de energia possível, (3) baixa complexidade de operação [35].

Na Tabela 14 são apresentadas as características relativas aos protocolos de comunicação mais utilizados na literatura, para a criação de cidades inteligentes, com base na *IoT*.

Tabela 14 – Características dos protocolos de comunicação utilizados em *IoT*.

| Tecnologia | Frequência de Operação | Taxa de Dados | Alcance | Latência | Consumo | Referências |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------|-----------|---------|---------------------------------|
| <i>ZigBee</i> | 2.4 GHz 868 MHz, 915 MHz | 250 kb/s | 50–100 m | 16 ms | Baixo | [35], [42], [128], [129], [130] |
| <i>Bluetooth</i> | 2.4 GHz | 25 kb/s | 10 m | 100 ms | Baixo | [121], [128], [131], [132] |
| <i>Wi-Fi</i> | 2.4 GHz, 5 GHz | 54 Mb/s, 6.75 Gb/s | 100-140m | 46 ms | Médio | [35], [128], [133] |
| <i>6LoWPAN</i> | 2.4 GHz, 868, 915 MHz | 250 kb/s | 100 – 200 m | - | Baixo | [35], [128], [134] |
| IEEE 802.11p | 5.85–5.925 GHz | 6 Mb/s | 1000 m | - | Baixo | [128] |
| <i>DSRC/WAVE</i> | 5.8, 5.9 GHz | 6 Mb/s | 1000 m | 200 us | Baixo | [128] |
| <i>DASH7</i> | 433, 868, 915 MHz | 55.5 kb/s, 200 kb/s | 1000 m | 15 ms | Baixo | [128] |
| <i>LoRaWAN</i> | 433, 868, 780, 915 MHz | 50 kb/s | 5 - 15 km | - | Baixo | [128], [131], [132] |
| <i>GSM/GPRS</i> | 850, 900, 1800, 1900 MHz | 80–384 kb/s | 5 -30 km | 1.5 - 3 s | Alto | [128], [135] |
| 3G | 850 MHz | 3 Mb/s | 5 -30 km | 100 ms | Alto | [128] |
| <i>LTE/LTE-Advanced</i> | 700, 750, 800, 1900, 2500 MHz | 1 Gb/s, 500 Mb/s | 5 -30 km | 5 ms | Alto | [128] |

Através da Tabela 14, constata-se que as tecnologias possuem alcances máximos que podem variar entre os 10 metros e os 30 quilómetros. Assim, é possível dividir os protocolos com base nos seus alcances em: comunicação de longo-alcance e comunicação de curto-alcance [133], [128]. A comunicação de longo-alcance é caracterizada por uma capacidade de comunicação desde algumas centenas de metros a algumas dezenas de quilómetros. Por outro lado, a comunicação de curto-alcance permite comunicações até 100 metros. Normalmente, este tipo de comunicação é utilizado entre os diversos sensores que constituem o sistema de iluminação inteligente com a unidade de controlo local pelas curtas distâncias entre os mesmos [88].

Além da informação já mencionada, é importante referir que, sendo a latência definida como o tempo de envio e processamento da informação, protocolos com latências baixas são os mais indicados para um sistema de iluminação que se pretenda com uma resposta rápida às

alterações do ambiente a monitorizar [110]. Desta forma, um protocolo como o GSM/GPRS não deve ser implementado devido ao elevado tempo que o sistema iria demorar a reagir, quando comparado com outras tecnologias. Por outro lado, considerando que o principal intuito dos sistemas de iluminação inteligente é a poupança dos consumos energéticos, deve-se evitar protocolos com consumos elevados como é o caso do *GSM/GPRS*, 3G e *LTE/LTE-Advanced*.

Realizando uma análise a outras tecnologias, a protocolo *ZigBee*, desenvolvido e mantido pela *ZigBee Alliance* [136], é utilizado nos diversos estudos para aplicações de curto-alcance, de baixo consumo e com preços de aquisição baixos. As redes criadas por esta tecnologias são denominadas de *Low-Power Wireless Personal Area Networks* (LR-WPAN) [137]. Pela baixa taxa de transmissão de dados e pelo alcance de comunicação curto, é maioritariamente usada para monitorização da informação enviada por sensores em automação residencial e indústrias inteligentes [138].

Do mesmo modo, o protocolo *Bluetooth* possui a mesma aplicabilidade que o *ZigBee*, sendo também de baixo custo e consumo. No entanto, este protocolo possui vulnerabilidades de segurança e privacidade por permitir emparelhamentos e autenticações inadequadas, sendo suscetível a ataques informáticos [139]. Consequentemente, é possível a recolha de dados pessoais e o controlo dos sistemas, a qual a tecnologia está associada, por pessoas não autorizadas. Desta forma, sendo a correta iluminação dos espaços preponderante para a segurança dos cidadãos e das infraestruturas, o uso deste protocolo pode não ser o mais adequado [140]. Por sua vez, o *Wi-Fi* é das tecnologias que permite taxas de transmissão de dados mais elevadas e oferece tempos de latência praticamente inexistentes. Além disso, possui um alcance de comunicação maior comparativamente à tecnologia *ZigBee* e *Bluetooth* [114]. Assim como o protocolo *ZigBee*, o protocolo *6LoWPAN* também permite a criação de redes *LR-WPAN*. Através do mesmo, é possível aos sensores/fontes luminosas estarem a transmitir dados enquanto recebem mensagens de controlo. Posteriormente, a correta receção dos dados é sempre sinalizada [35]. O protocolo *Long Range Wide Area Network* (*LoRaWAN*) foi introduzido no âmbito dos sistemas de iluminação inteligente nos anos mais recentes [35]. Especificamente, o esquema de modulação utilizado é o *Chirp Spread Spectrum* (*CSS*) o que permite o envio de pacotes de informação para *gateways* a vários quilómetros [141]. Pelo facto de ser uma técnica *open-source*, vários investigadores têm estudado e implementado sistemas com esta tecnologia [142]. Os resultados sugerem que esta produz resultados positivos quando aplicada em comunicações em sistema de iluminação inteligentes, e reduz os custos de manutenção e gestão do sistema [141].

4.6.4 Camada 3 – Nível de Aplicação

O Nível de Aplicação, que representa o último nível da arquitetura de um sistema de iluminação inteligente, é responsável por fornecer diversos tipos de serviços. Dos serviços fornecidos, destaca-se: (1) uma iluminação eficiente de vias de pedestres e estradas [110], (2) possibilidade de monitorizar dados ambientais do meio envolvente [101] e, por exemplo, (3) aceder a dados em tempo real sobre o horário de chegada de transportes públicos [114]. Estes

serviços podem ser acedidos através de um *smartphone* ou computador com acesso à *Internet* [110]. Por outro lado, é neste último nível que é definida a estratégia e o algoritmo de controlo a utilizar para controlo da iluminação.

4.6.5 Implementação de Sistemas de Iluminação Inteligente no Controlo de Iluminação Rodoviária

Diferentes tipos de tecnologias e metodologias são utilizados para alcançar uma iluminação eficiente, consoante os diversos autores [143]–[145]. Esta variedade, permite aos vários sistemas de controlo responder de forma diferente consoante as informações obtidas através dos sensores. Desta forma, é possível dividir os diversos sistemas presentes na literatura em: (1) Controlo da iluminação através de ações *on/off*, (2) Controlo através de iluminação adaptativa, (3) Controlo da iluminação baseado na *Web* [42]. Pela falta de estudos relativos a infraestruturas ferroviárias, neste ponto do relatório são abordados os diversos tipos de controlo de iluminação inteligente, associado a infraestruturas rodoviárias.

4.6.5.1 Controlo da iluminação através de ações *on/off*

O controlo de iluminação através de ações “*on/off*” permite que o sistema de iluminação comute entre os dois estados respetivos, consoante os dados recebidos através dos sensores da instalação.

Um trabalho interessante é apresentado em [146], através da implementação de um sistema de iluminação inteligente baseado em *IoT*. A arquitetura do sistema engloba a presença de sensores infravermelhos, um sensor LDR, um microcontrolador (PIC16F877A), comunicação UART e um módulo *Wi-Fi*. Com base nas informações fornecidas pela rede sensorial, sempre que é detetada a presença de veículos ou pedestres a iluminação é ligada na sua intensidade máxima, durante um intervalo pré-definido. Por outro lado, o estado da iluminação pode ser acedido através da *Internet* [146]. Apesar da abordagem mais comum de detetar veículos e pedestres seja através de sensores ultrassónicos e infravermelhos, existem outras abordagens que podem ser consideradas, como é o caso da deteção de veículos através de sensores de pressão. Um estudo realizado com o intuito de aumentar a eficiência energética em túneis considerou a implementação de sensores piezoelétricos para detetar diferenças de pressão à superfície da estrada. Quando ocorre a passagem do veículo sobre os sensores, uma tensão transitória é gerada e é interpretada pelo microcontrolador *ATMEGA328p* associado ao Arduino Uno. Caso a tensão gerada possua valores de magnitude aceitáveis, é acionado um relé que permite que a iluminação rodoviária seja ligada [147].

Apesar destes sistemas conseguirem reduzir significativamente os consumos energéticos, um dos problemas que lhes é associado é a incapacidade de controlo individual das luminárias. Desta forma, vários autores propõem a divisão das luminárias em diferentes grupos que comunicam entre si através de uma rede *wireless*. Um estudo proposto por *I.Lhadi et al.* [148] considera que a cada grupo de LEDs deve estar associado um sensor, para detetar a presença de veículos, e um atuador, para ligar ou desligar esse mesmo grupo de LEDs. O protocolo *ZigBee* assegura a comunicação entre os sensores e o microcontrolador que, por sua vez, transmite os

dados para os atuadores. Assim, quando é detetada a presença de um veículo pelo sensor, este envia um sinal para as Unidades de Controlo Locais permitindo o controlo da iluminação de uma rodovia de forma sequencial. Associado a este método, J. Zhang *et al.* [149] organizou as fontes luminosas numa topologia do tipo árvore, agrupados em três categorias: “*lamp members*”, “*succeeding leader*” e “*lamp leader*”. A arquitetura do sistema proposto é apresentada na Figura 21. Os “*lamp members*” são constituídos por um sensor de luz, relés, detetor de tensão e um módulo *wireless*. Os “*lamp leader*” incluem um módulo *Wi-Fi* e um módulo de comunicação *GPRS*. Através deste protocolo, os *lamp members* enviam individualmente um sinal, cujo autor denomina de “votos”, ao *lamp leader* indicando quando os níveis de iluminância natural são insuficientes para uma correta iluminação do espaço. Estes votos são recolhidos pelo *lamp leader* que, tendo como base o número de sensores que estão a detetar baixos níveis de iluminância solar, irá decidir quanto à necessidade de enviar sinais que permitem que todas as fontes luminosas do grupo se liguem. Se forem detetadas falhas no *lamp leader*, este é substituído e o *succeeding leader* assume o controlo das operações.

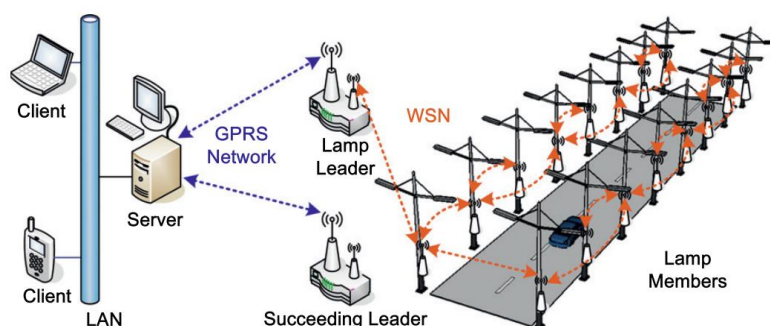


Figura 21 – Arquitetura do sistema de controlo baseado na tomada de decisão em grupo [149].

4.6.5.2 Controlo através de Iluminação Adaptativa

Uma outra abordagem, frequentemente utilizada na literatura denomina-se de controlo através de iluminação adaptativa. O conceito que distingue esta abordagem das restantes é que, consoante as condições ambientais e a presença de pedestres/veículos, a intensidade luminosa e a distribuição da luz são reguladas tendo em conta determinados níveis. Um exemplo desta abordagem é realizado num estudo de R. Husin *et al.* [150] onde a intensidade da luz pode ser regulada segundo cinco níveis. A utilização dos diferentes níveis depende da luz natural detetada através de um sensor LDR, da presença de veículos que são detetados através de um feixe laser e da presença de chuva. As informações dos respetivos sensores são enviadas para o *ATMEGA328p* inserido no *Arduino Uno*, e, é este que faz o controlo do sistema de iluminação. A implementação deste sistema permitiu uma redução entre os 77% e os 81% do consumo energético [150].

Relacionado com a este método de controlo, foi projetado por S. Digamber *et al.* uma abordagem alternativa que permite a regulação da intensidade de iluminação em resposta a cronogramas fixos [151]. Este, teve como principal objetivo a implementação de um sistema de baixo custo e de baixa potência que permitisse uma gestão automática da iluminação de uma determinada rua, incluindo os semáforos. Para isso, foi utilizado um microcontrolador ARM 7 LPC 2138, sensores de infravermelho, uma *tag* de identificação por radiofrequência (RFID) e um

sensor LDR. O sensor LDR permite ao sistema ligar/desligar a iluminação consoante a luz solar presente. Além disso, foi pré-determinado que a iluminação funciona à sua intensidade máxima até há meia-noite. Posteriormente, e até ao amanhecer a intensidade é reduzida para os 50%. Nesse período, sempre que o sistema detetar a presença de algum veículo a iluminação é regulada para uma intensidade de 100% e será reduzida para 50% quando a sua presença já não for detetada. A utilização de *tags* RFID permite ao sistema detetar veículos de emergência. Através deste sistema, os consumos diminuirão 50-60% [151].

Do mesmo modo, tendo em consideração o controlo de iluminação de forma adaptativa, os autores *D. Khandelwal et al.* [152] projetaram um sistema capaz de detetar a presença e o sentido de movimento de um veículo e, desta forma, ligar um grupo de luminárias localizadas à frente do mesmo e regular para intensidades mais baixas as luminárias localizadas à retaguarda. O sistema utilizou microcontroladores da série 8051, LDR, iluminação LED e um módulo GSM. Através desta abordagem, ao invés de se desligar completamente a iluminação quando não existem utilizadores na via, a iluminação é mantida no estado ligada com uma intensidade de 10%, sempre que não seja detetado nenhum veículo. Do mesmo modo, detetada a aproximação do veículo, é ligado a uma intensidade de 100% o grupo de luminárias que mais se adequa ao sentido de movimento do veículo [152].

4.6.5.3 Controlo da iluminação baseado na Web

O controlo da iluminação baseado na *Web* permite ao gestor da iluminação a monitorização do estado da instalação e o controlo da mesma, remotamente. Este controlo é realizado através de uma arquitetura Cliente – Servidor, como demonstrado no estudo de *Fonseca et al* [153]. No entanto, várias abordagens na literatura utilizam as particularidades da *Web* para criar interfaces que permitem, não só controlar e monitorizar a iluminação, mas também monitorizar outras variáveis externas à instalação, como é o caso do estudo de *Rajput et al* [154]. No estudo em causa, o autor associa cada microcontrolador C8051F350 a diversos sensores de fumo, acústicos, de medição de dióxido de carbono, LDR e módulos GSM. Os módulos GSM são utilizados para a transmissão e receção de dados entre o microcontrolador e a central de controlo que, desta forma, através de uma interface *Web* permite aos utilizadores a monitorização do estado da qualidade do ar [154].

No trabalho realizado por *Karthikeyan et al.* [155], a iluminação é controlada através da deteção de presença de pedestres ou veículos pelos sensores infravermelhos implementados. Por sua vez, estes sensores enviam um sinal ao microcontrolador associado ao *Arduino Mega2560* que, através do protocolo de comunicação *ZigBee*, envia essa informação para a central de controlo. Na central de controlo, os dados são entregues e processados numa *cloud* que irá controlar o sistema de iluminação. Do mesmo modo, os utilizadores autorizados podem aceder em tempo real, através de uma Interface Gráfica de Utilizador (GUI), a diversos dados referentes ao sistema de iluminação [155].

Por fim, uma outra abordagem foi partilhada por *Subramanyam et al.* para controlar a iluminação com base numa GUI [156]. Os sensores utilizados na implementação deste sistema consistem em sensores LDR e de infravermelhos. Com base na GUI, é possível ao gestor do sistema colocar o mesmo a funcionar em dois modos de operação distintos. O modo automático

permite que a iluminação seja controlada consoante os níveis de luz solar existentes no local, medido através do sensor LDR, e consoante a presença de pedestres/veículos, detetados através de sensores infravermelhos. Por outro lado, o modo manual permite que toda a iluminação seja controlada e monitorizada através de uma janela de aplicação da GUI, utilizando o protocolo *ZigBee*. Através da implementação deste sistema, os autores afirmam que foram atingidas poupanças de 66% a 71%, comparativamente a sistema de controlo de iluminação convencionais [156].

4.6.6 Vantagens dos sistemas de controlo de iluminação inteligente

Ao longo desta subsecção dedicada à iluminação inteligente já foram abordados alguns aspetos que remetem para alguns dos benefícios da iluminação inteligente. Estes benefícios podem dividir-se em três categorias: consumo energético, custos operacionais e segurança [96]. Relativamente aos consumos energéticos, a implementação de um SII pode traduzir-se em uma diminuição de consumos significativa, na infraestrutura rodoviária [96], como representado através da Tabela 15. Esta diminuição é justificada pelo elevado dinamismo de resposta do sistema face às variações do ambiente a monitorizar, permitindo um ajuste praticamente instantâneo da intensidade de iluminação consoante as necessidades. Desta forma, o número de horas que as fontes luminosas estão a trabalhar com a intensidade máxima é menor, resultando em menores consumos [14], [35].

Tabela 15 – Poupança associada à Iluminação Inteligente.

| Zona | Sensores Utilizados | Tecnologia Iluminação | Protocolo de Comunicação | Poupança | Referência |
|---|---|--|--------------------------|----------|------------|
| | Sensor de Luz Natural | LED | - | 16,67% | [35] |
| | Movimento | LED | - | 20% | [35] |
| | Movimento + Luz Natural | LED | - | 33,33% | [35] |
| | PIR + Câmaras | LED | - | 76% | [157] |
| | - | LED | DALI | 30%-40% | [158] |
| Iluminação Rodoviária / Zona para Pedestres | Sensor de Movimento | LED | - | 43,75% | [159] |
| | - | Lâmpadas de Descarga de Alta Intensidade | 6LoWPAN | 50% | [12] |
| | - | LED | 6LoWPAN | 15% | [12] |
| | - | LED | GPRS | 50% | [160] |
| | Movimento + Luz Natural; | LED | LoRa / IEEE802.15.4 | 76% | [161] |
| | Humidade + Temperatura + Infravermelho + Luz Natural; | LED | LPWAN | 30%-40% | [143] |

Por sua vez, um menor tempo de utilização das fontes luminosas aumenta o tempo de vida útil das mesmas e, conseqüentemente, a frequência de substituição das lâmpadas diminui. Além disso, os sistemas de iluminação inteligente mais avançados permitem que a monitorização do estado da instalação seja feita remotamente, não sendo necessário o envio de equipas ao local para detetar o problema. Desta forma, os custos operacionais diminuem [14], [96].

Por fim, o facto de o sistema responder de forma dinâmica à variação das condições do ambiente a monitorizar garante que esse mesmo ambiente nunca se encontre sem qualquer tipo de iluminação. Do mesmo modo, o facto destes sistemas permitirem a incorporação de diversos sensores permite, não só tornar o sistema de iluminação mais eficiente e dinâmico, como também, por exemplo, emitir alertas para os utilizadores relativamente à qualidade do ar e presença de fumo em caso de incêndio nas proximidades. Conseqüentemente, estes sistemas não só diminuem o consumo energético das áreas urbanas como também podem fornecer dados relativamente a cenários perigosos para a integridade ou saúde humana [162].

4.6.7 Principais Desafios associados à Iluminação Inteligente

O desenvolvimento de sistemas de controlo de iluminação inteligentes é algo desafiador, dado que, o desempenho geral dos mesmos depende do correto funcionamento de todos os sensores. Do mesmo modo, a escolha dos mesmos deve ser feita de forma a prever o máximo de situações possíveis em que a iluminação deve reagir consoante as alterações do meio. Apesar disso, as limitações de *hardware* e relacionadas com a própria arquitetura dos sistemas podem não permitir a deteção de todas essas situações. Por outro lado, a implementação deste tipo de sistemas possui um custo elevado, pelo que exige um período de retorno do investimento de normalmente, no mínimo, 2 anos [42]. Além disso, a grande maioria dos estudos utiliza componentes cuja sua durabilidade em ambientes adversos não é considerada. Desta forma, a efetiva eficácia e eficiência desses sistemas pode não ser aquela que é apresentada pelos autores.

5 Sistemas de Controlo de Iluminação em Túneis e Plataformas de Passageiros

Através da secção anterior, constata-se que a implementação de sistemas de controlo com as tecnologias e os modos de operação adequados permitem uma poupança energética considerável, contribuindo conseqüentemente para a diminuição de gases com efeito estufa para a atmosfera. Desta forma, esta dissertação, cujo tema foi fornecido pela Infraestruturas de Portugal S.A, tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de controlo de iluminação ferroviária, com resposta dinâmica à aproximação de comboios em túneis e plataformas de passageiros.

Para o controlo de iluminação em túneis ferroviários, como representado na Figura 22, o sistema desenvolvido permite uma iluminação sequencial da iluminação à medida que o comboio se desloca dentro do túnel.

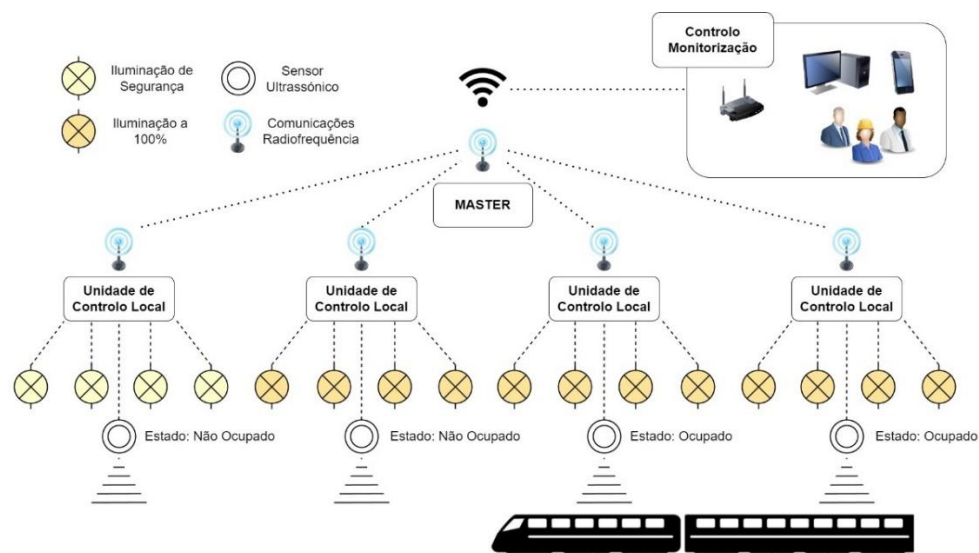


Figura 22 – Sistema Controlo de Iluminação em Túneis Ferroviários.

Por outro lado, o sistema de controlo de iluminação em plataformas de passageiros permite que as fontes luminosas sejam ligadas à intensidade máxima quando detetada a presença de utilizadores ou de comboios, sempre que a iluminância natural disponível não garanta a segurança de pessoas, bens e infraestruturas. A Figura 23 ilustra uma possível configuração do sistema a implementar.

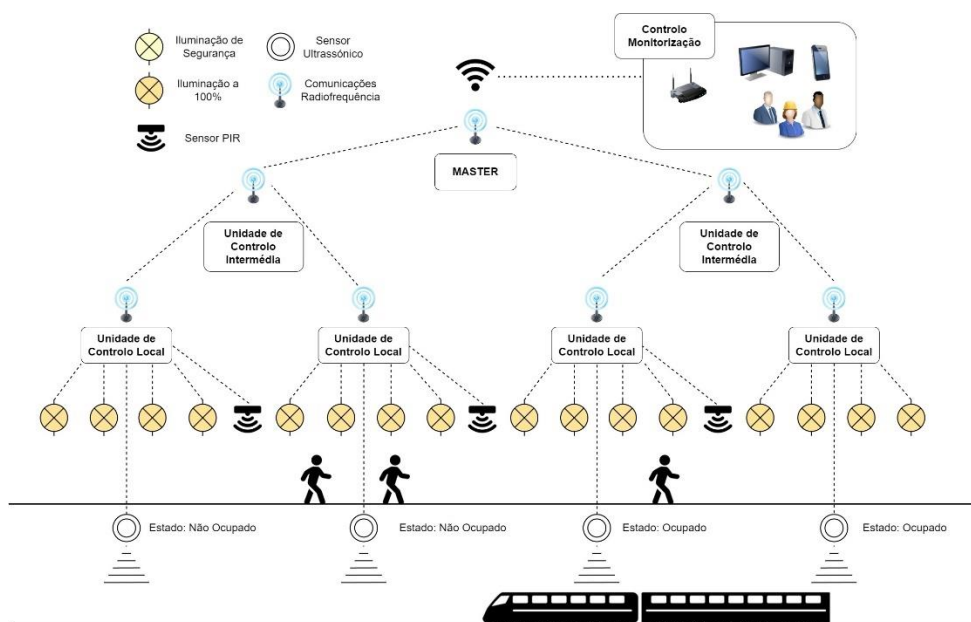


Figura 23 – Sistema Controlo de Iluminação em Plataformas Ferroviárias.

Além disso, como será analisado posteriormente, os sistemas desenvolvidos permitem o controlo remoto das fontes luminosas através de quatro modos de operação distintos.

De forma a compreender o funcionamento dos sistemas mais aprofundadamente, as subsecções seguintes abordam o funcionamento das diferentes unidades de controlo, o funcionamento e a estrutura da rede de comunicação wireless implementada e componentes utilizados. Além disso, é realizada uma análise ao *software* desenvolvido para os sistemas.

5.1 Requisitos do sistema – EN 13201:2015

Na Ferrovia Europeia, não existem normas que definam os requisitos a cumprir nos sistemas de iluminação para túneis ferroviários e plataformas de passageiros. Assim, com o intuito do sistema de controlo ir de encontro as exigências pretendidas, deve-se utilizar como referência o documento EN 13201:2015. Através desta norma, com base no tipo de tráfego previsto para a zona a iluminar, como tipo de utilizadores, intensidade de tráfego, velocidade média, entre outros, é definida uma classe de iluminação com os padrões obrigatórios que devem ser respeitados para uma correta iluminação do espaço.

Para a iluminação em túneis ferroviários, a classe mais adequada é a classe M, destinada a vias de trânsito urbanas ou fora de povoações, utilizadas por veículos motorizados, permitindo

velocidades de condução médias ou altas. A Tabela 16 define os níveis de iluminação associados a classe M.

Tabela 16 – Classes M de Iluminação [163].

| Classe | Luminância da superfície da estrada para condições de superfície da estrada seca e molhada | | | Ofuscamento incapacitante | Iluminação envolvente | |
|--------|--|-------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| | Superfície Seca | | Superfície molhada | Superfície Seca | Superfície Seca | |
| | $L_{média}$ [mínimo constante] cd/m^2 | U_o [mínimo] | U_1 [mínimo] | U_{ow} [mínimo] | f_{TI} [máximo] (%) | R_{EI} [mínimo] |
| M1 | 2,00 | 0,40 | 0,70 | 0,15 | 10,00 | 0,35 |
| M2 | 1,50 | 0,40 | 0,70 | 0,15 | 10,00 | 0,35 |
| M3 | 1,00 | 0,40 | 0,60 | 0,15 | 15,00 | 0,30 |
| M4 | 0,75 | 0,40 | 0,60 | 0,15 | 15,00 | 0,30 |
| M5 | 0,50 | 0,35 | 0,40 | 0,15 | 15,00 | 0,30 |
| M6 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,15 | 20,00 | 0,30 |

onde, $L_{média}$ representa a luminância média da superfície da estrada, U_o representa a uniformidade global da luminância, U_1 representa a uniformidade longitudinal da luminância, f_{TI} representa o incremento linear e o R_{EI} representa o *edge illuminance ratio*.

Para a iluminação em túneis ferroviários, a classe mais adequada é a classe P, destinada apenas para zonas pedonais ou com presença de ciclovias, estradas residenciais, áreas adjacentes à faixa de rodagem como faixas de emergência, áreas de estacionamento e passeios. A Tabela 17 define os níveis de iluminação associados a classe P.

Tabela 17 – Classes P de Iluminação [163].

| Classe | Iluminância Horizontal | | Requisito adicional caso o reconhecimento facial seja necessário | |
|--------|---------------------------------------|-----------------------------|--|--------------------------------|
| | $E_{média}$ [mínimo mantido] lx | E_{min} [mínimo] lx | $E_{v,min}$ [mínimo] lx | $E_{sc,min}$ [mínimo] Lx |
| P1 | 15,00 | 3,00 | 5,00 | 5,00 |
| P2 | 10,00 | 2,00 | 3,00 | 2,00 |
| P3 | 7,50 | 1,50 | 2,50 | 1,50 |
| P4 | 5,00 | 1,00 | 1,50 | 1,00 |
| P5 | 3,00 | 0,60 | 1,00 | 0,60 |
| P6 | 2,00 | 0,40 | 0,60 | 0,20 |

onde $E_{média}$ representa a iluminância mínima média horizontal, E_{min} representa a iluminância horizontal mínima, $E_{v,min}$ representa a iluminância mínima relativa ao plano vertical e $E_{sc,min}$ representa a iluminância semicilíndrica mínima.

5.2 Estrutura dos Sistemas de Controlo de Iluminação Inteligente

Apesar de os sistemas de controlo projetados poderem ter várias configurações e de utilizarem diversas tecnologias, estruturalmente os sistemas são constituídos pelas Unidades Controlo Locais (UCL), Unidades de Controlo Intermédias (UCI) e pelo *Master*.

As UCL realizam a monitorização do espaço, através de diversos sensores, e enviam essa informação para as unidades de controlo hierarquicamente superiores. Com base nessa informação, as Unidades de Controlo Superiores (UCS) enviam um sinal de controlo para as UCL indicando qual o modo de funcionamento em que cada luminária deve operar. Ao conjunto de luminárias associadas a cada UCL é dado o nome de secção, como representado na Figura 24. Desta forma, para além da capacidade que cada UCL possui de enviar o estado de ocupação da secção para as UCS, também deve possuir a capacidade de receber pacotes dessas mesmas unidades de controlo. Estes pacotes contêm a informação necessária para que as UCL ajustem a intensidade luminosa das luminárias respetivas às necessidades momentâneas do local.

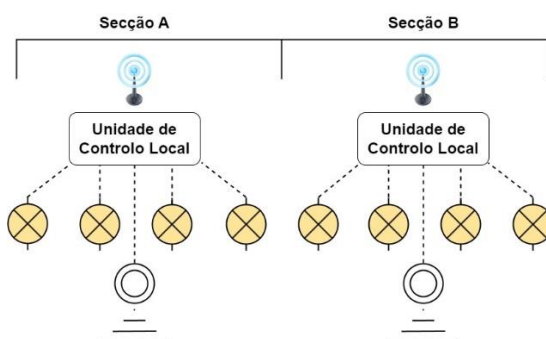


Figura 24 – Constituintes de uma Secção.

A UCI tem como principal função receber os pacotes que são enviados pelas UCL, compactá-los num único pacote e enviá-lo para o *master*. Por sua vez, o *master* deve ter a capacidade de processar a informação recebida e enviar os pacotes para as UCI, com comando que contém a informação sobre o modo de funcionamento das luminárias que constituem o túnel ou plataforma. Posteriormente, este pacote deve ser enviado das UCI para as UCL respetivas, para que as mesmas consigam controlar a iluminação de forma eficiente e dinâmica. A implementação de UCIs torna-se particularmente relevante quando o comprimento do túnel/plataforma é considerável, permitindo uma diminuição do número de pacotes a serem enviados entre diferentes camadas e reduzindo possíveis interferências na rede de comunicação. Contudo, a implementação das UCI pode não ser necessária, principalmente em instalações que possuam um número de UCL inferior a seis e uma distância entre Unidades inferior ao alcance máximo dos módulos de comunicação. Nesta situação, a UCL de cada secção, comunica diretamente com o *master*.

Desta forma, o *master* deve rececionar os pacotes que são enviados pelas unidades de controlo da camada imediatamente anterior e processar as informações recebidas. Com base

nestes pacotes, o *master* obtém informações sobre o estado de ocupação de todas as secções. Consequentemente, sabendo o estado de ocupação de toda a zona monitorizada, o mesmo envia os sinais necessários onde indica quais luminárias/secções devem estar a funcionar a uma intensidade luminosa de 100%, quais devem estar ligadas com uma intensidade luminosa de segurança e quais devem estar desligadas. Esta informação é recebida pelas UCL, que realizam as ações necessárias para se gerar os sinais de controlo 0 – 10 V que mais se adequam às necessidades luminotécnicas do local. Posteriormente, esse sinal irá ser entregue aos drivers das luminárias e a intensidade da iluminação será ajustada conforme as necessidades.

No entanto, este controlo da iluminação pode não só ser realizado com base na informação que os sensores estão a enviar, mas também através de uma Interface Gráfica desenvolvida para o efeito. Nesta situação, o gestor da iluminação remotamente decide qual o modo de operação mais adequado para o funcionamento do sistema. Posteriormente, essa informação é enviada para o *master* que emitirá os sinais que permitem o controlo que respeite a vontade do gestor da iluminação.

Pela relevância que possuem as comunicações entre as diversas unidades de controlo para o correto funcionamento de todo o sistema, na subsecção seguinte é realizada uma análise detalhada às tecnologias e protocolos de comunicação utilizados nas comunicações entre as mesmas.

5.3 Tecnologias e Protocolo de Comunicação utilizados

Para o desenvolvimento dos sistemas de controlo de iluminação propostos, optou-se pela utilização dos módulos nRF24L01+PA+LNA, produzidos pela *Nordic Semiconductor*, que transmitem dados através de um protocolo de comunicações *wireless* baseado em comunicações radiofrequência (RF). Estes módulos funcionam como transceptores de baixo custo e baixa potência e são projetados para operarem entre 2.400 GHz – 2.525 GHz [164].

5.3.1 Modo de Operação

No desenvolvimento dos sistemas de controlo, o código desenvolvido permite que as unidades de controlo funcionem no modo RX e TX. O modo de operação RX é projetado para permitir que o módulo recetor receba dados de um módulo transmissor. Através do mesmo, o recetor procura por um pacote válido que, quando detetado, é iniciado o processo de demodulação que permite a conversão de sinais rádio em sinais digitais. Do mesmo modo, modo TX permite ao módulo o envio de informação para um recetor [164].

A validade dos pacotes enviados é efetuada através do mecanismo *Cyclic Redundancy Check* (CRC). Quando os dados são enviados, um determinado valor de CRC é calculado e anexado ao pacote de dados transmitidos. Por sua vez, no lado do recetor o CRC é novamente calculado tendo em conta os dados recebidos. Se estes dois valores de CRC forem iguais, presume-se que a comunicação não foi corrompida e não existiram erros de comunicação. Do

mesmo modo, a correta recepção dos dados é sinalizada através do envio de um pacote de *acknowledgment* (ACK) do recetor para o transmissor [164].

Por outro lado, as comunicações utilizam o mecanismo *First In, First Out* (FIFO), permitindo que o microcontrolador envie e analise os pacotes pela ordem de chegada. Além disso, cada módulo recetor tem a capacidade de armazenar até três pacotes de dados antes que estes sejam lidos pelo microcontrolador. Posteriormente, após a correta leitura por parte do microcontrolador, o pacote é descartado e o sistema fica apto para armazenar temporariamente mais um pacote. Caso os FIFOs RX estiverem cheios, o pacote recebido é automaticamente descartado. Do mesmo modo, cada módulo transmissor tem a capacidade de armazenar temporariamente três pacotes de dados para envio. Caso os FIFOs TX estiverem cheios, os pacotes para envio que cheguem posteriormente são descartados [164].

Através da utilização das bibliotecas `<RF24.h>` e `<RF24Network.h>`, nos códigos desenvolvidos a atualização dos pacotes da rede de comunicação e a definição do modo de operação é realizada com base nas seguintes funções:

- `network.update()` – Verifica se existem novos pacotes dados para serem recebidos e processados. Esta deve ser chamada imediatamente antes do módulo começar a funcionar no modo RX. Do mesmo modo, verifica e atualiza o estado da rede garantindo uma correta comunicação entre nós;
- `network.read(RF24NetworkHeader& header, const void* message, uint16_t len)` – Coloca o módulo a operar no modo RX (Recetor) e permite ao sistema a leitura dos pacotes enviados pelos transmissores. O endereço do remetente é armazenado no parâmetro “header”. O segundo parâmetro representa o ponteiro para a área de memória onde os dados recebidos serão armazenados. Por fim, o último parâmetro define qual o comprimento máximo dos dados a serem lidos. Quando a mensagem é recebida corretamente, a função `network.read()` retorna o valor lógico “*true*”, caso contrário retorna o valor lógico “*false*”.
- `network.write(RF24NetworkHeader& header, const void* message, uint16_t len)` – Coloca o módulo a operar no modo TX (Transmissor) permitindo o envio de dados para diferentes módulos. O “header” é configurado com o endereço do módulo de destino. O segundo parâmetro é um ponteiro para a área de memória onde se encontram os dados que serão enviados. O último parâmetro corresponde ao comprimento máximo dos dados a serem transmitidos. Quando a mensagem é enviada corretamente, a função `network.write()` retorna o valor lógico “*true*”, caso contrário retorna o valor lógico “*false*”.

5.3.2 Taxa de Comunicação de dados pelo ar

A taxa de comunicação de dados pelo ar corresponde à velocidade que o módulo nRF24L01+ transmite e recebe os dados e pode tomar os valores de: 250 kbps, 1 Mbps e 2 Mbps. Uma escolha ajustada da taxa de comunicação de dados é essencial para obter um

sistema robusto e com um alcance que permita um funcionamento do sistema estável. Os efeitos da implementação das diferentes taxas de comunicação é apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 – Comparação das velocidades de comunicação: 250kbps, 1Mbps e 2Mbps

| <i>Air Data Rate</i> | Vantagens | Desvantagens |
|----------------------|---|--|
| 250 kbps | <p>Maior Alcance</p> <p>Maior Sensibilidade de Recepção</p> <p>Menos Suscetível a Interferências e Ruídos</p> <p>Menor Consumo de Energia</p> | <p>Menor taxa de transferência de dados</p> |
| 1 Mbps | <p>Oferece um equilíbrio entre alcance e transferência de dados</p> | <p>Menor Alcance e Robustez quando comparado com a velocidade de 250 kbps</p> |
| 2 Mbps | <p>Permite a transmissão de grandes quantidades de informações</p> | <p>Menor Alcance</p> <p>Mais suscetível a Interferências</p> <p>Maior Consumo de Energia</p> |

Nos códigos desenvolvidos, com o objetivo de garantir a máxima robustez dos sistemas, optou-se por comunicações a velocidades de 250 kbps. Essa configuração é realizada através da linha de código: `radio.setDataRate(RF24_250KBPS);`.

5.3.3 Frequência do canal RF

A escolha da frequência do canal de comunicação é parte fundamental da configuração dos módulos, já que, é através da definição desta frequência que o módulo transmite e recebe as comunicações. A frequência deste canal pode variar de 2.400 GHz a 2.525 GHz, sendo que, a resolução da configuração da frequência do canal RF é de 1 MHz.

A frequência do canal RF pode ser definida através do registo *RF_CH* através da fórmula seguinte:

$$F_o = 2400 + RF_CH [MHz] \quad (8)$$

, com $0 \leq RF_CH \leq 125$

Para um transmissor e o recetor conseguirem comunicar entre si, o valor da frequência do canal RF tem de ser o mesmo. Uma boa prática na escolha do canal será verificar aquele que está menos congestionado o que, conseqüentemente, permite reduzir as interferências provenientes de outros dispositivos com comunicações RF.

Através biblioteca `<RF24Network.h>`, a configuração da frequência do canal de comunicação é definida através da seguinte linha de código: `network.begin(channel, node_id);`

No primeiro parâmetro desta função é colocado o número de canal RF que pode variar entre 0 e 125. No segundo parâmetro é colocado o endereço que identifica o módulo de comunicação em causa. Este endereço, como analisado posteriormente, é característico de cada unidade de controlo.

5.3.4 Controlo do Amplificador de Potência

Através do controlo do amplificador de potência é possível definir a potência de saída do amplificador de potência nRF24L01+. Este controlo permite otimizar a comunicação dependendo da distância entre os diferentes módulos e das condições ambientais e pode ser definido através da biblioteca <RF24> pela seguinte linha de código: `radio.setPALevel()`.

Esta função, apenas recebe um único parâmetro e pode variar dentro de quatro opções que se traduzem na Tabela 19.

Tabela 19 - Configuração da Potência RF de saída.

| Linha de Código | Registo RF_SETUP, bits RF_PWR | Potência RF de Saída | Consumo de Corrente DC |
|---|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| <code>radio.setPALevel(RF24_PA_MAX)</code> | 1 1 | 0 dBm | 11,3 mA |
| <code>radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH)</code> | 1 0 | -6 dBm | 9,0 mA |
| <code>radio.setPALevel(RF24_PA_LOW)</code> | 1 | -12 dBm | 7,5 mA |
| <code>radio.setPALevel(RF24_PA_MIN)</code> | 0 | -18 dBm | 7,0 mA |

Pelo facto de existir a possibilidade de os módulos estarem distanciados em algumas centenas de metros, nos códigos desenvolvidos optou-se pela saída com o maior valor de potência.

5.3.5 Protocolo *Enhanced ShockBurst*

O módulo nRF24L01+ utiliza o protocolo *Enhanced ShockBurst* com o intuito de realizar comunicações *wireless* mais eficientes, tanto em sistemas bidirecionais como unidirecionais. Este, automatiza o processo de montagem dos pacotes de dados e faz a sincronização automática da temporização da transmissão. Por outro lado, no recetor é realizada uma procura constante de pacotes com endereços válidos. Quando é detetado um endereço válido, o pacote é processado e é realizada uma verificação de erros através do processo CRC. Posteriormente, a informação útil é reencaminhada para um dos *slots* vagos nos FIFOs RX com o intuito de ser interpretada e processada pelo microcontrolador.

Além disso, é ideal para aplicações de baixo consumo e de alto desempenho, associados à utilização de microcontroladores de baixo-custo. As principais funcionalidades deste protocolo centram-se: no comprimento de carga útil dinâmica (1 a 32 bytes), no reconhecimento

automático de pacotes, na retransmissão automática de pacotes e na capacidade de um recetor estar ativamente a receber dados de seis transmissores diferentes (*MultiCeiver* 1:6).

5.3.5.1 Retransmissão automática dos pacotes

O protocolo *Enhanced ShockBurst* permite o tratamento automático dos pacotes da seguinte forma:

1. É iniciado o processo de transmissão através do envio do pacote do Transmissor Primário (PTX) para o Recetor Primário (PRX). Através do protocolo, o PTX fica automaticamente no modo de receção a aguardar pelo pacote de confirmação ACK.
2. Posteriormente, o pacote é recebido pelo PRX que envia automaticamente o pacote ACK para o PTX.
3. Caso o PTX não receba o pacote ACK respetivo, o *Enhanced ShockBurst* inicia os procedimentos para retransmitir os dados anteriormente enviados após um atraso programável e coloca o PTX a aguardar pela receção do pacote ACK.

O número máximo de retransmissões e o atraso de uma transmissão para a próxima retransmissão pode ser configurado através da seguinte linha de código: `radio.setRetries(uint8_t delay, uint8_t count)`.

O “*delay*” representa o intervalo de tempo que ocorre entre cada retransmissão em múltiplos de 250 μ s sendo que: *delay* = 0 corresponde a 250 μ s e *delay* = 15 (valor máximo) corresponde a 4000 μ s. Por outro lado, o parâmetro “*count*” (com valor máximo de 15) representa o número de retransmissões antes do pacote ser descartado.

Nos códigos desenvolvidos para o controlo da iluminação, não é realizada a chamada esta função. Deste modo, a retransmissão de dados funciona no seu modo padrão. Consequentemente, quando o transmissor não recebe o pacote de ACK, o número de tentativas máximas de retransmissão do pacote são de 15, em intervalos de 250 μ s.

5.3.5.2 Formato do Pacote gerado pelo Protocolo *Enhanced ShockBurst*

O formato do pacote, que é gerado através do protocolo *Enhanced ShockBurst*, é apresentado na Figura 25 e pode ser dividido em *Preamble*, *Address*, *Packet Control Field*, *Payload* e o campo CRC.

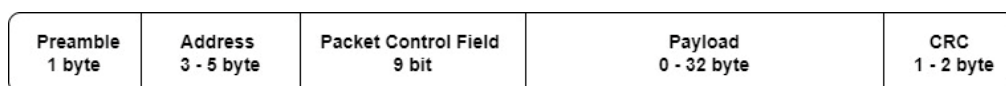


Figura 25 – Formato do pacote gerado pelo protocolo *Enhanced ShockBurst*.

O primeiro campo, denominado de *Preamble*, corresponde a uma sequência de bits que garante a sincronização entre o recetor e o transmissor. O segundo parâmetro, *Address*, contém o endereço do destinatário do pacote, garantindo que o mesmo seja apenas recebido e processado pelo recetor correto. Nos códigos desenvolvidos, o endereço associado a cada

módulo é configurado no formato *Octal* e é definido aquando da definição da frequência do canal RF. No parâmetro *Packet Control Field* são armazenadas informações como o comprimento do *Payload* (informação útil) e a informação sobre se o pacote a enviar é novo ou retransmitido. Por outro lado, a necessidade de o recetor enviar um pacote ACK para confirmar a receção dos dados também é definida neste parâmetro através do estado da flag *NO_ACK*. No parâmetro *Payload* é onde se encontra efetivamente a informação útil do pacote. Esta pode ter um comprimento de 0 a 32 bytes e é transmitida juntamente com o restante pacote. Por fim, no último parâmetro é definido se o CRC a utilizar nas comunicações é de 1 ou 2 bytes. Sendo o CRC um método de verificação da integridade dos dados, que permite a deteção de erros durante a transmissão ou armazenamento dos mesmos, a utilização de um CRC de 2 bytes proporciona uma verificação mais robusta dos dados. No entanto, em aplicações com elevadas cargas de processamento, a utilização de um CRC de 1 byte pode ser mais vantajosa. Nos sistemas de controlo desenvolvidos, foi definido o espaço alocado para o CRC através da seguinte linha de código: `radio.setCRCLength(RF24_CRC_16)`.

Através da utilização deste método de deteção de erros, ocorre a diminuição da probabilidade de utilização de dados corrompidos aumentando a confiabilidade do sistema.

5.3.5.3 Comunicação *MultiCeiver* 1:6

A comunicação *MultiCeiver* é uma funcionalidade do protocolo *Enhanced ShockBurst* que permite a comunicação de, no máximo, seis PTX com um PRX. Cada PTX transmite os seus pacotes através de um “*pipe*” de dados com um endereço único, Figura 26.

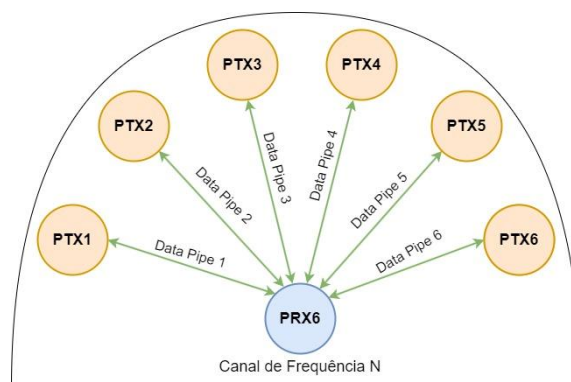


Figura 26 – Configuração Sistema *MultiCeiver*.

Como demonstrado pela Figura 26, uma única unidade de controlo pode ser configurada para receber informação de seis unidades de controlo transmissoras, utilizando a mesma frequência de canal. Além disso, cada *pipe* pode ser configurado individualmente e possui um endereço único. No entanto, para as comunicações ocorrerem de forma eficiente é necessário que algumas das configurações dos módulos de comunicação sejam iguais entre todas as Unidades de Controlo, nomeadamente: Estado do CRC (Ativado/Desativado), Canal de Frequência RF, Taxa de Comunicação de Dados e Nível de Potência de Transmissão.

5.3.6 Comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI)

A comunicação SPI possui um papel preponderante na configuração e controlo do módulo nRF24L01+. Através deste protocolo, o microcontrolador, que neste contexto atua como *master*, associado à Unidade de Controlo respetiva, configura os registos internos, envia e recebe dados provenientes do módulo nRF24L01+, que normalmente atua como *slave*.

5.3.6.1 Pinos Utilizados na Comunicação SPI

A comunicação entre o módulo nRF24L01+ e microcontrolador é efetuada através de quatro pinos principais:

- **CSN (*Chip Select Not*):** Utilizado para selecionar qual o *slave* com que o *master* pretende comunicar. Durante a comunicação de dados, o pino CSN é colocado no estado *LOW*.
- **SCK (*Serial Clock*):** Gerado pelo microcontrolador, o sinal de *clock* realiza a sincronização da receção e transmissão de dados entre o *master* e o *slave*.
- **MOSI (*Master Out Slave In*):** Pino utilizado para o envio de dados do *master* para o *slave* (microcontrolador para nRF24L01+).
- **MISO (*Master In Slave Out*):** Pino utilizado para o envio de dados do *slave* para o *master* (nRF24L01+ para microcontrolador).

5.3.6.2 Transmissão e Receção de Dados

Na Figura 27 é apresentado comportamento dos diferentes sinais quando o *master* está a ler a informação enviada pelo *slave*.

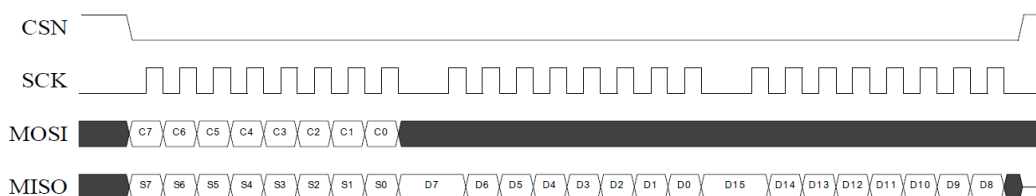


Figura 27 – Comunicação *slave* para *master*.

Como se verifica, o pino CSN é colocado no nível lógico *LOW* para a seleção do *slave* e inicia-se a comunicação. Posteriormente, o *clock* é ativado e o *master* envia os *bits* de comando (Cn), através do MOSI, para indicar ao *slave* que está pronto para ler informação. Ao mesmo tempo, são enviados ao *master*, através do MISO, bits que fornecem informações sobre o estado do *slave* (Sn). De seguida, estando tudo em conformidade, o *slave* envia os dados (Dn) e o *master* recebe-os através do MISO. Quando a transmissão dos dados é concluída, o *master* coloca o pino CSN no estado *HIGH*, o *slave* é desseleccionado, e a comunicação termina. Além disso, através da Figura 27, constata-se que a validação dos *bits* é efetuada através da mudança do estado lógico de 0 para 1 do SCK.

Por outro lado, o processo de envio de dados do *master* para o *slave* é apresentado na Figura 28.

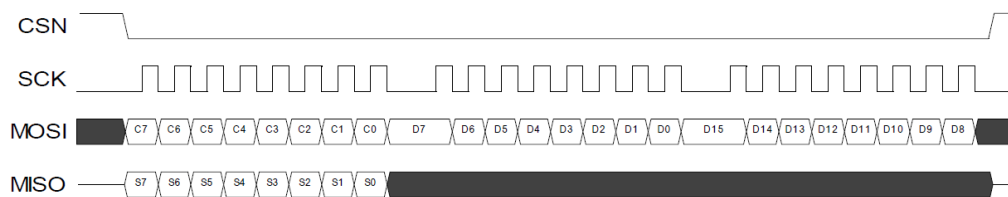


Figura 28 – Comunicação *master* para *slave*.

Através da Figura 28, constata-se que a maior diferença entre o processo de envio/recepção de dados se centra no canal de comunicação utilizado para enviar os mesmos. Neste caso, ao invés de os dados serem enviados pelo MISO estes são enviados pelo MOSI.

5.3.6.3 Inicialização e Configuração do SPI

Nos códigos desenvolvidos, a inicialização e configuração do protocolo de comunicação SPI é realizada através da linha de código: `SPI.begin()`.

Utilizada através da biblioteca `<SPI.h>`, esta função configura os pinos SCK, MOSI e CSN como saída e o pino MISO como entrada. Do mesmo modo, configura a frequência de *clock* da comunicação para o valor padrão de 4 MHz.

5.4 Topologia da rede *wireless* constituída por múltiplos nRF24L01+

Pelo facto das dimensões dos túneis ferroviários e plataformas de passageiros serem variáveis, é necessário que o sistema a implementar tenha a capacidade de conseguir monitorizar zonas de dezenas de metros até quilómetros de comprimento. Consequentemente, é necessária a implementação de uma rede de comunicação que permita uma troca de pacotes a centenas de metros de distância. Para os sistemas de controlo em causa, os códigos desenvolvidos para as diferentes Unidades de Controlo têm em conta uma rede de comunicação *wireless* com uma topologia do tipo árvore, como observado através da Figura 29.

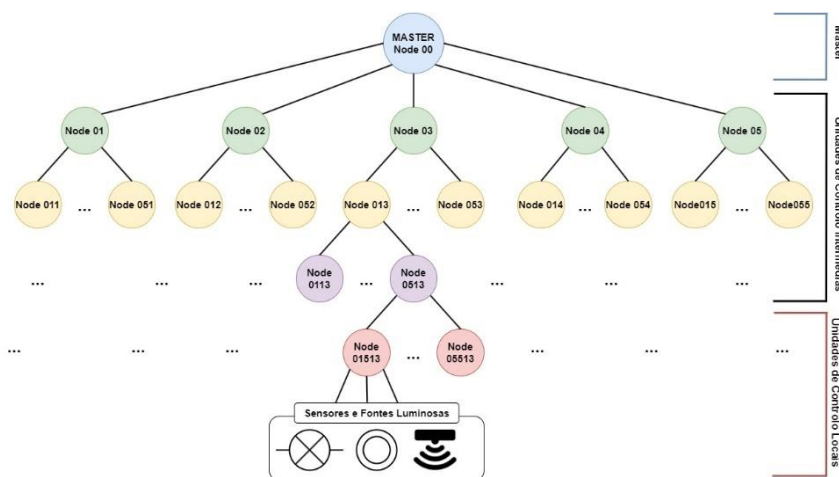


Figura 29 – Topologia em Árvore dos sistemas desenvolvidos.

Pelo facto de cada módulo nRF24L01+ possuir seis *pipes* de comunicação, o número de “filhos” associados a este é limitado a cinco. Considerando que um dos *pipes* está alocado para comunicações com a camada superior, restam cinco *pipes* para comunicar com os nós “filhos”, como observado na Figura 30.

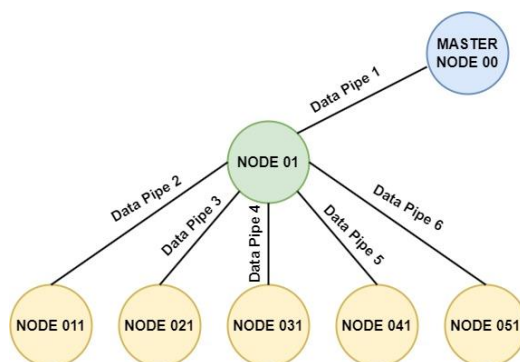


Figura 30 – Representação da distribuição dos “*pipes*” pelos nós.

Por outro lado, através desta topologia, as ramificações podem possuir até 5 camadas de profundidade. Consequentemente, é possível criar uma rede com um total de 3125 nós a comunicarem entre si, através de um mesmo canal de frequência RF. Consequentemente, estando cada nó associado a uma Unidade de Controlo, é possível a implementação de, no máximo, 3125 Unidades de Controlo por sistema. No entanto, o número de camadas e de nós que constituem o sistema de comunicação vai depender do nível de monitorização que se pretende, do número de luminárias a serem controladas por cada unidade de controlo, e das características da zona a iluminar. Cada nó deve ser definido por um endereço de 15 bits que descreve a sua posição na árvore. Os endereços são definidos em formato *octal*, como observado através da Figura 29 e 30.

5.5 Constituição e Componentes utilizados nas Unidades de Controlo

As Unidades de Controlo possuem um papel primordial, já que é através das mesmas que toda a comunicação e troca de dados é efetuada. Independentemente do tipo da Unidade de Controlo (UCL, UCI ou *master*) o primeiro componente considerado foi qual o microcontrolador que melhor se ajusta às necessidades dos sistemas e qual a forma mais estável de alimentar esse mesmo microcontrolador.

5.5.1 Microcontroladores e Transformador Associados

Para o projeto em causa, devido à sua diversidade de aplicações, componentes/sensores compatíveis e quantidade de informação existente na *web*, os microcontroladores que foram considerados para o projeto foram o *ATmega328p*, associado ao *Arduino Uno R3*, e o *ATmega2650*, associado ao *Arduino Mega REV3*. A aplicação dos mesmos está dependente do

número de portas digitais *input/output* (I/O), incluindo as que possuem a capacidade de gerar sinais *Pulse Width Modulation* (PWM), que são necessárias para o correto funcionamento de todo o sistema.

Sendo as unidades de controlo locais as que estão associadas aos sensores e à geração dos sinais PWM, para controlo da iluminação, optou-se pela utilização do *ATmega2650*. Do mesmo modo, a possibilidade de estarem associados ao *master* outro tipo de sensores, que monitorizem outros parâmetros do meio envolvente, torna justificável a associação do *ATmega2650* a esta unidade de controlo. Por outro lado, como o único periférico associado às unidades de controlo intermédias é o módulo que possibilita a comunicação RF, optou-se pela utilização do *ATmega328p*.

Com base nos requisitos de alimentação presentes nos *datasheets* do *Arduino MEGA REV3* e do *Arduino UNO R3* optou-se pela alimentação dos mesmos através da entrada *DC JACK*, utilizando um transformador de 24 W, que fornece uma tensão de 12 V e uma corrente máxima de 2 A.

5.5.2 Módulo *nRF24L01+* e periféricos associados

Como anteriormente abordado, as comunicações entre as diferentes unidades de controlo são realizadas através de uma rede constituída por diversos módulos *nRF24L01+*, cujas principais condições de operação são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Módulo *nRF24L01*: Condições de Operação.

| Parâmetros | Min | Typ | Máx |
|------------------------------|-------|-----|-------|
| Tensão de Operação (V) | 2 | 3,3 | 3,6 |
| Temperatura de Operação (°C) | -40 | - | 85 |
| Frequência de Operação (GHz) | 2,4 | - | 2,525 |
| Consumo de Corrente | | | |
| Modo Tx (mA) | - | 130 | - |
| Modo Rx (mA) | - | 20 | - |
| <i>Air data rate</i> (bps) | 250 k | - | 2 M |
| Alcance (m) | - | - | 2500 |

A determinação do alcance máximo do módulo, de 2500 metros, foi obtida considerando um espaço aberto com visão clara entre módulos. Por outro lado, a antena utilizada possui um ganho de 5dBi e as comunicações foram realizadas com uma taxa de dados de 250 kbps. No entanto, numa aplicação prática, para colmatar os efeitos de possíveis obstáculos que possam existir entre módulos, pode-se optar pela implementação de antenas com ganhos maiores.

Analisando os dados da Tabela 20 constata-se que a tensão de operação dos módulos pode variar de 2 V a 3,6 V. No entanto, optou-se por alimentar o módulo através de um regulador de tensão que converte tensões de 5 V em tensões de 3,3 V. Desta forma, possíveis oscilações na alimentação de 5 V são dificilmente detetadas à saída do regulador. Do mesmo modo, para

tornar o sistema de comunicação mais compacto, foi colocado em paralelo um condensador de 10 μF entre o módulo *nRF24L01+* e a alimentação. Um esquema representativo das ligações do módulo de comunicação com o *Arduino* é apresentado na Figura 31.

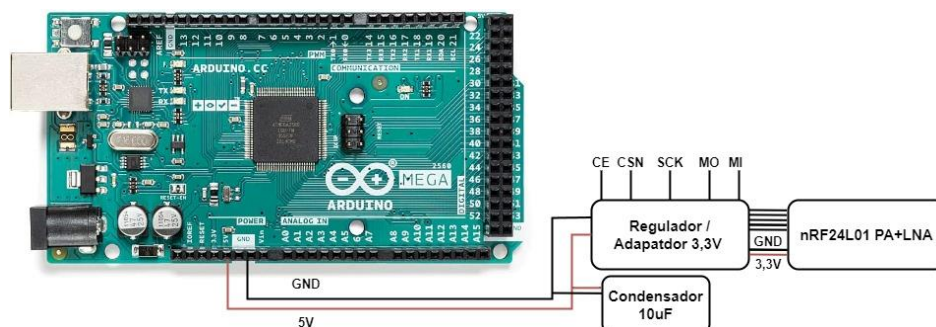


Figura 31 – Módulo nRF24L01+ e periféricos associados: Esquema de ligação.

5.5.3 Unidades de Controlo Locais

Como referido anteriormente, as unidades de controlo locais permitem a monitorização do espaço, através dos sensores associados, e enviam o estado de ocupação para as unidades de controlo superiores. Com base nessa ocupação, o *master* envia os sinais de controlo que permitem a unidade de controlo local controlar a iluminação, da secção respetiva. Neste ponto do relatório, é dado destaque aos componentes específicos das unidades de controlo locais, mais concretamente: sensores, periféricos associados e aos módulos que permitem a regulação da intensidade luminosa.

5.5.3.1 Sensor Ultrassónico: JSN- SR04T- 3.0

Para a deteção de comboios, cada unidade de controlo possui um sensor ultrassónico JSN-SR04T- 3.0 que permite detetar a presença dos mesmos com base na distância a que se encontra superfície mais próxima. A escolha deste sensor, relativamente a outros presentes no mercado, deveu-se à tensão de operação permitida de 5,0 V e um alcance máximo de deteção de 600 cm. Além disso, a escolha deste sensor considerou diversos fatores como: resistência a água e poeiras, ângulo de deteção e preço de aquisição.

5.5.3.2 Sensor Infravermelho Passivo (PIR)

No caso do controlo da iluminação em plataformas de passageiros, a presença de utilizadores na zona a monitorizar também constitui uma variável considerada para o controlo da iluminação.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa na tentativa de encontrar um sensor PIR resistente a água e poeiras, que fosse diretamente compatível com o *Arduino*. No entanto, as opções existentes no mercado não dão garantias de uma durabilidade prolongada dos sensores a condições ambientais desfavoráveis. Assim, através de uma análise a vários sensores PIR utilizados no exterior, optou-se pela utilização de um modelo produzido pela empresa *Oktaplex*, com uma tensão de operação 230 VAC, índice de proteção IP65, raio de deteção de movimento de 20 metros, Ângulo de deteção de 360° e um *time delay* de 10 segundos a 30 minutos.

Pelo facto do sensor considerado, quando detetado movimento, possui uma saída em tensão de 230 VAC, foi necessária a implementação de um módulo que possibilitasse a deteção desse mesmo valor e o convertesse para um sinal com características elétricas passíveis de serem lidas pelos pinos do *Arduino*. Para isso, optou-se pela utilização de um módulo de isolamento optoacoplador, produzido pela *DollaTek*, projetado para converter o sinal de 230 VAC num sinal digital passível de ser lido por diversos microcontroladores, incluindo o *Arduino*.

Desta forma, quando é detetada a presença de utilizadores, o sensor PIR entrega um sinal com tensão de 230 VAC ao módulo de isolamento optoacoplador e este converte-o num sinal de 5 VDC (nível lógico *HIGH*). Posteriormente, não existindo utilizadores na plataforma e decorrido o *time delay* definido, o sinal entregue pelo sensor PIR passa a possuir uma tensão de 0 VAC. Consequentemente, o módulo de isolamento optoacoplador entrega ao *Arduino* um sinal digital de 0 VDC (nível lógico *LOW*). Além disso, a utilização de um módulo que é constituído por um isolador ótico permite o isolamento elétrico entre circuitos com tensões de operação diferentes, protegendo os circuitos de baixa tensão contra possíveis picos de tensão que possam ocorrer. Na Figura 32 é apresentado um possível esquema de ligação que permite a deteção de pessoas através do sensor PIR e módulo optoacoplador descritos.

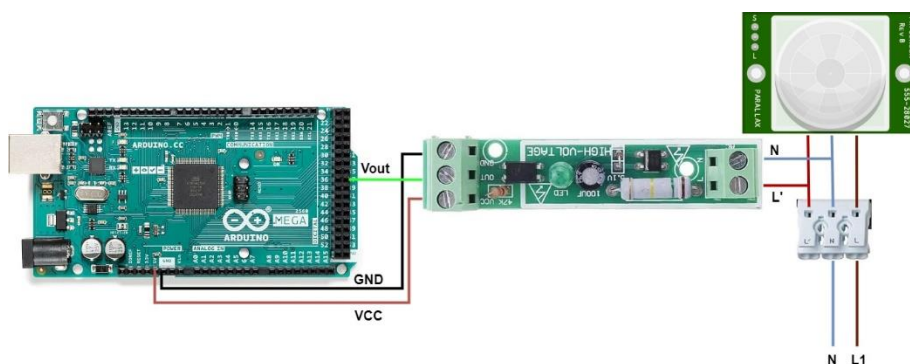


Figura 32 – Deteção de utilizadores através de sensor PIR: Esquema de ligação.

5.5.3.3 Módulo Conversão de Sinal PWM em 0 – 10 V

Tendo em consideração o estado de ocupação da secção, a unidade de controlo local recebe um pacote proveniente do *master* com a informação relativa ao modo de funcionamento das luminárias. Através do processamento desse sinal de controlo, o *ATmega2560*, associado à unidade de controlo local, gera os sinais de PWM com o *duty-cycle* que mais se adequa ao estado de ocupação da secção.

Com base no valor de *duty-cycle*, o sinal é convertido num sinal de 0 -10 V que, sendo entregue ao *driver* da luminária, permite o ajuste da intensidade luminosa das mesmas, consoante as necessidades. As principais características do módulo de conversão de sinais PWM em sinais de 0 -10V são apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Módulo PWM para 0 – 10V: Condições de Operação.

| Descrição | Valores |
|----------------------|---------------------------|
| Tensão de Operação | DC 12 V - 30 V |
| Corrente de operação | 100 mA |
| Range de Conversão | 0% - 100% para 0 - 10 VDC |
| Erro Máximo | 5% |

Apesar da tensão de operação estar contida num intervalo de 12 VDC a 30 VDC, através de implementações práticas com este módulo constatou-se que, para tensões de alimentação inferiores a 14,4 VDC, o sinal gerado não consegue atingir os 10 VDC de amplitude mesmo com um *duty-cycle* de 100%. A solução encontrada foi aumentar a potência do transformador de alimentação para 48 W com uma tensão de operação de 24 V. A Figura 33 representa o esquema de ligação associado à implementação de vários módulos associados a diversas luminárias.

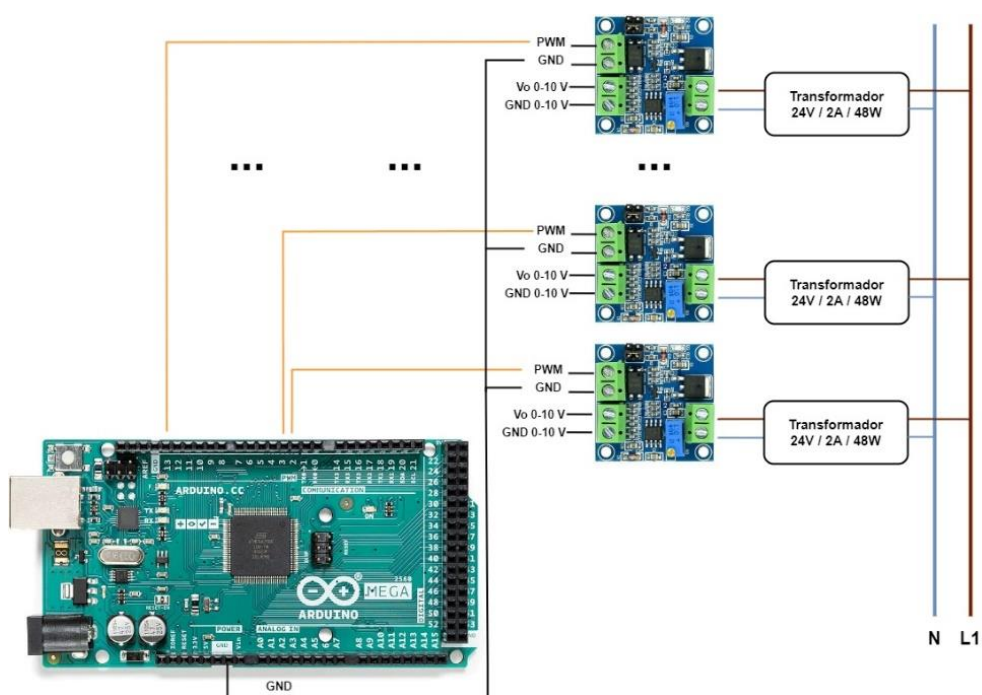


Figura 33 – Módulo PWM para Sinal 0 – 10 V: Esquema de ligação.

5.5.3.4 Esquemas de Ligação e Preço de Aquisição das Unidades de Controlo Locais

Pelo facto de, na aplicação em túneis ferroviários, o sistema desenvolvido considerar exclusivamente a presença do comboio para o controlo da iluminação, os únicos sensores utilizados para monitorizar o local são os sensores ultrassónicos. Na Figura 34 é apresentado um possível esquema de ligação de uma unidade de controlo local, associada a túneis ferroviários, constituída, na sua forma mais básica, por um sensor ultrassónico e um módulo de conversão do sinal PWM para 0 - 10 V.

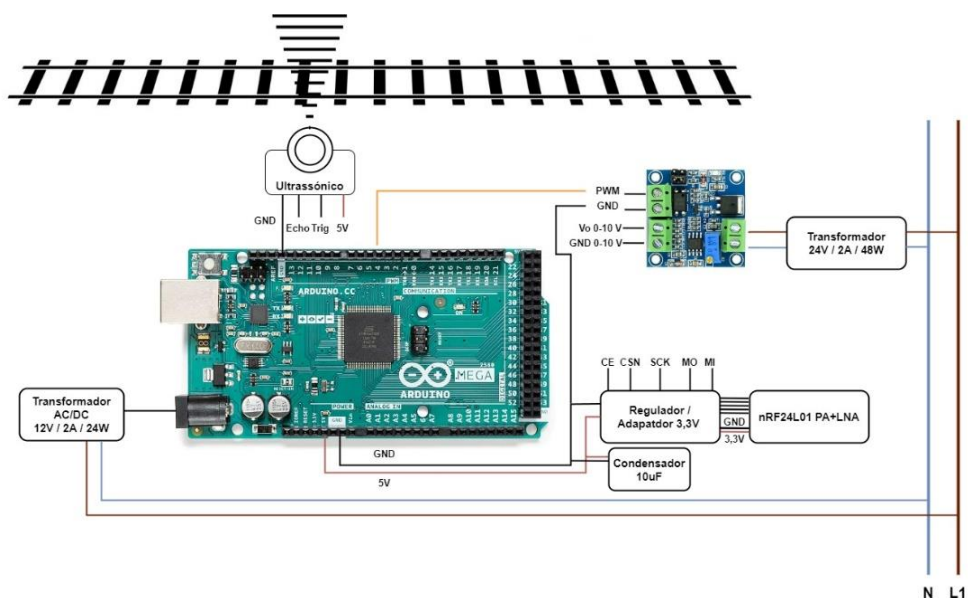


Figura 34 – Unidade de Controlo Local – Túnel Ferroviário: Esquema de ligação.

O custo de aquisição dos componentes de uma unidade de controlo local, para túneis ferroviários, encontra-se descrito na Tabela 22.

Tabela 22 - Unidade de Controlo Local associada a Túneis Ferroviários: Componentes e Custos Associados.

| Túneis Ferroviários: Unidade de Controlo Local | Custo de Aquisição (€) |
|--|---|
| ATmega2560 - Arduino MEGA REV3 | 26,42 € |
| Transformador 12 VDC - 2A - 24W | 2,95 € |
| Sensor Ultrassónico - JSN-SR04T | 9,95 € |
| Regulador 3,3V / Adaptador | 1,10 € |
| Módulo nRF24L01 PA+LNA | 6,59 € |
| Condensador 10 uF | 0,30 € |
| Cabos | 1,50 € |
| Módulo PWM para sinal 0-10V: LC-LM358- PWM2V | Variável consoante o número de unidades necessárias (Preço Unitário 1,54 €) |
| Transformador 24V 2A | 6,15 € |
| DC Barrel Jack Adapter Female | 0,86 € |

Por outro lado, as unidades de controlo locais associadas a plataformas de passageiros, para além de controlarem a iluminação através da deteção de comboios também consideram a presença de pessoas para o controlo da mesma. Desta forma, a Figura 35 representa um esquema de ligação possível relativo a essas unidades, com a associação de um sensor PIR e um sensor ultrassónico.

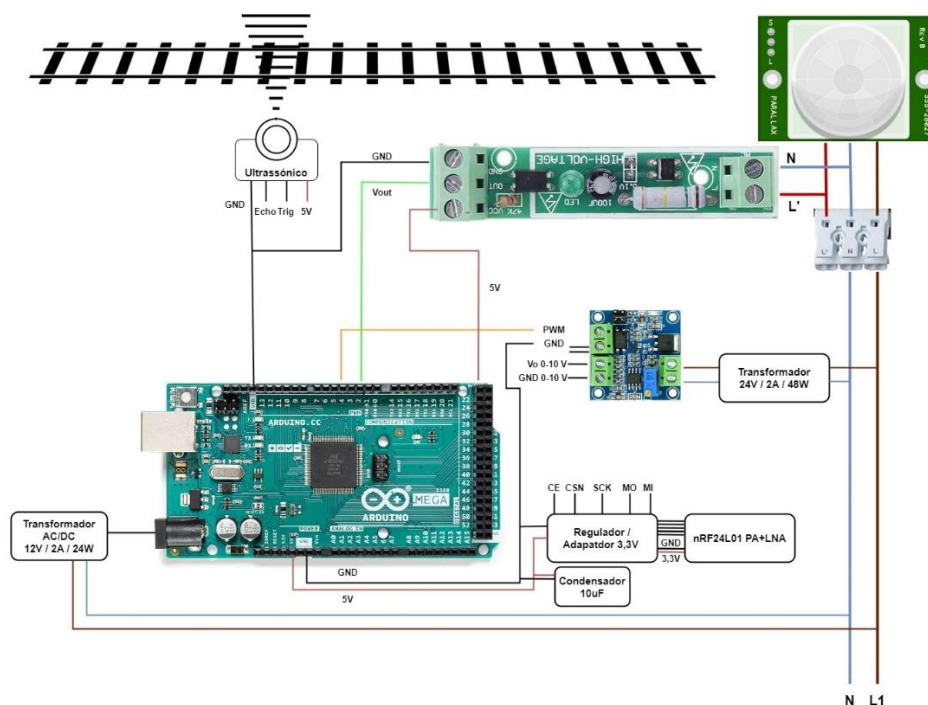


Figura 35 – Unidade de Controlo Local – Plataformas de Passageiros: Esquema de ligação.

O custo associado a uma unidade de controlo local implementada em plataformas de passageiros encontra-se descrito na Tabela 23, na sua forma mais básica, segundo os diversos componentes que a constituem.

Tabela 23 - Unidade de Controlo Local associada a Plataformas: Componentes e Custos Associados.

| Plataformas: Unidade de Controlo Local | Custo de Aquisição (€) |
|---|---|
| ATmega2560 - Arduino MEGA REV3 | 26,42 € |
| Transformador 12 VDC - 2A - 24W | 2,95 € |
| Sensor Ultrassónico - JSN-SR04T | 9,95 € |
| Regulador 3,3V / Adaptador | 1,10 € |
| Módulo nRF24L01 PA+LNA | 6,59 € |
| Condensador 10 uF | 0,30 € |
| Cabos | 1,50 € |
| Módulo PWM para sinal 0-10V: LC-LM358-PWM2V | Variável consoante o número de unidades necessárias (Preço Unitário 1,54 €) |
| Transformador 24V 2A | 6,15 € |
| DC Barrel Jack Adapter Female | 0,86 € |
| Sensor PIR: <i>Oktaplex</i> | 19,99 € |
| Módulo de isolamento de optocoplador | 5,99 € |

5.5.4 Unidade de Controlo Intermédia

As Unidades de Controlo Intermédias têm como principal função realizar a interligação de pacotes de dados entre o *master* e as unidades de controlo locais. Deste modo, como representado na Figura 36, o esquema de ligação é apenas constituído pelos componentes necessários para a comunicação RF, unidade de processamento e respetivo transformador de alimentação.

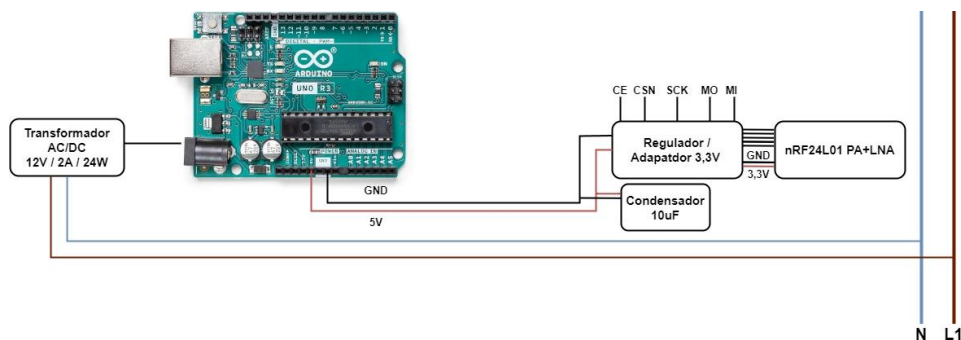


Figura 36 – Unidade de Controlo Intermédia: Esquema de Ligação.

O custo de aquisição dos componentes que constituem esta Unidade é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Unidade de Controlo Intermédia: Componentes e Preços Associados.

| Unidade de Controlo Intermédia | Custo de Aquisição (€) |
|---------------------------------|------------------------|
| Atmega328p - Arduino UNO | 24,90 € |
| Transformador 12 VDC - 2A - 24W | 2,95 € |
| Regulador 3,3V / Adaptador | 1,10 € |
| Módulo nRF24L01 PA+LNA | 6,59 € |
| Condensador 10 uF | 0,30 € |
| Cabos | 1,50 € |
| Total | 37,34 € |

5.5.5 Unidade de Controlo *Master*

A unidade de controlo denominada de *master* é a unidade principal de todo o sistema e é a única que recebe a informação sobre o estado de ocupação de todas as secções monitorizadas. Desta forma, conhecendo o estado de ocupação de todas as secções, são enviados pacotes para as unidades de controlo inferiores com a informação que permite o controlo da iluminação. Por outro lado, é nesta unidade que está associado um módulo *NodeMCU* ESP32 que permite a interligação do sistema com a *web*, permitindo o controlo remoto de todo o sistema de iluminação.

5.5.5.1 NodeMCU ESP32

O módulo *NodeMCU ESP32*, produzido pela *Espressif Systems*, é um microcontrolador constituído por um módulo *Wi-Fi* e *Bluetooth* tornando-o adequado para sistemas baseados em *IoT* e aplicações de comunicação *wireless*.

A utilização deste microcontrolador permite a criação de um *servidor web*, hospedado numa rede local, onde é possível o controlo da iluminação através de uma página acessível via Hypertext Transfer Protocol (*HTTP*), como apresentado na Figura 37.



Figura 37 – Página HTTP para Controlo Iluminação.

Este controlo traduz-se em quatro modos de operação distintos: (1) “*On*”: Luminárias ligadas à intensidade máxima; (2) “*Dinâmico*”: Iluminação controlada mediante o estado de ocupação detetado pelos sensores; (3) “*OFF*”: Luminárias desligadas; (4) “*Iluminação de Segurança*”: Luminárias ligadas à intensidade de segurança.

Para permitir o acesso externo ao servidor, o que consequentemente se traduz na possibilidade de controlo remoto da iluminação a centenas de quilómetros de distância, primeiramente é necessário identificar o endereço IP público da rede onde está alojado o servidor *web*. Este endereço, funciona como identificador externo da rede local. Posteriormente, através das configurações avançadas do *router* onde está hospedado o servidor *web*, é necessário definir os seguintes parâmetros:

- Nome da aplicação;
- Número de Porta Externa, utilizado para o acesso ao servidor remotamente (Porta Externa: 80 – serviço HTTP);
- Número de Porta interna, configurada no servidor *web*;
- Endereço IP local do dispositivo (ESP32) que executa o servidor,
- Protocolo de Comunicação, neste caso, por ser utilizado na maioria das conexões *web*, protocolo TCP.

Através da correta configuração de todos os parâmetros, o acesso remoto ao servidor *web* é realizado a partir do endereço IP público e da porta externa configurada: `http://<IP_PUBLICO>:<PORTA>`.

Posteriormente, a comunicação entre o módulo *NodeMCU ESP32* e o *Arduino* ocorre através de comunicação serial, como ilustrado na Figura 38.

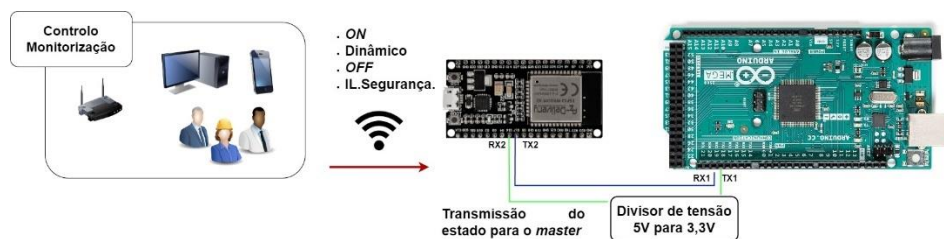


Figura 38 – Comunicação Central de Controlo / ESP32 / Master.

Para uma alimentação estável do ESP32, o transformador utilizado através da porta *micro-usb* deve fornecer uma tensão ideal de 5 V e uma corrente de pelo menos 500 mA. Por outro lado, caso se pretenda realizar comunicações seriais do *Arduino* para o ESP32, é necessário aplicar um divisor de tensão, já que a tensão máxima a que os pinos do EPS32 operam é 3,3 V.

Pelo facto de os sistemas de iluminação inteligente permitirem a integração dos mais diversos sensores, incluindo, por exemplo, sensores de monitorização de qualidade do ar, o microcontrolador considerado para o *master* é o *ATmega2650*, associado ao *Arduino Mega REV3*.

5.5.5.2 Esquemas de Ligação e Custos da Unidade de Controlo *Master*

Os periféricos associados à unidade de controlo *master* podem variar dependendo se a sua aplicação é associada a túneis ferroviários ou plataformas de passageiros. Neste ponto, para ilustrar essas diferenças, são apresentados os esquemas de ligação associados para cada uma dessas aplicações. Na Figura 39, é apresentado um possível esquema de ligação associado a túneis ferroviários.

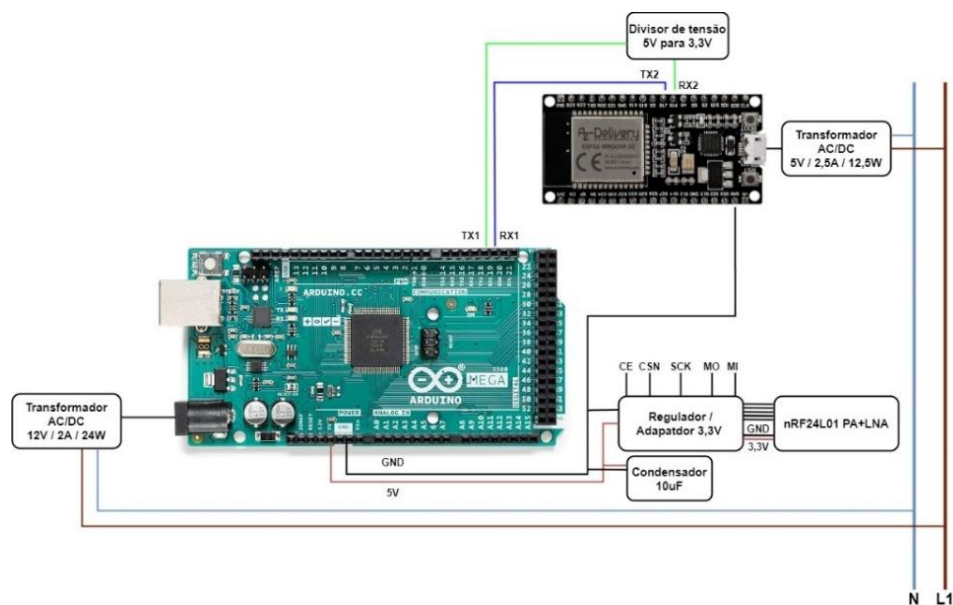


Figura 39 – *Master* em Túneis Ferroviários: Esquema de ligação.

Na Tabela 25 é apresentado o custo de implementação da Unidade de Controlo *master*, em túneis ferroviários.

Tabela 25 – *Master* em Túneis Ferroviários: Componentes e Preços Associados

| Módulo: Master | Custo de Aquisição (€) |
|---------------------------------|------------------------|
| ATmega2560 - Arduino MEGA REV3 | 26,42 € |
| Transformador 12 VDC - 2A - 24W | 2,95 € |
| Regulador 3,3V / Adaptador | 1,10 € |
| Módulo nRF24L01 PA+LNA | 6,59 € |
| Condensador 10 uF | 0,30 € |
| Cabos | 1,50 € |
| Resistência 3,3 kohm | 0,10 € |
| Resistência 4,7 kohm | 0,10 € |
| Resistência 1 kohm | 0,10 € |
| ESP32 NodeMCU | 7,72 € |
| Transformador 5V 2.5A 12.5W | 5,60 € |
| Total | 52,48 € |

Para um sistema mais dinâmico e eficiente, nas plataformas de passageiros é associado um sensor fotoelétrico ao *master*. A implementação deste sensor tem como principal objetivo que a iluminação apenas seja ligada quando a iluminância natural existente for insuficiente para garantir a segurança de pessoas, bens e infraestruturas. No entanto, uma análise aos produtos existentes no mercado constatou que os sensores compatíveis com o *Arduino* não possuem a resistência necessária para uma aplicação exterior. Desta forma, foi necessário a utilização de um sensor fotoelétrico com uma tensão de operação de 220 a 240 VAC, sensibilidade de 5 lux a 50 lux e um índice de proteção IP66. Associado ao sensor fotoelétrico, é colocado um módulo de isolamento optoacoplador, igual ao utilizado para a implementação dos sensores PIR. Consequentemente, quando a iluminância associada à luz natural for menor que o limiar regulado, a saída do módulo de isolamento optoacoplador encontra-se no estado *HIGH*. Por outro lado, quando a iluminância associada à luz natural for maior que o limiar regulado, a saída é definida como *LOW*. Na Figura 40 é apresentado o esquema de ligação da Unidade de Controlo *master* em Plataformas de Passageiros.

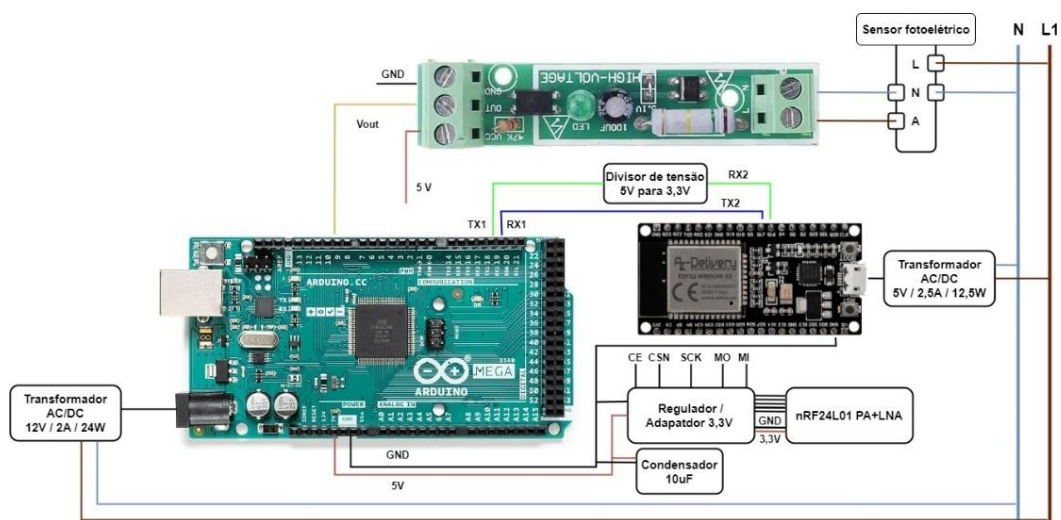


Figura 40 – *Master* em Plataformas de Passageiros: Esquema de ligação.

Na Tabela 26 é apresentado o custo de implementação da unidade de controlo *master*, em plataformas de passageiros.

Tabela 26 – *Master* em Plataformas de Passageiros: Componentes e Preços Associados

| Módulo: Master | Custo de Aquisição (€) |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| ATmega2560 - Arduino MEGA REV3 | 26,42 € |
| Transformador 12 VDC - 2A - 24W | 2,95 € |
| Regulador 3,3V / Adaptador | 1,10 € |
| Módulo nRF24L01 PA+LNA | 6,59 € |
| Condensador 10 uF | 0,30 € |
| Cabos | 1,50 € |
| Resistência 3,3 kohm | 0,10 € |
| Resistência 4,7 kohm | 0,10 € |
| Resistência 1 kohm | 0,10 € |
| ESP32 <i>NodeMCU</i> | 7,72 € |
| Transformador 5V 2.5A 12.5W | 5,60 € |
| Módulo de isolamento de optoacoplador | 5,99 € |
| Sensor de Luz Fotoelétrico | 6,99 € |
| Total | 65,46 € |

5.6 Estrutura dos códigos associados às Unidades de Controlo

Nesta subsecção são apresentados os fluxogramas que representam as linhas de código características de cada unidade de controlo. No caso da iluminação em túneis ferroviários, as linhas escritas têm como principal objetivo uma iluminação sequencial do túnel à medida que o comboio é detetado nas secções. Por outro lado, no caso das plataformas de passageiros, sempre que um comboio e/ou utilizadores sejam detetados, a iluminação é ligada à sua intensidade máxima em toda a plataforma.

5.6.1 Túneis Ferroviários: Fluxogramas associados às Unidades de Controlo Locais

Nas unidades de controlo locais associadas a túneis ferroviários, o código descrito é estruturado no *setup()*, *loop()* e nas funções *distancia_sensor()*, *enviar_mensagem()* e *controlo_iluminacao()*.

Na função *setup()* realizam-se as configurações das portas associadas ao sensor ultrassónico à comunicação SPI e comunicação RF.

Como referido anteriormente, os parâmetros definidos para a comunicação RF devem possuir valores iguais em todas as Unidades de Controlo. Estes parâmetros encontram-se presentes na Tabela 27, com a respetiva configuração.

Tabela 27 – Configurações associadas à comunicação RF.

| Parâmetros | Valores |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Frequência Canal RF | 90 (correspondente a 2490 GHz) |
| Taxa de Comunicação | 250 kbps |
| Nível do amplificador de potência | Máximo |
| Tamanho CRC | 2 bytes |

Posteriormente, como representado na Figura 41, o desenrolar de todas as ações ocorre na função *loop()* e é através da mesma que se monitoriza a ocupação da secção respetiva, se verifica a existência de dados para serem lidos e se envia informação sobre o estado de ocupação da secção para a unidade superior.

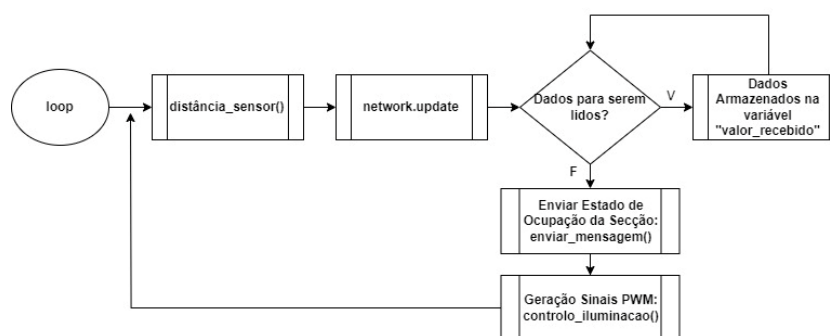


Figura 41 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função *loop()*.

Primeiramente, é realizada a medição da distância a que se encontra o obstáculo mais próximo através da chamada da função *distancia_sensor()*. Para isso, é gerado um pulso de *trigger* que é colocado a *HIGH* durante 10 μ s. Posteriormente, é calculado o tempo que esse mesmo pulso demora até ser recebido no pino *echo*. Com base nesse tempo, é realizado o cálculo da distância, em centímetros, a que se encontra a superfície mais próxima. Tendo em consideração a distância a que é colocado o sensor da linha ferroviária, é possível filtrar e detetar se o valor medido corresponde à deteção de um comboio.

No fluxograma presente na Figura 42, que retrata as linhas de código presentes na função *distancia_sensor()*, a distância máxima entre o sensor e o comboio é representada por "*x*". Deste modo, sempre que a "*distância > x*", a variável "*valor_enviado*" é colocada a zero representando que a zona monitorizada pelo sensor não está a detetar nenhum comboio. Por outro lado, quando é detetada a superfície lateral do comboio, a variável "*valor_enviado*" fica com o valor de "*a*". Este "*a*" é característico de cada Unidade de Controlo Local e representa um número inteiro que identifica a presença do comboio em cada secção. Este valor é posteriormente enviado através da função "*enviar_mensagem()*" para a Unidade de Controlo Superior, indicando o estado de ocupação da secção.

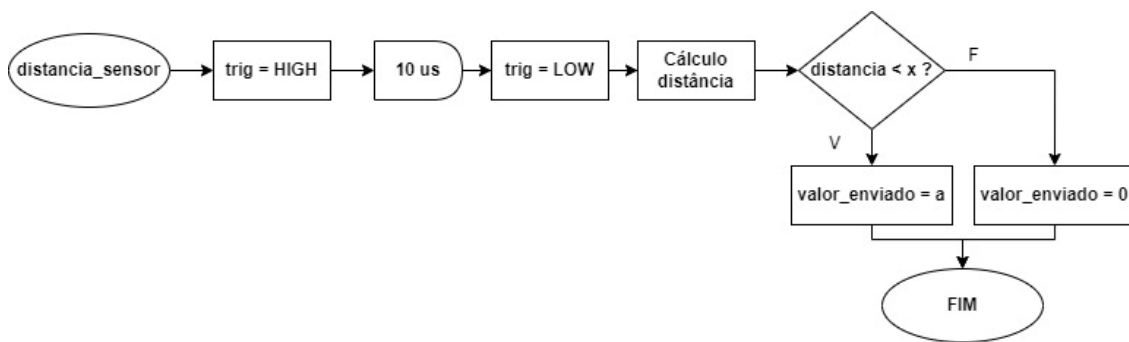


Figura 42 - Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função “*distancia_sensor()*”.

No projeto em causa, considerou-se que o valor que identifica a presença do comboio em cada secção é definido segundo a progressão geométrica:

$$a_n = 2^n \text{ para } n \in \{1,2,3,\dots\} \quad (9)$$

Desta forma, quando é detetada a presença do comboio na secção 1 ($n = 1$), o valor enviado pela Unidade de Controlo respetiva é de $a_1 = 2$. Do mesmo modo, quando na secção 2 ($n = 2$) é detetada a presença do comboio, o valor enviado pela Unidade de Controlo Local associada será $a_2 = 4$, e assim sucessivamente. Por outro lado, quando não é detetada a presença de nenhum comboio, o valor enviado será de 0, na secção respetiva.

No exemplo apresentando na Figura 43, considerando a presença do comboio na secção 3 e 4, a_1 e a_2 são iguais a 0, a_3 igual a 8 e a_4 igual a 16. Estes valores, sendo enviados para as Unidades de Controlo Superiores vão permitir às mesmas identificar que o comboio está presente na secção 3 e secção 4.

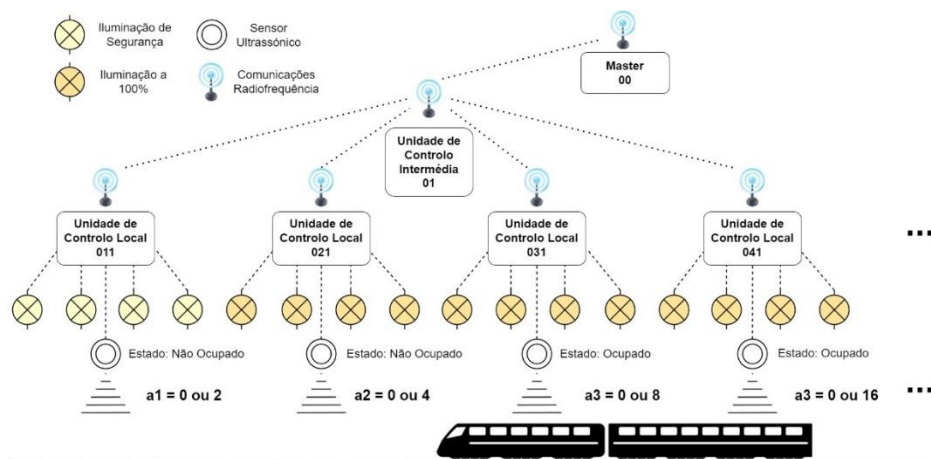


Figura 43 – Identificação do estado cada secção pelo a_n respetivo.

De seguida, depois de determinada a distância a que se encontra a superfície mais próxima e conseqüente presença ou não presença do comboio na secção, é realizada uma atualização do estado da rede e verifica-se se existem novos pacotes para serem lidos e processados através da função *network.update()*, presente na biblioteca *<RF24Network>*.

Posteriormente, com base na informação enviada pelas Unidades de Controlo Locais relativa ao estado da ocupação das secções respetivas, as Unidades Hierarquicamente Superiores enviam pacotes de dados com a informação que permite o controlo da intensidade luminosa das luminárias. Estes pacotes possuem um valor que identifica quais secções devem estar a funcionar com as luminárias à intensidade máxima, quais devem estar com a funcionar à iluminação de segurança e quais devem estar a funcionar com as luminárias desligadas. Através da função “*network.read()*”, este valor é armazenado na variável “*valor_recebido()*” para ser posteriormente processado na função “*controlo_iluminacao()*”.

Quando todos os pacotes de informação forem processados, a variável “*valor_enviado*”, cujo conteúdo traduz o estado de ocupação da secção respetiva, é transmitida para a Unidade de Controlo Superior através da função “*enviar_mensagem()*”, como representado na Figura 44. O envio do pacote é realizado através da função “*network.write()*”.

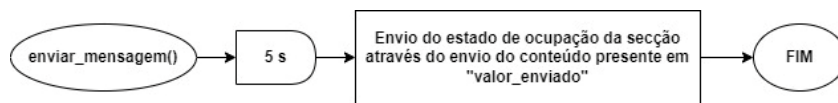


Figura 44 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função “*enviar_mensagem()*”.

Tendo o estado de ocupação da secção sido enviado através da variável “*valor_enviado*”, é chamada a função “*controlo_iluminacao()*” que, com base no “*valor_recebido*” vai gerar os sinais PWM necessários para o controlo adequado da iluminação, de acordo com a Figura 45. Na Figura 45, o valor de “*z*” corresponde à soma dos valores enviados pelas Unidades de Controlo, quando todas estão a detetar a presença do comboio nas respetivas secções.

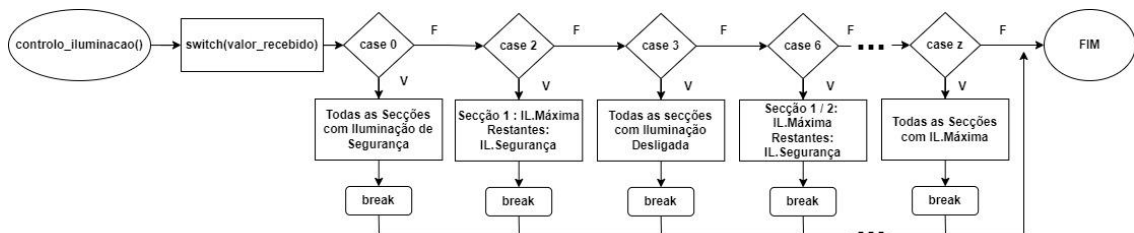


Figura 45 – Túneis Ferroviários (UCL): Fluxograma da função “*controlo_iluminacao()*”.

5.6.2 Túneis Ferroviários: Fluxogramas associados às Unidades de Controlo Intermédias

O código desenvolvido para as Unidades de Controlo Intermédias é dividido em quatro funções principais: *setup()*, *loop()*, *leitura_RF()* e *enviar_mensagem()*.

Pelo facto da principal função destas unidades de controlo estar relacionada com o reencaminhamento de informação entre diferentes camadas, na função *setup()* são apenas configuradas as portas associadas às comunicações SPI e comunicações RF.

Posteriormente, na função *loop()*, Figura 46, é atualizado o estado da rede e verifica-se a existência de novos pacotes para serem lidos. Caso existam, esses pacotes são lidos através da função *leitura_RF()*. Por fim, é chamada a função *enviar_mensagem()* que vai reencaminhar os dados anteriormente lidos para os nós respetivos.

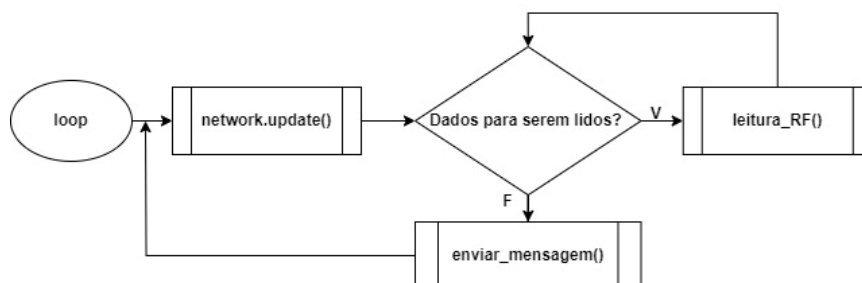


Figura 46 – Túneis Ferroviários (UCI): Fluxograma da função *loop()*.

Utilizando como referência o exemplo da Figura 43, caso a Unidade de Controlo Intermédia pretenda ler o estado de ocupação das quatro Unidades de Controlo Locais associadas, o código deve possuir a capacidade de compactar a informação dos quatro pacotes recebidos num único, para que este seja posteriormente enviado para o *master*. Para isso, a função *leitura_RF()*, como representado na Figura 47, vai associar cada pacote recebido, com a informação sobre o estado de ocupação das secções, às variáveis a_1 , a_2 , a_3 e a_4 , consoante o endereço do remetente do pacote.

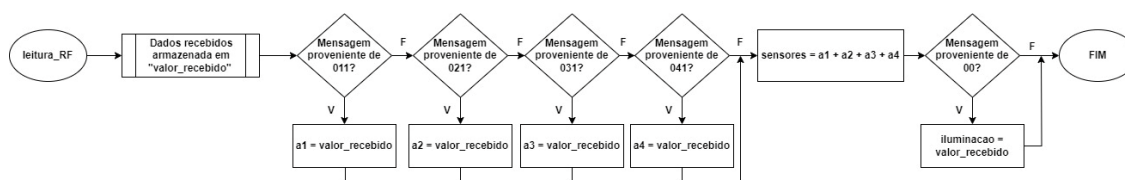


Figura 47 – Túneis Ferroviários (UCI): Fluxograma da função *leitura_RF()*.

Posteriormente, os valores associados às variáveis a_1 , a_2 , a_3 e a_4 são somados na variável “*sensores*” e é o resultado desta soma que traduz o estado de ocupação das quatro secções individualmente, num único pacote, como observado na Tabela 28.

Tabela 28 – Variação do conteúdo da variável *sensores* consoante a deteção do comboio por secções.

| sensores | Secção a_1 | Secção a_2 | Secção a_3 | Secção a_4 |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0 | | | | |
| 2 | Comboio detetado | | | |
| 4 | | Comboio detetado | | |
| 6 | Comboio detetado | Comboio detetado | | |
| 8 | | | Comboio detetado | |
| 12 | | Comboio detetado | Comboio detetado | |
| 14 | Comboio detetado | Comboio detetado | Comboio detetado | |
| 16 | | | | Comboio detetado |
| 24 | | | Comboio detetado | Comboio detetado |

| | | | | |
|----|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 28 | | Comboio detetado | Comboio detetado | Comboio detetado |
| 30 | Comboio detetado | Comboio detetado | Comboio detetado | Comboio detetado |

De seguida, como retratado na Figura 47, é verificado se o pacote recebido é proveniente do *master*. Caso se verifique, este pacote possui informações relativas a comandos de iluminação e, conseqüentemente, o conteúdo do pacote é associado à variável “*iluminacao*”.

Posteriormente, através da função “*enviar_mensagem()*”, como representado na Figura 48, as informações contidas na variável “*iluminacao*” são enviadas para as Unidades de Controlo Locais de modo que estas consigam controlar a iluminação de forma eficiente e dinâmica. Além disso, a variável “*sensores*” é transmitida para o *master* para que o mesmo possa analisar a informação e determinar qual o comando de iluminação que mais se adequa às necessidades luminotécnicas do local.

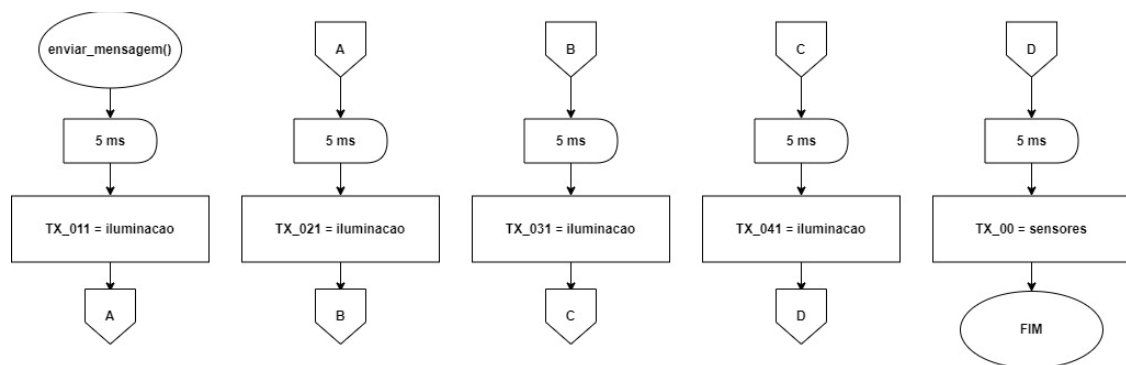


Figura 48 – Túneis Ferroviários (UCI): Fluxograma da função *enviar_mensagem()*.

Na Figura 49, é apresentado graficamente de que forma os pacotes se distribuem na rede de comunicação de forma exemplificada.

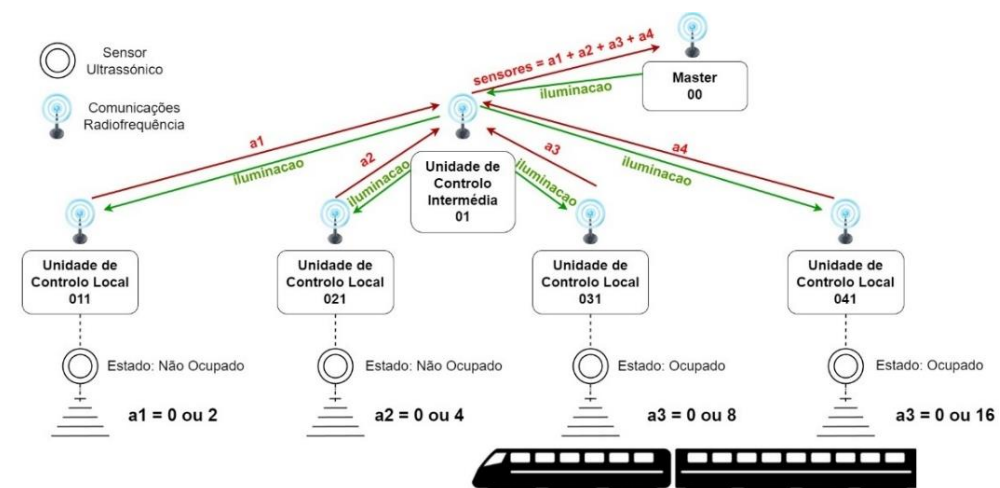


Figura 49 – Troca de Pacotes entre as diferentes Unidades de Controlo.

5.6.3 Túneis Ferroviários: Fluxogramas associados à Unidade de Controlo *Master*

No controlo da iluminação em túneis ferroviários, as informações sobre o estado de ocupação de todas as secções são entregues ao *master*. Com base nessa informação, o *master* envia os sinais para as unidades de controlo inferiores, permitindo que estas controlem a iluminação ajustando o valor de *duty-cycle*, associado ao sinal de controlo entregue às luminárias.

Assim, foi considerado que as luminárias devem estar a imitar a intensidade máxima de luz artificial nas secções onde o comboio está a ser detetado. Do mesmo modo, para que o maquinista possua uma visibilidade adequada do troço que está a percorrer, também devem ser ligadas à intensidade máxima as luminárias da secção/secções imediatamente seguintes. O número de secções a ligar na vanguarda do comboio deve ser definido tendo em conta o sentido do movimento e a velocidade típica de circulação no túnel ferroviário em causa. Por outro lado, as restantes secções devem possuir as suas luminárias a funcionar à intensidade de segurança.

Para tornar todo o sistema mais eficiente enquanto se garante que não ocorrem oscilações indesejáveis na intensidade da iluminação, no *software* desenvolvido para esta unidade de controlo associou-se o *Timer/Counter 1* a uma interrupção. Através da mesma, é possível que a iluminação permaneça ligada durante um determinado intervalo de tempo mesmo que o comboio não esteja a ser detetado por nenhum sensor, como ilustrado na Figura 50.

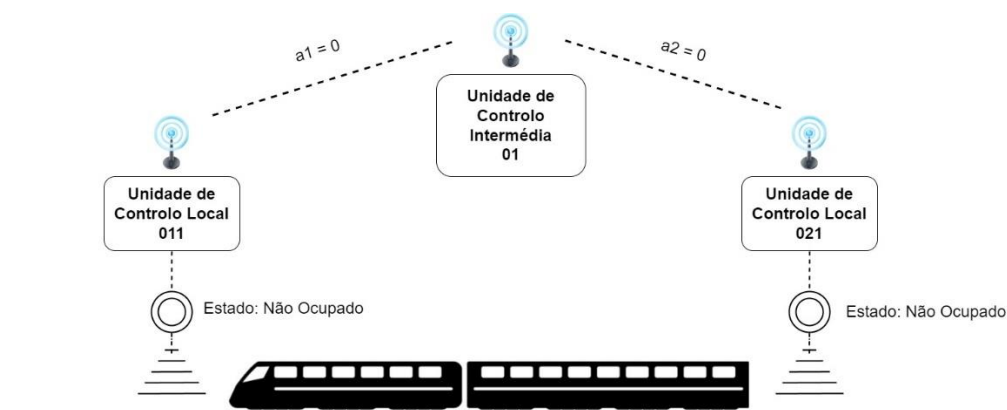


Figura 50 – Representação gráfica de possível situação onde o comboio não é detetado.

Desta forma, utilizando o *Timer/Counter 1* associado à interrupção em causa, o *master* só envia o comando para colocar a iluminação a funcionar no modo de segurança quando não existir qualquer comboio detetado durante um determinado intervalo de tempo. Para questões de teste, no *software* desenvolvido o intervalo de tempo considerado foi de 5 segundos. No entanto, este valor pode ser ajustado consoante as necessidades específicas de cada local.

Numa aplicação prática recomenda-se que este intervalo de tempo seja maior, como por exemplo 1 minuto, para evitar oscilações indesejáveis na iluminação. Desta forma, o comboio pode estar a deslocar-se entre sensores sem que a iluminação diminuía a sua intensidade nas secções respetivas. No entanto, é necessário compreender que, quanto maior este intervalo de tempo, maior o consumo energético associado à instalação.

Além disso, a aplicação do *Timer/Counter 1*, nestas condições, permite que a iluminação retorne ao modo de segurança caso, por exemplo, possíveis animais atravessem a área de deteção dos sensores.

O *timer* foi configurado no modo *Clear Timer on Compare Match* (CTC) permitindo que o seja gerada uma interrupção sempre que o valor do contador *TCNT1* igualar *OCR1A*. O valor de *OCR1A*, que define o intervalo de tempo entre interrupções, pelo facto de o *timer* ser de 16 bits, pode ir de 0 a 65535. Este, vai depender do *prescaler* definido e da frequência de *clock* do microcontrolador, no caso 16 MHz. Para se obter intervalos de tempo maiores entre interrupções, configurou-se um *prescaler* de 1024. No entanto, o intervalo de tempo máximo entre interrupções associado é de 4,19 segundo.

Desta forma, para que a iluminação apenas seja colocada no modo de segurança 5 segundos depois da última deteção do comboio, configurou-se a interrupção para que a mesma seja chamada de 1 em 1 segundo, com o incremento sucessivo da variável “*count*” a cada chamada. No entanto, sempre que for detetado um veículo, “*count*” toma o valor de 0, reiniciando a contagem. A determinação do valor de *OCR1A* foi calculado da seguinte forma:

$$f_{\text{Timer1}} = \frac{f_{\text{CLK}}}{\text{Prescaler}} = \frac{16 \text{ MHz}}{1024} = 15\,625 \text{ Hz} = 64 \mu\text{s} \quad (10)$$

$$\text{OCR1A} = f_{\text{Timer1}} * \Delta t_{\text{INT}} - 1 = 15\,625 * 1 - 1 = 15\,624 \quad (11)$$

, onde Δt_{INT} representa o intervalo de tempo, em segundos, entre interrupções.

Consequentemente, para que a iluminação seja colocada no modo de segurança é necessário que a interrupção seja chamada cinco vezes, com essa gestão a ser realizada através da variável “*count*”. Posteriormente, verificando-se que decorreram 5 segundos desde a última deteção, faz-se uma última verificação sobre se existe algum comboio detetado pelos sensores. Caso não se detete nenhum comboio, a variável “*valor_enviado*” é colocada a 0 e é através dessa informação que é dado o comando para que todas as luzes sejam colocadas no modo de segurança. Do mesmo modo, para indicar que não existe nenhum veículo presente no túnel, a variável “*sentido*” é colocada a 0. Na Figura 51 é apresentado em formato de fluxograma a informação descrita.

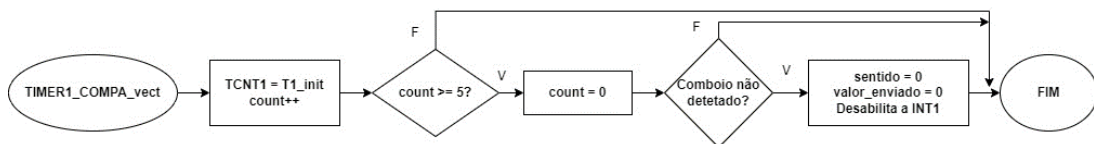


Figura 51 – Túneis Ferroviários (*master*): Fluxograma associado à Interrupção do *Timer/Counter 1*.

Além desta interrupção, o código desenvolvido para o *master* é constituído pelas funções principais: *setup()*, *loop()*, *leitura_sensores_comunicacaoRF()*, *definicao_sentido()*, *valor_iluminacao()*, *analise_estado_WIFI()*, e *enviar_mensagem()*.

Como nas unidades de controlo locais e intermédias, no *master*, a função *setup()* permite a configuração das portas associadas às comunicações SPI e RF. Além disso, também permite a

configuração do *Timer/Counter* associado à interrupção em causa, com um *prescaler* de 1024, *OCR1A* de 15 624 e a funcionar no modo de operação CTC.

Por sua vez, no *loop()* é onde são chamadas as restantes funções, cujo o modo de funcionamento se encontra representado na Figura 52.

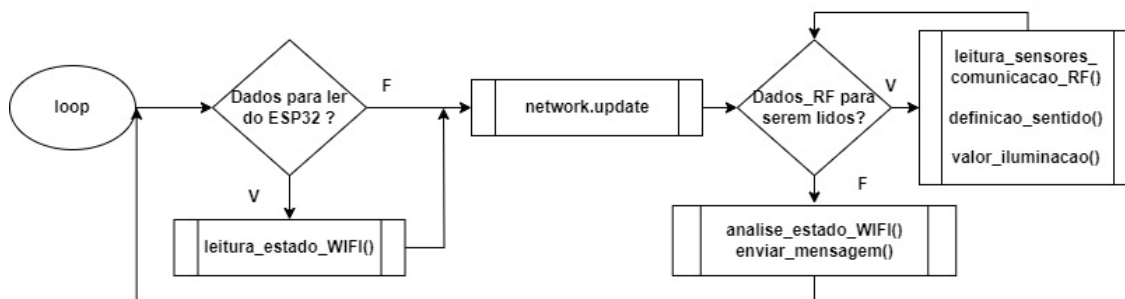


Figura 52 – Túneis Ferroviários (*master*): Fluxograma da função *loop()*.

Primeiramente, é realizada a verificação se existem novos dados para serem processados, provenientes do *NodeMCU ESP32*. Caso existam, é chamada a função *leitura_estado_WIFI()*, com o principal objetivo de determinar qual o modo de funcionamento do sistema, definido via *web*. Para isso, instituiu-se que cada modo de operação está associado um valor inteiro (*ON* = 1, *Dinâmico* = 2, *OFF* = 3, *Iluminação de Segurança* = 4). Desta forma, sempre que se alterar o modo de funcionamento do sistema, o *ESP32*, através de comunicação serial, envia para o *ATmega2560* o número que identifica esse mesmo modo de operação. Definindo-se qualquer outro modo que não seja o “Dinâmico”, a interrupção associada ao *Timer/Counter* 1 é desativada para que a iluminação não retorne à intensidade de segurança decorridos 5 segundos da alteração do modo de operação, através da função *leitura_estado_WIFI()*. A Figura 53 representa o fluxograma associado ao código desta função.

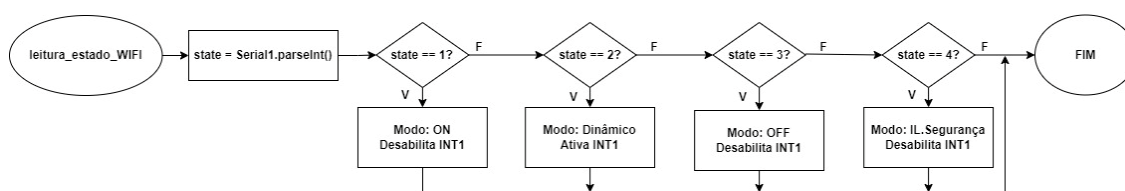


Figura 53 – Túneis Ferroviários (*master*): Fluxograma da função *leitura_estado_WIFI()*.

Verificado o estado definido via *web*, é chamada a função *network.update()* e é verificado se existem pacotes para serem lidos, provenientes da rede comunicação *wireless*. Existindo novos pacotes a processar, é chamada primeiramente a função *leitura_sensores_comunicacaoRF()*, cujo intuito é idêntico à função *leitura_RF()*, presente nas Unidades de Controlo Intermédias. Esta, tem como principal objetivo armazenar os dados dos pacotes recebidos em variáveis consoante a Unidade de Controlo que enviou essa informação. Posteriormente, a informação recebida proveniente de todas as Unidades de Controlo que comunicam com o *master*, é agrupada na variável “*controlo*”, através da soma do conteúdo presente nos pacotes que foram recebidos. Na Figura 54 é apresentado um exemplo, de um

fluxograma, que traduz o código presente nesta função, quando o *master* está a receber dados de 4 unidades de controlo inferiores.

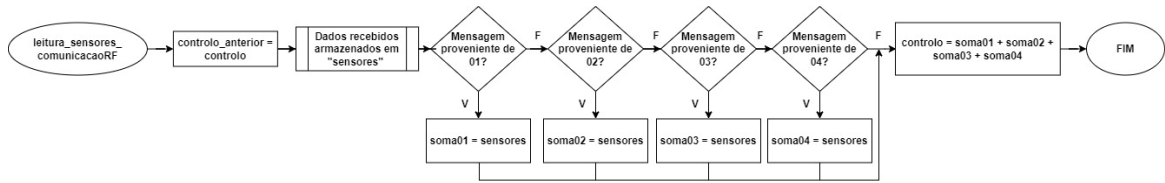


Figura 54 – Túneis Ferroviários (*master*): Fluxograma da função *leitura_sensores_comunicacaoRF()*.

Depois da chamada da função *leitura_sensores_comunicacaoRF()*, é determinado qual o sentido de movimento do comboio através da função *definicao_sentido()*. A determinação desse mesmo sentido é essencial para que a secção/secções na vanguarda do comboio tenham a iluminação a operar à intensidade máxima. Para efeitos de código, a variável “*sentido*” pode tomar os valores presentes na Tabela 29.

Tabela 29 – Possíveis valores da variável “*sentido*”.

| “sentido” | Descrição | Função onde é configurado |
|-----------|---|-------------------------------|
| 0 | Nenhum comboio presente no túnel | <i>ISR(TIMER1_COMPA_vect)</i> |
| 1 | Comboio detetado primeiramente na entrada cuja secção respetiva retorna $a_1 = 2$ na presença do mesmo. | <i>definicao_sentido()</i> |
| 2 | Sentido Inverso a 1 | <i>definicao_sentido()</i> |
| 3 | Comboio detetado já dentro do túnel (não detetado na entrada) | <i>valor_iluminacao()</i> |

Para uma melhor compreensão da função *definicao_sentido()*, é apresentado na Figura 55 um exemplo de um túnel, com quatro secções, segundo a qual se pretende determinar o sentido de movimento.

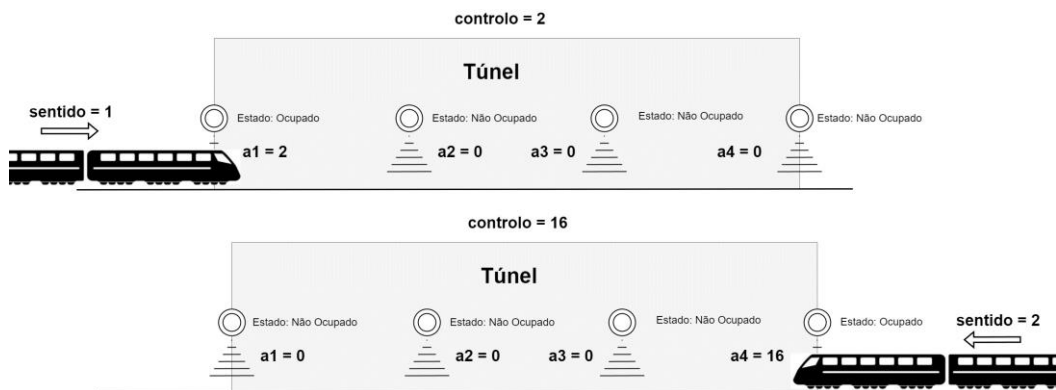


Figura 55 – Esquema exemplificativo relativo à determinação do sentido de movimento.

Através da interrupção associada ao *Timer/Counter 1*, quando a presença de um comboio não é detetada durante um período de 5 segundos, “*sentido*” é configurado com o valor de 0.

Posteriormente, com base no valor presente em “*sentido* = 0” a iluminação é colocada toda a funcionar a uma intensidade de segurança.

Desta forma, quando o comboio é detetado por um dos sensores das extremidades do túnel, é definido o sentido de movimento (1 ou 2) e a iluminação é controlada consoante esse mesmo sentido. Pelo facto de no exemplo presente na Figura 55 o túnel possuir quatro secções, os valores associados à variável “*controlo*” que caracterizam a entrada do comboio no túnel são: “*controlo*” igual a 2 ou “*controlo*” igual a 16, dependendo do sentido de movimento.

Como já foi referido, estes valores são calculados mediante a progressão geométrica apresentada na equação 9 e são os valores enviados pelas respetivas Unidades de Controlo Locais das extremidades, quando as secções associadas se encontram ocupadas. Se, por exemplo, o controlo da iluminação do túnel se realizasse com base em 5 secções, os valores de “*controlo*” que caracterizavam a entrada do comboio no túnel já seriam 2 e 32. A Figura 56, traduz graficamente o código associado à função *definicao_sentido()*, para um sistema constituído por quatro secções.

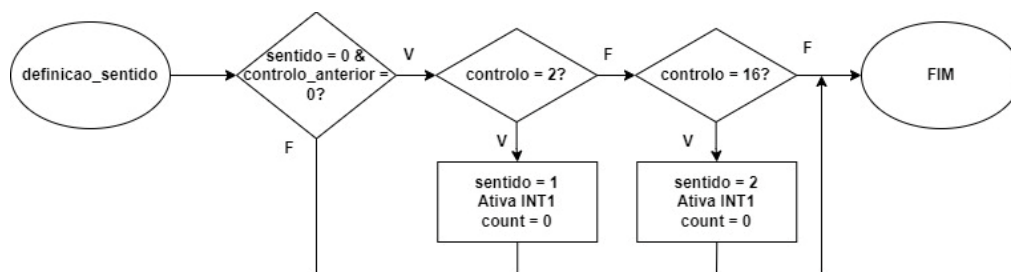


Figura 56 – Túneis Ferroviários (master): Fluxograma da função *definição_sentido()*.

Nesta função, o valor da variável “*sentido*” só é alterado caso “*sentido*” e “*controlo_anterior*” forem ambas 0. Esta verificação é realizada para que não seja definido um novo sentido quando o comboio sai do túnel.

Por outro lado, através da Tabela 29, constata-se que a variável “*sentido*” também pode tomar o valor de 3. Como o “*sentido*” é determinado nas extremidades do túnel, este é colocado a 3 para colmatar uma possível situação em que exista uma momentânea falha de energia, que reinicie os microcontroladores, enquanto o comboio circula dentro do túnel. Caso esta situação aconteça, o sentido de movimento até pode ter sido determinado na entrada, no entanto se os microcontroladores forem reiniciados e o comboio já se encontrar dentro do túnel não seria possível determinar o sentido de movimento com o código desenvolvido.

Assim, de forma a garantir uma correta iluminação do espaço, numa situação em que haja uma falha de energia que provoque uma reinicialização dos microcontroladores, se o comboio já se encontrar dentro do túnel, o sentido é colocado a 3 e todas as secções são iluminadas à intensidade máxima. Decorridos os 5 segundos definidos depois da última deteção do comboio no túnel, as luzes voltam a funcionar à intensidade de segurança e o sistema retoma o seu funcionamento normal.

Posteriormente, com base no valor da variável “*controlo*”, que traduz o estado de ocupação de todas as secções do túnel, e do “*sentido*” determinado, é chamada a função *valor_iluminacao()* que gera a informação que é enviada para as Unidades de Controlo Inferiores para que estas controlem a iluminação de forma adequada. Esta informação é armazenada na variável “*valor_enviado*” cujo valor está diretamente relacionado com as secções que se pretendem ligar à intensidade máxima. Por exemplo, devido ao estado de ocupação da linha pretende-se ligar a secção 1 e 2 do túnel. Nesta situação, a variável “*valor_enviado*” será igual à soma de $a_1 = 2$ com $a_2 = 4$ ($valor_enviado = 6$). Por outro lado, se se pretender ligar à intensidade máxima as secções 2 e 3, a variável “*valor_enviado*” será igual a 12 (resultado da soma de $a_2 = 4$ e $a_3 = 8$). Para uma melhor compreensão, na Figura 57 é apresentada graficamente a função *valor_iluminacao()* tendo em conta um túnel com quatro secções.

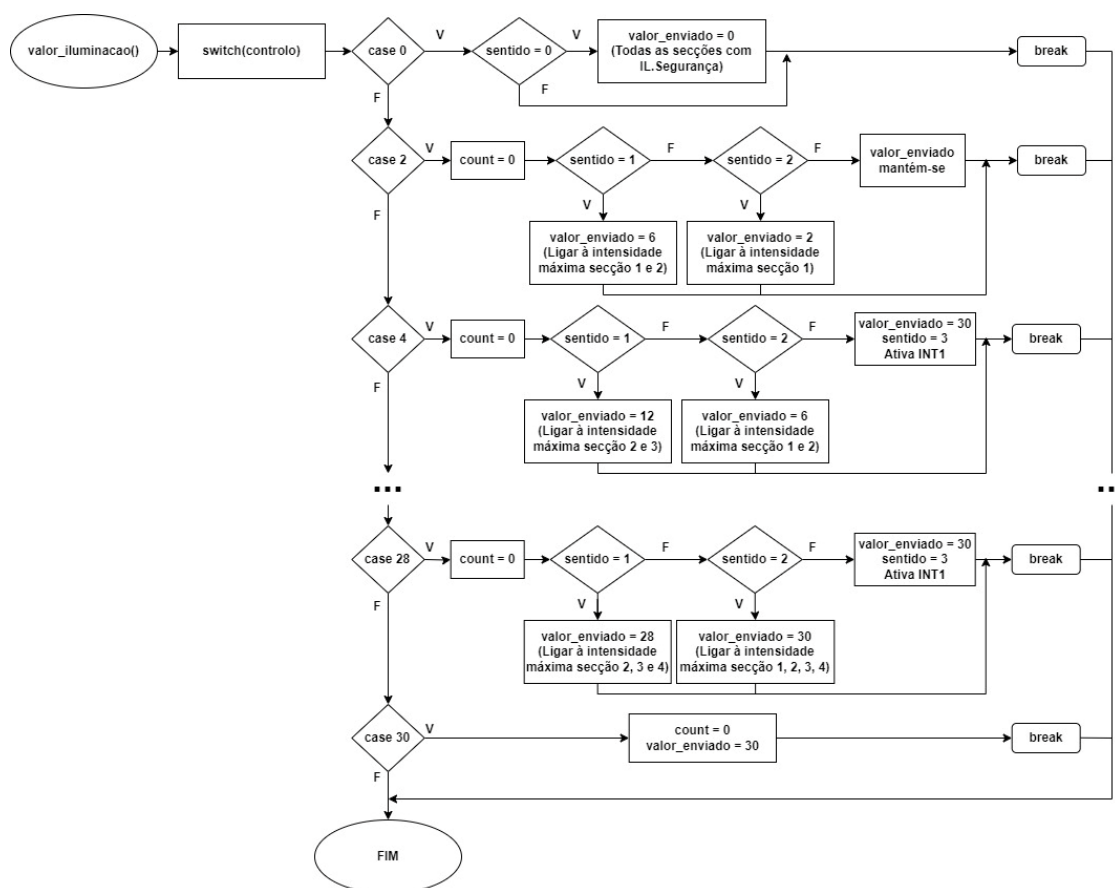


Figura 57 – Túneis Ferroviários (*master*): Fluxograma da função *valor_iluminacao()*.

De seguida, é chamada a função *analise_estado_WIFI()*, cujo fluxograma está representado na Figura 58, com o intuito de que, caso o modo de operação definido não seja o modo “Dinâmico”, o valor da variável “*valor_enviado*” seja alterado para aquele que mais se ajusta ao modo de operação definido.

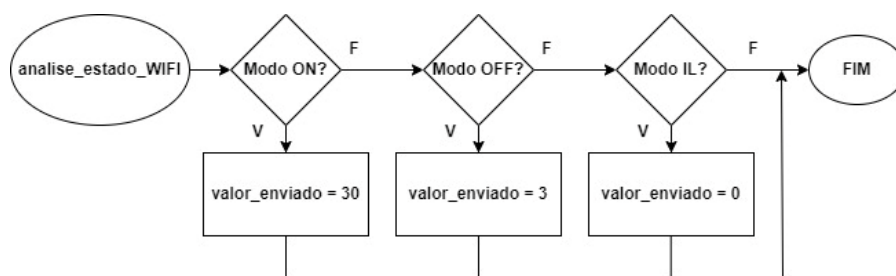


Figura 58 – Túneis Ferroviários (*master*): Fluxograma da função *analise_estado_WIFI()*.

Posteriormente, o conteúdo da variável “*valor_enviado*” é enviado para as Unidades de Controlo Inferiores com a informação que permite o controlo dinâmico das luminárias, através da função *enviar_mensagem()*. Esta função é representada pelo fluxograma da Figura 59, considerando o *master* comunica com quatro Unidades de Controlo Inferiores.

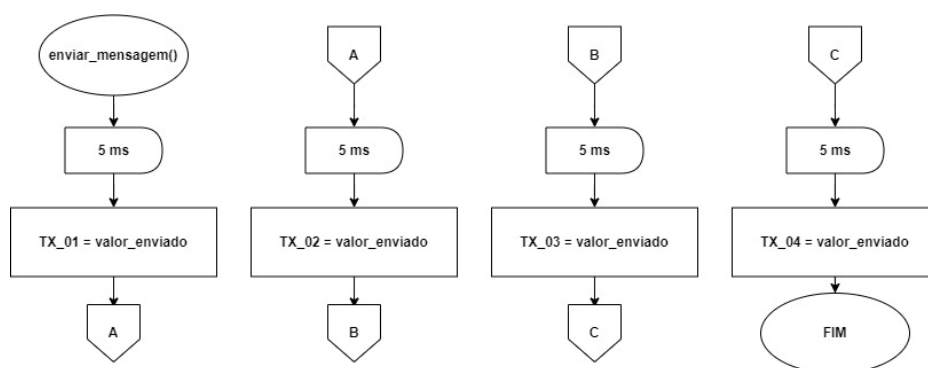


Figura 59 – Túneis Ferroviários (*master*): Fluxograma da função *enviar_mensagem()*.

5.6.4 Plataformas de Passageiros: Fluxogramas associados às Unidades de Controlo Locais

No caso das Unidades de Controlo Locais implementadas em Plataformas de Passageiros, além dos sensores ultrassónicos que detetam a chegada do comboio, a iluminação também é controlada consoante a presença de utilizadores, utilizando sensores PIR. Desta forma, apesar de o princípio de funcionamento do sistema ser idêntico àquele que é apresentado para os Túneis Ferroviários é importante efetuar uma análise distinta.

O código associado a estas Unidades de Controlo é caracterizado pela chamada das funções *setup()*, *loop()*, *distancia_sensor()*, *enviar_mensagem()* e *controlo_iluminacao()*.

Na função *setup()* são configuradas as portas I/O associadas ao sensor ultrassónico e aos sensores PIR e realiza-se igualmente as configurações necessárias para comunicações SPI e RF eficientes. O valor dos parâmetros definidos relativamente à frequência de canal RF, nível de amplificador de potência, tamanho de CRC e taxa de comunicação de dados são em tudo semelhantes àqueles que foram considerados para as comunicações em Túneis Ferroviários, como apresentado na Tabela 27.

Posteriormente, é chamada a função `loop()`, representada na Figura 60, onde todos os dados são processados.

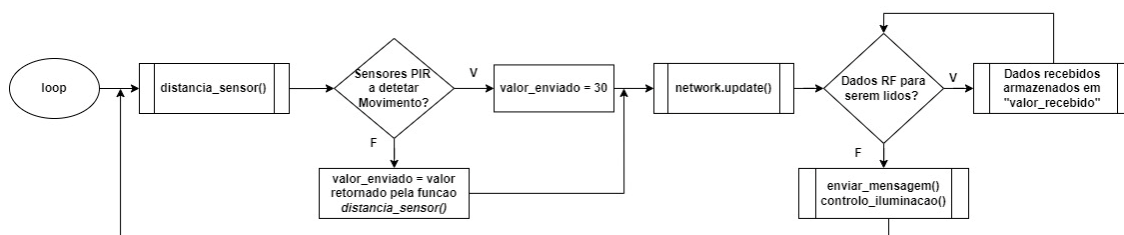


Figura 60 – Plataformas de Passageiros (UCL): Fluxograma da função `loop()`.

Primeiramente, é chamada a função `distancia_sensor()`, com o intuito de determinar o estado de ocupação da linha. A estrutura e funcionamento da mesma é exatamente igual à função, com o mesmo nome, que é chamada nas Unidades de Controlo Locais para Túneis Ferroviários, cujo fluxograma é apresentado na Figura 42. Do mesmo modo, o valor que é retornado por esta, na presença de um comboio, também é baseado na progressão geométrica presente na equação 9, cujo valor é dependente da secção que o sensor está a monitorizar. Caso não seja detetado nenhum comboio, o valor retornado pela função é 0.

De seguida, depois de monitorizar o estado de ocupação da linha, é verificado se algum dos sensores PIR, associados à Unidade de Controlo Local, está a detetar a presença de utilizadores. Caso essa situação se verifique, a variável “`valor_enviado`”, cujo o conteúdo será transmitido na função `enviar_mensagem()`, toma o valor de 30. Este valor de 30 é um valor arbitrado que indica a necessidade de ligar a iluminação da plataforma. Por outro lado, caso não sejam detetadas pessoas, o variável “`valor_enviado`” toma o valor que é retornado pela função “`distancia_sensor()`”, que depende do estado de ocupação da linha.

Verificado o estado de ocupação da plataforma, é feita uma atualização da rede de comunicação RF, através da utilização da função `network.update()`, e verifica-se se existem novos pacotes para ser lidos. Existindo, o conteúdo dos mesmos é armazenado na variável “`valor_recebido`”, através da função `network.read()`. Esta variável armazena a informação enviada pelo *master* com a indicação sobre o modo de funcionamento das luminárias da plataforma.

Tendo todos os pacotes sido lidos, são chamadas as funções `enviar_mensagem()` e `controlo_iluminacao()`. A função `enviar_mensagem()`, tem como principal objetivo transmitir o estado de ocupação da zona monitorizada, pela Unidade de Controlo Local, para a Unidade de Controlo Superior. Neste caso, o conteúdo transmitido é aquele que é armazenado na variável “`valor_enviado`”. Assim, a transmissão do mesmo é efetuada através da função `network.write()`.

Tendo os pacotes, com informação sobre o estado de ocupação da plataforma, sido enviados para as Unidades de Controlo Superiores, a função `controlo_iluminacao()`, com base no conteúdo da variável “`valor_recebido`”, gera os sinais necessários para uma correta iluminação da plataforma tendo em conta as necessidades momentâneas do local.

No entanto, para garantir a segurança das pessoas e bens, nas plataformas de passageiros, toda a iluminação é ligada à intensidade máxima quando é detetada a presença de comboios ou utilizadores, independentemente da localização dos mesmos, na plataforma. Nesta situação, o valor presente na variável “*valor_recebido*” deverá ser igual a 30 e conseqüentemente, através da função *controlo_iluminacao()*, são gerados os comandos necessários para que a iluminação esteja a funcionar à intensidade máxima. Por outro lado, quando não é detetada a presença de qualquer pessoa ou comboio, as luminárias são colocadas a funcionar à intensidade de segurança, através de um “*valor_recebido*” igual a 0. Caso a iluminância associada à luz natural seja suficiente para garantir uma correta iluminação do espaço, o “*valor_recebido*” será de 3 e as luminárias serão desligadas. Este processo é todo descrito através do fluxograma presente na Figura 61.

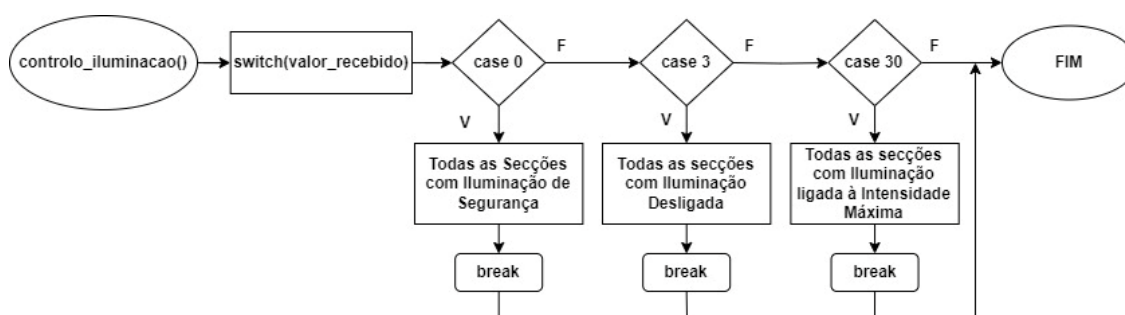


Figura 61 – Plataformas de Passageiros (UCL): Fluxograma da função *controlo_iluminacao()*.

5.6.5 Plataformas de Passageiros: Fluxograma associado às Unidades de Controlo Intermédias

As Unidades de Controlo Intermédias, como referido anteriormente, têm como principal objetivo compactar a informação enviada pelas Unidades de Controlo Locais, com o estado de ocupação da zona monitorizada, num único pacote e enviá-lo para a Unidade de Controlo Superior. Do mesmo modo, também devem reencaminhar a informação que é enviada pelo *master*, com os dados referentes ao modo de operação das diversas luminárias, para as Unidades de Controlo Inferiores. Por este facto, a função desempenhada pelas Unidades de Controlo Intermédias, em plataformas de passageiros, é executada exatamente nos mesmos moldes que nos Túneis Ferroviários. Deste modo, a explicação sobre o modo de funcionamento desta Unidade é apresentada no ponto 5.6.2.

5.6.6 Plataformas de Passageiros: Fluxogramas associados à Unidade de Controlo Master

Nas Plataformas de Passageiros, o *master*, para além de receber dados sobre o estado de ocupação tanto da linha férrea como da plataforma, tem associado um sensor fotoelétrico que monitoriza a iluminância natural existente na plataforma. Através do mesmo, é possível que a iluminação seja ligada exatamente no instante em que o valor de iluminância proveniente do

sol for insuficiente para garantir a segurança de pessoas, bens e infraestruturas. Desta forma, através da implementação deste sensor, o código desenvolvido para o *master* é ligeiramente diferente do desenvolvido para Túneis Ferroviários.

Assim como no código desenvolvido para o *master* associado aos Túneis de Ferroviários, a chamada da função *setup()* permite configurar as portas e parâmetros associados à comunicação SPI e comunicação RF. Do mesmo modo, também é configurado o *Timer/Counter 1* com um *prescaler* de 1024 e um *OCR1A* com o valor de 15 624, com o mesmo objetivo apresentado na aplicação para túneis de ferroviários.

Além da utilização do *Timer/Counter 1*, também é configurado na função *setup()* o *Timer/Counter 3* com o intuito de que seja gerada uma outra interrupção de 1 em 1 segundo. Desta forma, os valores associados ao *prescaler* e *OCR3A* são iguais aos configurados para o *prescaler* do *Timer 1* e *OCR1A*, respetivamente. Por outro lado, também é configurado pino associado ao sensor fotoelétrico como entrada.

No desenvolvimento do código, para esta Unidade de Controlo, constatou-se que as luminárias possuíam um comportamento intermitente, quando se atingiam valores de iluminância natural próximos do limite estabelecido para acionamento ou desligamento das mesmas. Este acontecimento é justificado por, nos momentos de transição, o sensor fotoelétrico detetar valores ligeiramente superiores e inferiores ao limite definido, em curtos espaços de tempo.

Desta forma, para estabilizar o comportamento das luminárias, nos momentos de transição, foi definida uma interrupção associada ao *Timer/Counter 3*. Esta, é ativa sempre que o sensor fotoelétrico detetar um valor de iluminância natural menor que o limite estabelecido e, para evitar o comportamento intermitente em períodos de transição, apenas permite que a iluminação se desligue decorrido um determinado intervalo de tempo. O valor configurado para este intervalo deve garantir que, passado o período de transição, os valores associados à iluminância natural são suficientemente diferentes do valor limite, para evitar oscilações intempestivas na iluminação. Para efeitos de teste, o intervalo considerado foi de 7 segundos, como apresentado na Figura 62, que traduz o fluxograma associado à interrupção gerada pelo *Timer/Counter 3*.

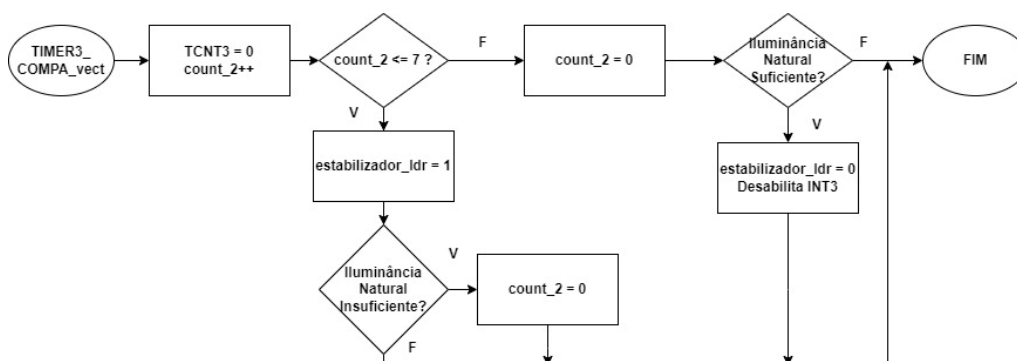


Figura 62 – Plataformas de Passageiros (*master*): Fluxograma associado à Interrupção gerada no *Timer/Counter 3*.

Quando a interrupção é ativa, primeiramente o registo *TCNT3* é colocado a 0 para que o mesmo possa voltar a ser incrementado até ao valor definido em *OCR3A*, gerando uma interrupção de 1 em 1 segundo. Posteriormente, é incrementada a variável “*count_2*” sempre que ocorre a interrupção até ao valor de 7, representando o intervalo de tempo considerado. De seguida, é verificado se “*count_2*” é menor ou igual a 7. Caso essa condição se verifique, a *flag* “*estabilizador_ldr*” é colocada a 1, permitindo através do *loop()*, que as luminárias estejam acionadas independentemente do nível de iluminância natural detetado pelo sensor fotoelétrico. De seguida, se se continuar a verificar a necessidade de manter a iluminação ligada, a variável “*count_2*” é novamente colocada a 0. Desta forma, garante-se que a variável toma sempre o valor 0 até que a iluminância natural detetada seja suficiente para desligar a iluminação. Quando esse facto se verifica, ao amanhecer, a condição “*LDR = HIGH*” deixa de ser verificada e a variável “*count_2*” começa a ser incrementada até ao valor de 7 (correspondente aos 7 segundos de intervalo de estabilização considerado). Atingido esse valor, “*count_2*” é zerado e realiza-se uma última verificação sobre o nível de iluminância natural existente na plataforma. Se esse nível garantir a segurança das pessoas, bens e infraestruturas, a *flag* “*estabilizador_ldr*” é colocada a 0 e, conseqüentemente, a iluminação é desligada. Do mesmo modo, a interrupção é desabilitada até que os níveis de iluminância natural voltem a ser insuficientes onde, através do *loop()*, volta a ser ativa, como retratado na Figura 63.

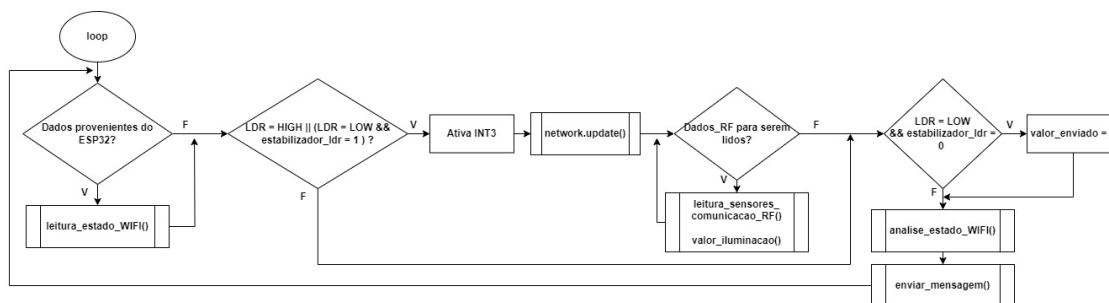


Figura 63 – Plataformas de Passageiros (*master*): Fluxograma da função *loop()*.

Primeiramente, assim como na função *loop()* desenvolvida para o *master* em Túneis Ferroviários, é verificado se existem novos dados provenientes da *web*, através do *NodeMCU ESP32*. Caso existam, é chamada a função *leitura_estado_WIFI()* que determina qual o modo de funcionamento a que o sistema deve operar. A estrutura e a explicação do funcionamento desta função é explicada no ponto 5.6.3.

Posteriormente, é verificada a necessidade de ter a iluminação ligada, associado a baixos níveis de iluminância incidente (*LDR = HIGH*) ou devido ao intervalo de estabilização definido (*LDR = LOW & estabilizador_ldr == 1*). Verificando-se essa condição, é ativada a interrupção associada ao *Timer/Counter 3*, realiza-se uma atualização da rede de comunicações RF e verifica-se se existem novos pacotes para serem lidos. Existindo, é chamada a função *leitura_sensores_comunicacaoRF()* e a função *valor_iluminacao()*, permitindo que a iluminação seja controlada com base na presença de utilizadores ou comboios na plataforma.

A função *leitura_sensores_comunicacaoRF()*, assim como no código desenvolvido para túneis ferroviários representado pela Figura 54, tem como principal objetivo compactar num

único pacote a informação enviada pelas Unidades de Controlo Inferiores, sobre o estado de ocupação da plataforma.

A informação deste pacote é armazenada na variável “*controlo*”, cujo conteúdo é processado pela função *valor_iluminacao()*. Através do valor contido em “*controlo*”, esta função associa à variável “*valor_enviado*” o valor que indica o modo de funcionamento mais adequado das luminárias, tendo em consideração a ocupação da plataforma.

Nesta situação, sendo ligada toda a iluminação quando se deteta a presença de ocupantes ou comboios, a função desenvolvida é mais simples que a desenvolvida para o *master* destinado a Túneis Ferroviários, e é representada pela Figura 64.

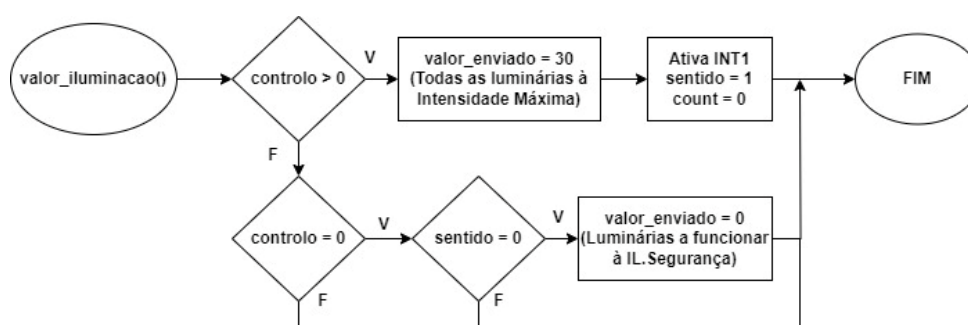


Figura 64 – Plataformas de Passageiros (*master*): Fluxograma da função *valor_iluminacao()*.

Por outro lado, como apresentando no fluxograma presente na Figura 63, caso a iluminância natural seja suficiente para uma correta iluminação da plataforma, a variável “*valor_enviado*” toma o valor de 3, indicando que todas as luminárias devem ser desligadas.

Posteriormente, é chamada a função *analise_estado_WIFI()*, já analisada para a aplicação em Túneis Ferroviários, que permite que a variável “*valor_enviado*” possua o conteúdo que mais se adequa ao modo de operação definido via *web*. Através da chamada desta função, a variável “*valor_enviado*” pode tomar o valor de 30, para o estado “*ON*”, 3 para “*OFF*” e 0 para “*IL.Segurança*”. Caso o modo definido seja “*Dinâmico*” o valor da variável é aquele que é definido, consoante o estado de ocupação da plataforma.

Por fim, é chamada a função *enviar_mensagem()* que permite o envio do conteúdo da variável “*valor_enviado*” para as Unidades de Controlo Locais Inferiores.

5.6.7 Fluxograma associado ao microcontrolador *NodeMCU ESP32*

Associado à Unidade de Controlo *master*, a implementação do microcontrolador *NodeMCU ESP32* permite a criação de um servidor *web* que possibilita o controlo remoto do sistema de iluminação. Através da página *web* que é criada, o gestor de iluminação seleciona qual o modo de operação pretendido para o sistema de iluminação, que é enviado para o *master* através de comunicação serial.

Primeiramente, no código desenvolvido é realizada a configuração do servidor web para escutar por conexões na porta 80. Esta é realizada através da seguinte linha de código: `WiFiServer server(80);`.

Posteriormente, na função `setup()`, é necessário fornecer o *Service Set Identifier* (SSID) e a *password* da rede *Wi-Fi* onde se deseja conectar o *NodeMCU ESP32*. A função que permite essa configuração está presente na biblioteca `<WiFi.h>`: `WiFi.begin(ssid , password);`.

Através desta função, o *ESP32* realiza um pedido de conexão com a rede *Wi-Fi* e aguarda-se que a conexão seja bem-sucedida através da função `WiFi.status()`. De seguida, é inicializado o servidor *web* através da chamada da função `server.begin()`. Após a chamada desta função, o servidor fica preparado para receber as solicitações dos clientes, através da porta 80.

Por outro lado, a função `loop()`, representada na Figura 65, permite monitorizar e gerir as conexões de clientes via HTTP, faz o processamento de solicitações efetuadas, atualiza a página *web* consoante essas mesmas solicitações e envia um pacote de dados sobre o modo de operação do sistema de iluminação definido para o *master*, através de comunicação serial.

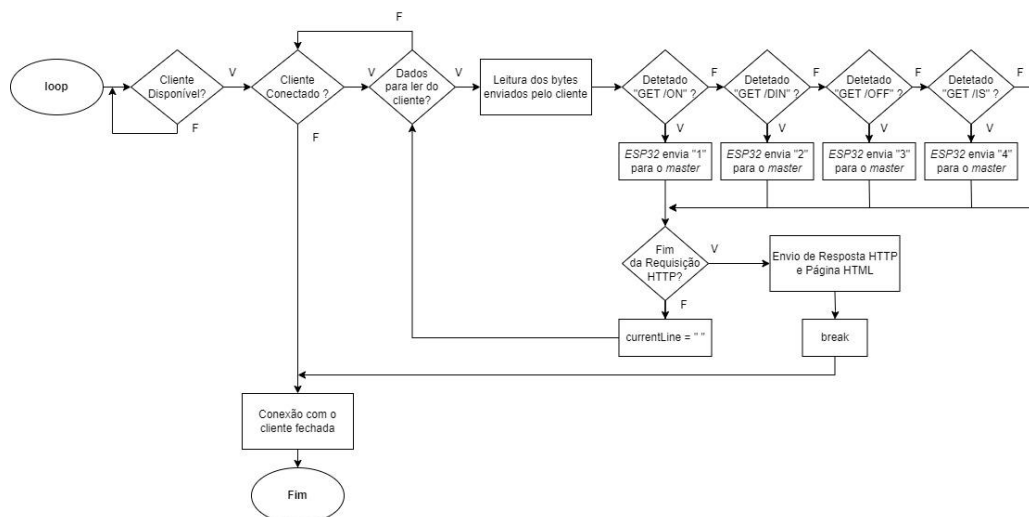


Figura 65 – Fluxograma função `loop()` no *NodeMCU ESP32*.

Primeiramente, através da função `server.available()` é verificado se existem clientes que se pretendem conectar ao servidor. Se existir uma conexão válida, é inicializada a *string* `currentLine` que irá processar e armazenar temporariamente a requisição HTTP enviada pelo cliente, através do protocolo TCP. Uma requisição HTTP é gerada sempre que o cliente pretende aceder a um recurso ou interagir com um servidor, através da utilização de, por exemplo, um navegador *web*. A requisição HTTP é constituída por uma linha de requisição, cabeçalhos HTTP e, opcionalmente, pelo corpo da requisição. O modo de operação do sistema de iluminação é enviado pela linha de requisição da seguinte forma: `GET /(modo de operação) HTTP/1.1`. Desta forma, depois da leitura dos dados enviados pelo cliente, é verificado se a requisição termina com o comando `GET /ON`, `GET /DIN`, `GET /OFF` ou `GET /IS`, que retrata os quatro

modos de operação definidos. Identificando-se qual o modo de operação definido pelo cliente, é enviado um pacote para o *master* com essa mesma informação, através da comunicação serial.

Por fim, após a leitura da requisição HTTP, enviada pelo cliente, e o envio da resposta, por parte do servidor, é fechada a conexão com o cliente.

5.6.8 Túneis Ferroviários: Poupanças Energéticas associadas à implementação

A aplicação deste sistema de controlo de iluminação, associado a túneis ferroviários, permite que apenas sejam ligadas à intensidade máxima as luminárias das secções do túnel onde o comboio se encontra e as da secção imediatamente seguinte, tendo em conta o sentido de movimento do mesmo. Desta forma, neste ponto do relatório, é apresentada uma análise simulada à implementação deste sistema num dos maiores túneis ferroviários do país, o Túnel do Juncal, pertencente à linha do Douro.

O Túnel do Juncal possui um comprimento de 1621 metros e uma velocidade máxima de circulação de 100 km/h, no entanto, para a análise em causa considerou-se que a velocidade de circulação média dos veículos é de 80 km/h. Por outro lado, pelo facto de os dados mais recentes indicarem que a modernização da linha do Douro vai permitir a construção de plataformas de 200 metros [165], foi arbitrado que os comboios a circular no Túnel possuem esse comprimento máximo. O valor máximo de 200 metros de comboio e uma velocidade considerada menor que a máxima permite criar um cenário que tem em conta valores não ideais. Desta forma, os consumos obtidos permitem considerar, de forma indireta, possíveis acionamentos da iluminação não previstos.

O intervalo de tempo estabelecido, associado à interrupção gerada pelo *Timer/Counter 1*, que permite que a iluminação retorne ao modo de segurança depois de o comboio atravessar o túnel, é de 1 minuto. Desta forma, é apresentada a Tabela 30 que traduz os dados descritos.

Tabela 30 – Principais Características do Túnel do Juncal e dos Comboios considerados.

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------|----------|
| Comprimento do Túnel | 1,621 km |
| Velocidade Máxima de Circulação | 100 km/h |
| Velocidade Considerada | 80 km/h |
| Comprimento do Comboio | 200 m |

Com base no comprimento do túnel e do comboio, considerou-se a implementação de uma unidade de controlo local a cada 100 metros. Consequentemente, será necessária a implementação de 18 Unidades de Controlo Locais, que comunicam com 4 unidades de controlo intermédias que, por sua vez, estão associados à unidade de controlo *master*. A estrutura de comunicações, para esta implementação, encontra-se representada na Figura 66.

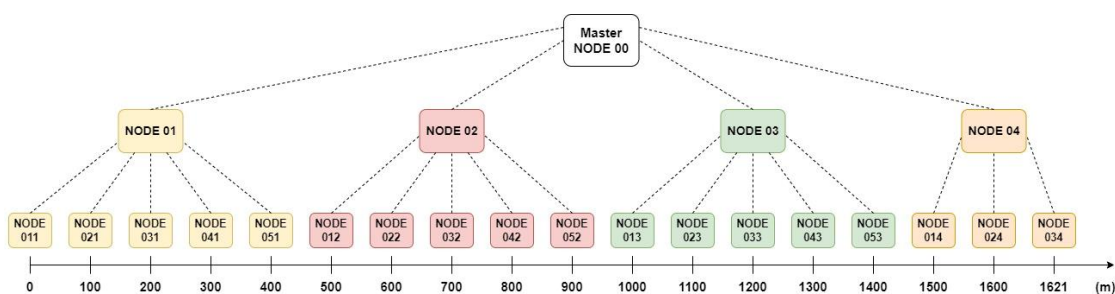


Figura 66 – Estrutura da Rede de Comunicação entre as diversas unidades, no Túnel do Juncal.

Como retratado, a implementação de 18 unidades de controlo locais permite que a iluminação seja controlada com base em 17 secções. A cada secção, está associado um sensor ultrassónico e 10 módulos de conversão de sinais de PWM em sinais de 0 – 10 V. Desta forma, pretende-se que a cada secção estejam associadas 10 luminárias, permitindo que estas estejam distribuídas de 10 em 10 metros ao longo do túnel. Com base nestes dados, determinou-se o investimento necessário, representado na Tabela 31, para a aplicação deste sistema de controlo no Túnel do Juncal. Pelo facto de já estar a ser efetuada a modernização das luminárias para iluminação LED, no cálculo do investimento total, o custo das luminárias não é considerado.

Tabela 31 – Investimento Total: Túneis Ferroviários

| Tipo de Unidade | Nº de Unidades | Preço Unitário (€) | Preço Total / Camada (€) |
|--------------------|----------------|--------------------|--------------------------|
| UCL | 18 | 71,22 € | 1 281,96 € |
| UCI | 4 | 37,34 € | 149,36 € |
| Master | 1 | 52,48 € | 52,48 € |
| Investimento Total | | | 1 483,80 € |

Para este projeto, a luminária escolhida é o modelo “BGP235 740 LED 50”, desenvolvida pela PHILIPS para iluminação de túneis. As características da mesma são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 – Características Luminária “BGP235 740 LED 50”.

| Parâmetros | Valores |
|-----------------------------------|------------|
| Tensão de entrada | 220-240 V |
| Frequência de linha | 50 - 60 Hz |
| Potência | 31,5 W |
| Lumens | 5000 lm |
| Temperatura de Cor Correlacionada | 4000 K |
| Color rendering index | >70 |
| Código de proteção de entrada | IP66 |

Com base na velocidade de circulação média de 80 km/h e no comprimento do túnel, foi calculado o tempo em que o comportamento da iluminação é influenciado pela ocupação de

alguma das secções do túnel, como representado na Tabela 33. Este período é determinado tendo em consideração o tempo que o comboio demora a atravessar o túnel e o período de 1 minuto que a iluminação demora a transitar para o modo de segurança, depois de ter sido detetada, pela última vez, a presença do veículo.

Tabela 33 – Valores calculados relativos ao tempo de travessia do comboio, no túnel do Juncal.

| Parâmetros | Valores | |
|---|----------------|------------|
| Tempo de Circulação dentro do Túnel | 0,0203 horas | 1,2158 min |
| Tempo de Transição (Iluminação Máxima para Iluminação de Segurança) | 0,0167 horas | 1 min |
| Tempo Total com Iluminação influenciada pela passagem do comboio | 0,0369 horas | 2,2158 min |

Considerando que os comboios em circulação possuem o comprimento máximo de 200 metros, que corresponde ao cenário em que mais luminárias vão estar ligadas à intensidade máxima ao mesmo tempo, existem sempre pelo menos duas secções a detetar a presença do comboio. Consequentemente, essas secções são iluminadas à intensidade máxima através do envio de um sinal em tensão de 10 V para os drivers das luminárias, que constituem essas mesmas secções. Do mesmo modo, para garantir que o maquinista possui visibilidade sobre a linha, de pelo menos 100 metros, a secção seguinte relativa ao sentido de movimento também deve ter as luminárias respetivas a funcionar à intensidade máxima. Desta forma, para os cálculos relacionados com o consumo de energia durante a passagem de comboio, considerou-se que existem sempre 3 secções a funcionar com as luminárias à intensidade máxima e as restantes a funcionar à intensidade de segurança, durante 1,2158 minutos. Consequentemente, a energia consumida durante a passagem do comboio é apresentada na Tabela 34.

Tabela 34 - Potência Necessária e Energia Consumida durante a passagem de comboio.

| Parâmetros | Valores |
|--|-----------------|
| Luminárias | 162 Unidades |
| Potência Necessária / Luminária (Int.Máxima) | 31,5 W |
| Potência Necessária / Luminária (Int.Segurança) | 7,88 W |
| Luminárias a Funcionar à Intensidade Máxima | 30 Unidades |
| Potência Necessária (Luminárias - Int.Máxima) | 945 W |
| Luminárias a Funcionar à Intensidade Segurança | 132 Unidades |
| Potência Necessária (Luminárias - Int.Segurança) | 1039,5 W |
| Potência Necessária | 1984,5 W |
| Energia Consumida (durante a passagem) | 40,21 Wh |

No entanto, à medida que o comboio vai saindo do túnel, este vai sendo detetado em menos secções, ficando apenas a última secção a funcionar com as luminárias à intensidade máxima, quando o mesmo sai completamente do túnel. Assim, até ser dado o comando para que as luminárias dessa última secção retornem à intensidade de segurança, as mesmas

continuam a operar à intensidade máxima até que decorra 1 minuto desde a saída do comboio. Neste intervalo, consumo energético associado e os dados necessários para o cálculo do mesmo são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Potência Necessária e Energia Consumida no intervalo de 1 minuto após passagem de comboio.

| Parâmetros | Valores |
|--|-----------------|
| Nº de Luminárias | 162 Unidades |
| Potência Necessária / Luminária (Int.Máxima) | 31,5 W |
| Potência Necessária / Luminária (Int.Segurança) | 7,88 W |
| Luminárias a Funcionar à Intensidade Máxima | 10 Unidades |
| Potência Necessária (Luminárias - Int.Máxima) | 315 W |
| Luminárias a Funcionar à Intensidade Segurança | 152 Unidades |
| Potência Necessária (Luminárias - Int.Segurança) | 1197 W |
| Potência Necessária | 1512 W |
| Energia Consumida (durante 1 min após a passagem) | 25,20 Wh |

Consequentemente, a energia consumida por cada passagem de comboio será a soma dos valores de energia consumida obtidos nas Tabelas 34 e 35, obtendo-se um consumo de 65,41 Wh.

Tendo em consideração que existem 26 travessias por dia no túnel, foram realizados os cálculos relativos ao consumo diário de energia da instalação. Sabendo esse consumo e o valor de venda de energia elétrica em BTN, considerando tarifa simples, no mercado regulado em 2024, calculou-se o custo anual associado ao consumo de eletricidade, com a implementação deste sistema de controlo. Estes valores encontram-se representados na Tabela 36.

Tabela 36 – Custo Anual de Eletricidade Consumida, com a implementação do sistema de controlo, no Túnel do Juncal.

| Parâmetros | Valores |
|---|------------------|
| Nº de Passagens de Comboios de Passageiros, por dia | 26 |
| Valor de Venda Energia Elétrica em BTN - Tarifa Simples (2024) | 0,1625 €/kWh |
| Tempo com secções do comboio ocupadas, por dia | 0,96 h |
| Consumo diário devido a Passagens de Comboio | 1700,68 Wh |
| Tempo com todas as secções do comboio desocupadas, por dia | 23,04 h |
| Consumo Diário derivado a todas as secções desocupadas (IL.Segurança) | 29393,08 Wh |
| Consumo Diário de Eletricidade | 31,09 kWh |
| Custo Diário de Eletricidade | 5,05 € |
| Custo Anual de Eletricidade Consumida | 1844,25 € |

Por outro lado, como representado na Tabela 37, foram calculados os valores de consumo de eletricidade anuais e custos respetivos, sem considerar a implementação deste sistema de controlo. Para isso, os cálculos foram realizados considerando que todas as luminárias do túnel funcionam à intensidade máxima durante todas as horas do ano.

Tabela 37 - Custo Anual de Eletricidade Consumida, sem a implementação do sistema de controlo, no Túnel do Juncal.

| Parâmetros | Valores |
|------------------------------------|------------------|
| Consumo Diário | 122,47 kWh |
| Custo Diário de Eletricidade | 19,90 € |
| Custo Anual de Eletricidade | 7264,12 € |

Desta forma, através da aplicação do sistema de controlo de iluminação inteligente desenvolvido, é possível a redução do consumo de energia em aproximadamente 74,61%, como retratado na Tabela 38. Do mesmo modo, considerando o investimento inicial de 1 483,80 € e uma poupança anual de 5 419,87 €, determinou-se que o tempo de retorno é de 3,29 meses. Pelo reduzido tempo de retorno do investimento, para o cálculo do mesmo não foi tida em consideração valores como o da inflação ou possíveis variações no valor de 0,1625 €/kWh.

Tabela 38 – Poupanças Energéticas e Tempo de Retorno associado à implementação do sistema de controlo inteligente, no túnel do Juncal.

| Parâmetros | Valores |
|---|----------------|
| Custo Anual de Eletricidade (sem Sistema de Controlo) | 7264,12 € |
| Custo Anual de Eletricidade (com Sistema de Controlo) | 1844,25 € |
| Poupança Monetária | 5419,87 € |
| Poupança Percentual (%) | 74,61 % |
| Tempo de Retorno do Investimento | 3,29 meses |

5.6.9 Plataformas de Passageiros: Poupanças Energéticas associadas à implementação

Para realizar uma análise a possíveis poupanças energéticas associadas à implementação do sistema de controlo em Plataformas de Passageiros, foi utilizado como referência uma das plataformas existentes na estação ferroviária de Ovar, com comprimento de 150 metros. Com base nesse mesmo comprimento, determinou-se que um possível sistema de controlo de iluminação pode ser constituído por quatro Unidades de Controlo Locais e um *master*, como representado através da Figura 67. A não utilização de Unidades de Controlo Intermédias, para reencaminhamento de pacotes, está associada ao facto de o número de Unidades de Controlo Locais ser menor que 5 e a distância entre unidades de controlo ser menor que o alcance máximo de comunicação dos módulos RF.

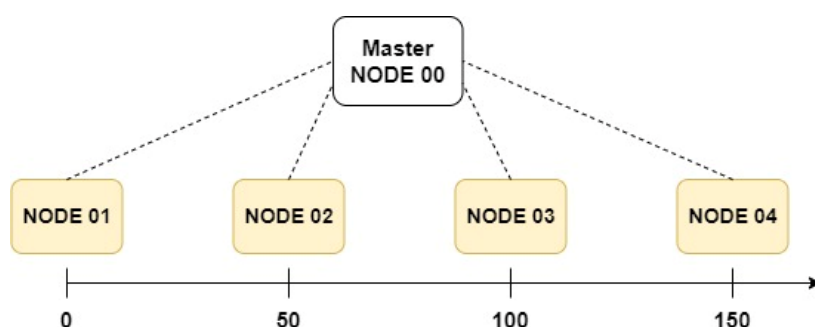


Figura 67 - Estrutura da Rede de Comunicação entre as diversas unidades, numa das Plataformas de Ovar.

Cada Unidade de Controlo Local tem associado um sensor ultrassónico, para monitorizar a ocupação da linha e 1 ou 2 sensores PIR. Considerando que o sensor PIR escolhido permite deteções de movimento até 20 metros de distância relativamente à sua posição, como retratado no ponto 5.5.3.2, cada sensor tem a capacidade de monitorizar zonas de 40 metros. Desta forma, a implementação de 6 sensores PIR permite que cada um esteja distanciado de 25 metros do sensor PIR mais próximo. Consequentemente, as zonas de deteção dos sensores ir-se-ão sobrepor, reduzindo a probabilidade de ocorrerem falsos negativos. Desta forma, o valor do investimento total é apresentado na Tabela 39.

Tabela 39 - Investimento Total: Plataforma Ferroviária.

| Tipo de Unidade | Nº de Unidades | Preço Unitário (€) | Preço Total / Camada (€) |
|--------------------|----------------|--------------------|--------------------------|
| UCL | 4 | 94,33 € | 377,32 € |
| Master | 1 | 65,46 € | 65,46 € |
| Investimento Total | | | 442,78 € |

Por outro lado, considerou-se que a cada Unidade de Controlo Local está associada duas luminárias “BGP283 LED190-45/830”, projetadas pela PHILIPS para implementações em ruas urbanas e rodovias, com as respetivas características presentes na Tabela 40. Assim, sendo implementadas quatro unidades de controlo locais, considerou-se a implementação de oito luminárias.

Tabela 40 - Características Luminária “BGP283 LED190-45/830”.

| Parâmetros | Valores |
|-----------------------------------|------------|
| Tensão de entrada | 220-240 V |
| Frequência de linha | 50 - 60 Hz |
| Potência | 128 W |
| Lumens | 16 150 lm |
| Temperatura de Cor Correlacionada | 3000 K |
| Color rendering index | 80 |
| Código de proteção de entrada | IP66 |

Os valores de potência necessária, associados aos dois modos de operação, encontram-se presentes na Tabela 41.

Tabela 41 – Potência Necessária associada a cada Plataforma.

| Parâmetros | Valores |
|---|------------|
| Luminárias Necessárias | 8 Unidades |
| Potência Necessária / Luminária (Int.Máxima) | 128 W |
| Potência Necessária / Luminária (Int.Segurança) | 32 W |
| Potencia Total Necessária (Int.Máxima) | 1024 W |
| Potência Total Necessária (Int.Segurança) | 256 W |

Pelo facto de a iluminação apenas ser acionada quando o nível de iluminância natural não garante a segurança de pessoas, bens e infraestruturas, foi tido como referência que a iluminação iria ser acionada à hora do pôr-do-sol e desligada 10 minutos depois do nascer-do-sol, como representado na Figura 68. Para simplificar esta análise, considerou-se como referência a hora do nascer e pôr do sol do dia 15 de cada mês.

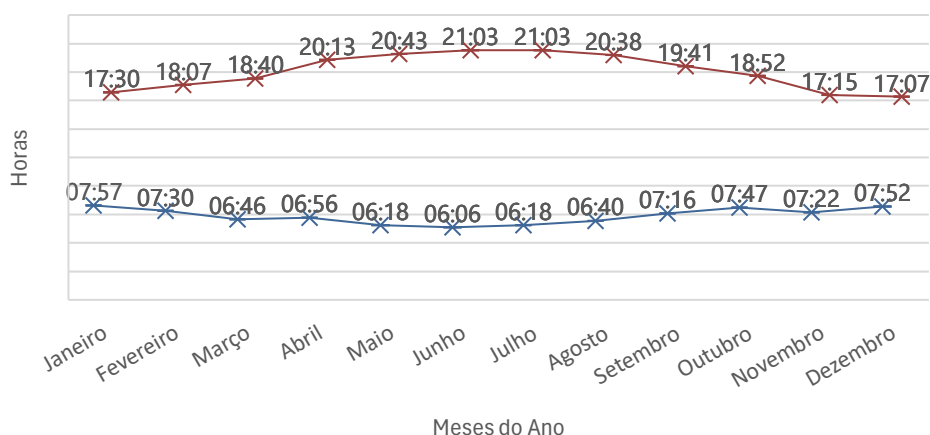


Figura 68 – Hora do Nascer/Pôr do Sol, ao longo do ano.

Posteriormente, realizada uma análise aos comboios que fazem paragem na estação de Ovar, devido à elevada afluência de comboios até há 01h00, a probabilidade de o sistema estar sempre a detetar pelo menos uma pessoa na plataforma é elevada. Desta forma, considerou-se que desde a hora do pôr do sol até há 01h00, a iluminação vai estar sempre acionada à intensidade máxima. Posteriormente, pelo facto de entre a 01h00 e as 06h00 apenas existirem dois comboios a fazer paragem, às 01h50 e 04h57, arbitrou-se que a iluminação iria ser acionada à intensidade máxima durante 1 hora (30 min por cada paragem), com as restantes 4h o sistema a operar à iluminação de segurança. Desta forma, foi possível determinar um valor estimado do número de horas que a plataforma está a ser iluminada à intensidade máxima e à intensidade de segurança. Consequentemente, determinou-se o consumo de energia estimado mensalmente associado à iluminação da plataforma, em kWh, como representado no gráfico da Figura 69.

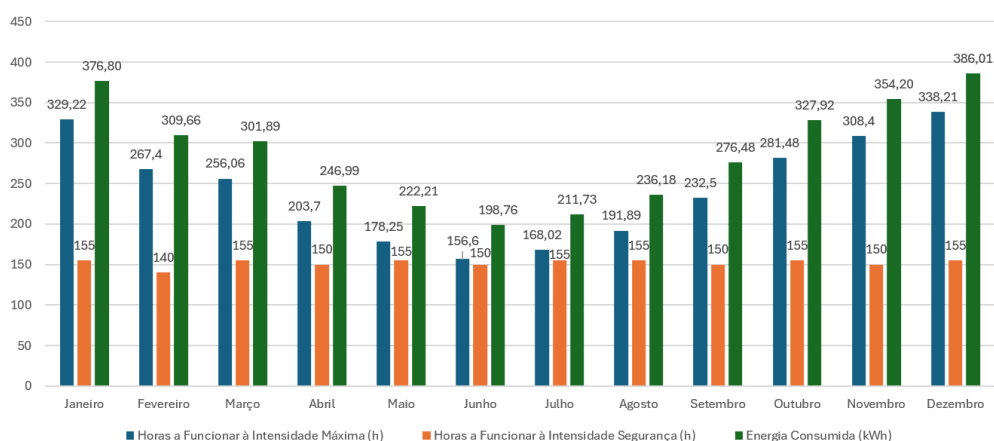


Figura 69 – Número de horas estimado que o sistema opera, nos diferentes modos e consumo previsto, por mês.

De seguida, determinado o valor estimado de energia consumida anualmente e sabendo que o valor de venda de energia elétrica em BTN, considerando tarifa simples, no mercado regulado em 2024 é de 0,1625 €/kWh, calculou-se o custo anual associado à eletricidade consumida, como representado na Tabela 42.

Tabela 42 – Custo Anual de Eletricidade Consumida, com a implementação do sistema de controlo, de uma Plataforma em Ovar.

| Parâmetros | Valores |
|--|--------------|
| Valor de Venda Energia Elétrica em BTN - Tarifa Simples (2024) | 0,1625 €/kWh |
| Energia Consumida Anualmente (kWh) | 3448,81 kWh |
| Custo Anual de Eletricidade Consumida | 560,43 € |

Por outro lado, considerando a não implementação do sistema de controlo, resultando na iluminação da plataforma ligada à intensidade máxima independentemente da presença de utilizadores ou comboios, durante a noite, foram determinados os consumos energéticos e os respetivos custos, como representado na Tabela 43.

Tabela 43 - Custo Anual de Eletricidade Consumida, sem a implementação do sistema de controlo, de uma Plataforma em Ovar.

| Parâmetros | Valores |
|--|--------------|
| Valor de Venda Energia Elétrica em BTN - Tarifa Simples (2024) | 0,1625 €/kWh |
| Energia Consumida Anualmente (kWh) | 4850,41 kWh |
| Custo Anual de Eletricidade Consumida | 788,19 € |

Desta forma, realizando uma comparação entre as Tabelas 42 e 43, é possível constatar que existe uma diminuição considerável nos consumos de energia associados à iluminação da Plataforma. Do mesmo modo, importa realçar que a aplicação deste sistema em um maior

número de plataformas iria diminuir, de forma ainda mais significativa, os consumos da estação ferroviária.

Considerando que o valor de venda da eletricidade, que o número de comboios a operar na linha se mantém e o valor de investimento inicial de 442,78 €, foi calculado o tempo de retorno de investimento, como observado na Tabela 44.

Tabela 44 – Poupanças Energéticas e Tempo de Retorno associado à implementação do sistema de controlo inteligente numa das Plataformas de Passageiros de Ovar.

| Parâmetros | Valores |
|---|----------------|
| Custo Anual de Eletricidade (sem Sistema de Controlo) | 788,19 € |
| Custo Anual de Eletricidade (com Sistema de Controlo) | 560,43 € |
| Poupança Monetária | 227,76 € |
| Poupança Percentual (%) | 28,90 % |
| Tempo de Retorno do Investimento | 1,94 anos |

Através da análise realizada, determinou-se que, sem a implementação do sistema de controlo, o custo anual da eletricidade consumida é de 788,19 €. Por outro lado, este valor é reduzido para os 560,43 € caso o sistema de controlo for implementado nas condições indicadas. Consequentemente, esta implementação traduz-se em poupanças anuais, por plataforma, de 227,76 € permitindo uma poupança percentual de 28,90 %. Desta forma, considerando o investimento inicial de 442,78 € e a poupança anual existente, obteve-se um tempo de retorno do investimento de 1,94 anos.

6 Conclusões

A sociedade e as principais economias do mundo têm desenvolvido esforços no sentido de uma evolução sustentável, sem comprometer as gerações futuras. Esses esforços traduzem-se numa transição energética sustentável, enquanto se implementam sistemas que permitem aumentar a eficiência energética das diferentes infraestruturas. Do mesmo modo, por ser dos meios de transporte mais eficientes, vários têm sido os investimentos da União Europeia no sentido de melhorar a infraestrutura ferroviária existente. Desta forma, surgem desafios associados à melhoria da eficiência energética dessa mesma infraestrutura. Assim, este relatório pretende explicar o funcionamento de dois sistemas de controlo de iluminação desenvolvidos, associados a Túneis Ferroviários e Plataformas de Passageiros.

Através do presente estudo, enumerou-se e foi realizada uma análise relativa às principais fontes luminosas presentes na ferrovia. Destas fontes luminosas e com base nas características das mesmas, concluiu-se que a tecnologia mais eficiente se centra no LED. Para além disso, é uma tecnologia que fornece flexibilidade ao sistema de iluminação, já que, permite valores de temperatura de cor variável, um valor elevado de CRI, tempo de vida útil elevado e um tempo de arranque instantâneo.

Por outro lado, foi realizada uma análise aos diferentes sistemas de controlo de fontes luminosas em função de horários pré-definidos, através da ocupação, luz natural, misto e sistemas de iluminação inteligentes. Da análise efetuada, constatou-se que a forma mais eficiente de controlar um sistema de iluminação depende consideravelmente de diversos fatores relacionados com o tipo de utilizadores, frequência de utilização, condições climatéricas no local, presença de obstáculos na zona a controlar, entre outros. No entanto, devido ao elevado dinamismo de resposta, os sistemas de controlo de iluminação inteligentes são aqueles que permitem a obtenção de melhores valores de eficiência, sem comprometer a segurança de pessoas, bens e infraestruturas. Este facto está relacionado com uma maior conectividade entre todos os elementos do sistema.

Por fim, na última secção são apresentados os dois sistemas de controlo de iluminação inteligentes desenvolvidos, para Túneis Ferroviários e Plataformas de Passageiros. Na base dos

mesmos sistemas está uma rede de comunicação radiofrequência com topologia do tipo árvore, que permite que as diversas Unidades de Controlo comuniquem entre si, com possibilidade de controlo remoto via *Internet*. Este controlo remoto permite que o sistema opere em quatro modos de operação distintos mediante o tipo de controlo que se pretende.

O sistema de controlo de iluminação associado a Túneis Ferroviários permite que a iluminação seja ligada à intensidade máxima de forma sequencial, por secções, à medida que o comboio entra no túnel. Do mesmo modo, para proteção da infraestrutura, quando não é detetada a presença de qualquer comboio as luminárias são ligadas a uma intensidade de segurança. Através de uma análise simulada associada à implementação do sistema, no Túnel do Juncal, constatou-se uma diminuição dos consumos em aproximadamente 75%, com um tempo de retorno de investimento de 3,29 meses. Por outro lado, o sistema desenvolvido para controlo de iluminação em Plataformas de Passageiros teve em consideração a presença do comboio na plataforma, o horário de nascer e pôr do sol e a presença de utilizadores para o controlo da iluminação. Através de uma análise simulada associada à implementação do sistema, numa plataforma em Ovar, constatou-se uma diminuição dos consumos em 28,90 %, com um tempo de retorno de investimento de 1,94 anos.

Referências

- [1] E. Parliament, “De que forma a UE impulsiona as energias renováveis?” <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20221128STO58001/como-esta-a-ue-a-impulsionar-as-energias-renovaveis> (accessed Jan. 03, 2024).
- [2] E. Union, “Política de transportes ferroviários.” <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/rail-transport-policy/> (accessed Jan. 03, 2024).
- [3] R. Ganslandt and H. Hofmann, *Handbook of Lighting Design*, no. 191. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19192509>
- [4] S. Kitsinelis, *Light Sources: Basics of Lighting Technologies and Applications*.
- [5] A. K. R. Choudhury, *Principles of Colour and Appearance Measurement*. 2014.
- [6] D. Paret, *Wearables, Smart Textiles and Smart Apparel*. 2019.
- [7] P. Space and L. Workshop, “Basic Lighting Concepts , Terms , Units , Abbreviations & Relationships,” vol. 3665, no. 1989, pp. 15–31.
- [8] Performance in Lighting, “Performance requirements - EN 13201-2-2015.” <https://www.performanceinlighting.com/ww/en/en-13201-2-2015>
- [9] O. K. Olajiga, E. C. Ani, Z. Q. Sikhakane, and T. M. Olatunde, “A comprehensive review of energy-efficient lighting technologies and trends,” *Eng. Sci. Technol. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 1097–1111, 2024, doi: 10.51594/estj/v5i3.973.
- [10] Z. Jia, “Comparison on Lamp Characteristics of Highway Tunnel Lighting System,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 510, no. 5, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/510/5/052095.
- [11] A. De Almeida, B. Santos, B. Paolo, and M. Quicheron, “Solid state lighting review – Potential and challenges in Europe,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 30–48, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.029.
- [12] B. M. Todorović and D. Samardžija, “Road lighting energy-saving system based on wireless sensor network,” *Energy Effic.*, vol. 10, no. 1, pp. 239–247, 2017, doi: 10.1007/s12053-016-9447-6.
- [13] L. Cozzi *et al.*, “World Energy Outlook 2020,” vol. 2050, no. October, pp. 213–250, 2020, [Online]. Available: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2020_557a761b-en
- [14] K. H. Bachanek, B. Tundys, T. Wiśniewski, E. Puzio, and A. Maroušková, “Intelligent street lighting in a smart city concepts—a direction to energy saving in cities: An overview and case study,” *Energies*, vol. 14, no. 11, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/en14113018.
- [15] E. European Comission, “Streetlight Refurbishment with Energy Performance Contracting,” 2015, [Online]. Available: www.streetlight-epc.eu
- [16] A. Pandharipande and G. R. Newsham, “Lighting controls: Evolution and revolution,” *Light. Res. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 115–128, 2018, doi: 10.1177/1477153517731909.
- [17] J. de Oliveira, “Medidas de eficiência energética na IP,” 2018, [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/114121%0Ahttps://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/114121/2/277721.pdf>
- [18] W. H. Organization, F. F. for the A. and Society;, and G. R. S. P. andWorld Bank., *Pedestrian Safety: A Road Safety Manual for Decision-Makers and Practitioner*. 2013. doi: 10.1542/9781610020190-part05-pedestrian.
- [19] J. Uttley and S. Fotios, “The effect of ambient light condition on road traffic collisions involving pedestrians on pedestrian crossings,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 108, no. August, pp. 189–200, 2017, doi: 10.1016/j.aap.2017.09.005.
- [20] M. G. Naved A. Siddiqui, Xuehao Chu, “Crossing Locations, Light Conditions, and Pedestrian Injury Severity,” *Sage*, vol. 1982, no. 1, 2006, doi: <https://doi.org/10.1177/0361198106198200118>.
- [21] G. I. Crabb and L. Crinson, “The Impact of Street Lighting on Night-Time Road Casualties,” *Transp. Res. Lab.*, pp. 1–12, 2018.
- [22] M. Jackett and W. Frith, “Quantifying the impact of road lighting on road safety - A New Zealand Study,” *IATSS Res.*, vol. 36, no. 2, pp. 139–145, 2013, doi: 10.1016/j.iatssr.2012.09.001.
- [23] P. Tavares, D. Ingi, L. Araújo, P. Pinho, and P. Bhusal, “Reviewing the role of outdoor lighting in

- achieving sustainable development goals,” *Sustain.*, vol. 13, no. 22, pp. 1–28, 2021, doi: 10.3390/su132212657.
- [24] E. V. Ellis, E. W. Gonzalez, D. A. Kratzer, D. L. McEachron, and Greg Yeutter, “Auto-tuning Daylight with LEDs: Sustainable Lighting for Health and Wellbeing,” 2014. doi: <https://doi.org/10.17831/rep:arcc%y202>.
- [25] M. A. U. Haq *et al.*, “A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, Elsevier, pp. 268–279, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.090.
- [26] I. Wojnicki, S. Ernst, and L. Kotulski, “Economic Impact of Intelligent Dynamic Control in Urban Outdoor Lighting,” pp. 1–14, 2016, doi: 10.3390/en9050314.
- [27] L. Control, I. Daylight, and E. I. Analysis, “Lighting Control Including Daylight and Energy Efficiency Improvements Analysis,” 2018, doi: 10.3390/en11082166.
- [28] G. Y. Yun, H. Kim, and J. T. Kim, “Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption,” *Energy Build.*, vol. 46, pp. 152–158, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.034.
- [29] D. T. Delaney, G. M. P. O’Hare, and A. G. Ruzzelli, “Evaluation of energy-efficiency in lighting systems using sensor networks,” 2009, doi: <https://doi.org/10.1145/1810279.1810293>.
- [30] C. de Bakker, M. Aries, H. Kort, and A. Rosemann, “Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review,” *Build. Environ.*, vol. 112, pp. 308–321, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.11.042.
- [31] P. Darlington and D. Fenner, “Train detection - the basics,” *IRSE News*, no. December, pp. 18–25, 2019.
- [32] J. Tokyo, “Basics of Track Circuit,” vol. 15, no. 1. pp. 975–977, 2023.
- [33] Rail System, “Track Circuit,” 2021. <https://railsystem.net/track-circuit/> (accessed Jan. 05, 2024).
- [34] J. Santos, M. Hempel, and H. Sharif, “Sensing techniques and detection methods for train approach detection,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1109/VTCFall.2013.6692407.
- [35] A. K. Sikder, A. Acar, H. Aksu, A. S. Uluagac, K. Akkaya, and M. Conti, “IoT-enabled smart lighting systems for smart cities,” *2018 IEEE 8th Annu. Comput. Commun. Work. Conf. CCWC 2018*, pp. 639–645, 2018, doi: 10.1109/CCWC.2018.8301744.
- [36] X. Guo and D. Tiller, “The performance of occupancy-based lighting control systems: A review,” 2010, doi: <https://doi.org/10.1177/1477153510376225>.
- [37] M. Verma, R. S. Kaler, and M. Singh, “Sensitivity enhancement of Passive Infrared (PIR) sensor for motion detection,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 244, no. July, 2021, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167503.
- [38] L. Wu, Y. Wang, and H. Liu, “Occupancy Detection and Localization by Monitoring Nonlinear Energy Flow of a Shuttered Passive Infrared Sensor,” *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 21, pp. 8656–8666, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2869555.
- [39] L. Wu and Y. Wang, “A Low-Power Electric-Mechanical Driving Approach for True Occupancy Detection Using a Shuttered,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 47–57, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2875659.
- [40] O. Tetervenoks, P. Suskis, and J. Stegura, “Integration of microwave sensor into low cost indoor LED lamp-Element of smart lighting system,” *Proc. 5th IEEE Work. Adv. Information, Electron. Electr. Eng. AIEEE 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/AIEEE.2017.8270550.
- [41] T. Futagami and N. Hayasaka, “Experimental evaluation of occupancy lighting control based on low-power image-based motion sensor,” 2021, doi: 10.1080/18824889.2021.1987635.
- [42] M. Y. Mukta, A. Rahman, T. Asyhari, and Z. Alam, “IoT for energy efficient green highway lighting systems: Challenges and issues,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 158, pp. 1–38, 2020.
- [43] M. N. Bhairi, S. S. Kangle, M. S. Edake, B. S. Madgundi, and V. B. Bhosale, “Design and Implementation of Smart Solar LED Street Light,” *Int. Conf. Trends Electron. Informatics*, pp. 509–512, 2017.
- [44] P. Mohandas, J. S. A. Dhanaraj, and X. Z. Gao, “Artificial neural network based smart and energy efficient street lighting system: A case study for residential area in Hosur,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 48, pp. 1–13, 2019.
- [45] M. A. K. Riyaz, S. ArunJeyakumar, M. A. H. Sharik, and A. Tamilarasi, “Graphene coated LED based automatic street lighting system using Arduino microcontroller,” *IEEE Int. Conf. Power, Control. Signals Instrum. Eng.*, pp. 1555–1560, 2017.
- [46] Y.-S. Yang, S.-H. Lee, G.-S. Chen, C.-S. Yang, Y.-M. Huang, and T.-W. Hou, “An Implementation of

- High Efficient Smart Street Light Management System for Smart City,” *Spec. Sect. Data Min. Internet Thing*, vol. 8, pp. 568–585, 2020.
- [47] L. Zhao, “Intelligent Street Light System Based on NB-IoT and Energy-saving Algorithm,” *Int. Conf. Smart Sustain. Technol.*, pp. 1–6, 2018.
- [48] C. N. Yalung and C. M. S. Adolfo, “Analysis of Obstacle Detection Using Ultrasonic Sensor,” pp. 1015–1019, 2017.
- [49] J. Azeta, C. Bolu, D. Hinvii, and A. A. Abioye, “Obstacle detection using ultrasonic sensor for a mobile robot,” pp. 6–11, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/707/1/012012.
- [50] M. C. De Simone, “Obstacle Avoidance System for Unmanned Ground Vehicles by Using Ultrasonic Sensors,” no. 2017, 2018, doi: 10.3390/machines6020018.
- [51] V. A. Zhmud, N. O. Kondratiev, K. A. Kuznetsov, V. G. Trubin, and L. V. Dimitrov, “Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1015, no. 3, pp. 0–9, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189.
- [52] P. D. S. Vidhya, C. J. D. Silva, and C. J. Costa, “Obstacle Detection using Ultrasonic Sensors,” vol. 2, no. 11, pp. 316–320, 2016.
- [53] G. Gibbs and I. Madani, “ScienceDirect ScienceDirect Obstacle Detection with Ultrasonic Sensors and Signal Analysis Metrics Sensors and Signal Analysis Obstacle Detection with Ultrasonic Metrics,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 28, pp. 173–182, 2017, doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.183.
- [54] S. M. M. Islam, A. Droitcour, E. Yavari, V. M. Lubecke, and O. Boric-Lubecke, “Building occupancy estimation using microwave Doppler radar and wavelet transform,” *Build. Environ.*, vol. 236, no. January, p. 110233, 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110233.
- [55] Y. Cheng, C. Fang, J. Yuan, and L. Zhu, “Design and application of a smart lighting system based on distributed wireless sensor networks,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 23, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/app10238545.
- [56] S. Kaneda, Y. Kubota, T. Kurokawa, and T. Furuhashi, “Hand-gesture recognition system by using microwave doppler sensors,” *Proc. - Int. Comput. Softw. Appl. Conf.*, vol. 3, pp. 211–216, 2015, doi: 10.1109/COMPSAC.2015.230.
- [57] A. Avotins, O. Tetervenoks, L. R. Adrian, and A. Severdaks, “Traffic Intensity Adaptive Street Lighting Control,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2021-Octob, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589940.
- [58] D. Roy, “Design, system model and development of customized Electronic Light Barriers for robotic and mechatronic applications,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 4, pp. 184–202, 2013, doi: 10.1016/j.rcim.2012.12.003.
- [59] T. Gabloffsky, B. Kruse, and R. Salomon, “Surface Light Barriers,” no. Sensornets, pp. 97–104, 2022, doi: 10.5220/0010777500003118.
- [60] E. E. Richman, A. L. Dittmer, and J. M. Keller, “Field Analysis of Occupancy Sensor Operation: Parameters Affecting Lighting Energy Savings,” *J. Illum. Eng. Soc.*, vol. 25, no. 1, pp. 83–92, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/00994480.1996.10748136>.
- [61] D. B. Floyd, D. S. Parker, and J. R. Sherwin, “Measured Field Performance and Energy Savings of Occupancy Sensors: Three Case Studies,” 1996.
- [62] V. B. Neida, D. Maniccia, and A. Tweed, “An Analysis of the Energy and Cost Savings Potential of Occupancy Sensors for Commercial Lighting Systems,” *J. Illum. Eng. Soc.*, vol. 30, no. 2, pp. 111–125, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/00994480.2001.10748357>.
- [63] J. D. Jennings, F. M. Rubinstein, D. DiBartolomeo, and S. L. Blanc, “Comparison of Control Options in Private Offices in an Advanced Lighting Controls Testbed,” *J. Illum. Eng. Soc.*, vol. 29, no. 2, pp. 39–60, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/00994480.2000.10748316>.
- [64] A. D. Galasiu, G. R. Newsham, C. Suvagau, and D. M. Sander, “Energy Saving Lighting Control Systems for Open-Plan Offices: A Field Study,” *LEUKOS*, vol. 4, no. 1, pp. 7–29, 2013, doi: <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2007.04.01.001>.
- [65] R. F. Hughes, P. Eng, and S. S. Dhannu, “Substantial energy savings through adaptive lighting,” in *IEEE electrical power and energy conference*, 2008, pp. 1–4. doi: 10.1109/EPC.2008.4763356.
- [66] A. Williams, B. Atkinson, K. Garbesi, E. Page, and F. Rubinstein, “Lighting controls in commercial buildings,” *LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. North Am.*, vol. 8, no. 3, pp. 161–180, 2012, doi: 10.1582/LEUKOS.2012.08.03.001.
- [67] C. De Bakker, T. Van De Voort, and A. Rosemann, “The energy saving potential of occupancy-

- based lighting control strategies in open-plan offices: The influence of occupancy patterns,” *Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 1–18, 2018, doi: 10.3390/en11010002.
- [68] L. L. Fernandes, E. S. Lee, D. L. Dibartolomeo, and A. McNeil, “Monitored lighting energy savings from dimmable lighting controls in the New York Times Headquarters Building,” *Energy Build.*, vol. 68, no. PARTA, pp. 498–514, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.10.009.
- [69] F. Manzoor, D. Linton, and M. Loughlin, “Occupancy monitoring using passive RFID technology for efficient building lighting control,” *Proc. - 2012 4th Int. EURASIP Work. RFID Technol. RFID 2012*, pp. 83–88, 2012, doi: 10.1109/RFID.2012.10.
- [70] F. Rubinstein and A. Enscoe, “Saving Energy with Highly-Controlled Lighting in an Open-Plan Office,” *LEUKOS*, vol. 7, no. 1, pp. 21–36, 2013, doi: <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2010.07.01002>.
- [71] G. S. O. Vathanam *et al.*, “A Review on Effective Use of Daylight Harvesting Using Intelligent Lighting Control Systems for Sustainable Office Buildings in India,” *Sustainability*, vol. 14, no. 2, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su13094973>.
- [72] D. H. W. Li, K. L. Cheung, S. L. Wong, and T. N. T. Lam, “An analysis of energy-efficient light fittings and lighting controls,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 558–567, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.07.002.
- [73] S. Li, A. Pandharipande, and F. M. J. Willems, “Daylight Sensing LED Lighting System,” *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 9, pp. 3216–3223, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2520495.
- [74] R. Delvaeye, W. Ryckaert, L. Stroobant, P. Hanselaer, R. Klein, and H. Breesch, “Analysis of energy savings of three daylight control systems in a school building by means of monitoring,” *Energy Build.*, vol. 127, pp. 969–979, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.033.
- [75] J. Xie and A. O. Sawyer, “A Simplified Open-loop Control Strategy for Integrated Shading and Lighting Systems Using Machine Learning,” in *Building Simulation Conference Proceedings, 2022*, pp. 3172–3179. doi: 10.26868/25222708.2021.30629.
- [76] L. Bellia and F. Fragliasso, “Evaluating performance of daylight-linked building controls during preliminary design,” *Autom. Constr.*, vol. 93, no. December 2017, pp. 293–314, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.026.
- [77] A. S. Choi, K. D. Song, and Y. S. Kim, “The characteristics of photosensors and electronic dimming ballasts in daylight responsive dimming systems,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 1, pp. 39–50, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.07.014.
- [78] G. Y. Yun, “Analysis and prediction of daylighting and energy performance in atrium spaces using daylight-linked lighting controls,” *Energy Build.*, vol. 46, pp. 152–1258, 2012.
- [79] T. . Chung, J. Burnett, and M. K. T. WU, “Office Lighting Retrofit Using Dimmable Electronic Ballasts and Occupancy Controls,” *HKIE Trans.*, vol. 8, no. 3, pp. 8–15, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/1023697X.2001.10667852>.
- [80] S. Görgülü and N. Ekren, “Energy saving in lighting system with fuzzy logic controller which uses light-pipe and dimmable ballast,” *Energy Build.*, vol. 61, pp. 172–176, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.02.037.
- [81] A. Guillemin and N. Morel, “Innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system,” *Energy Build.*, vol. 33, no. 5, pp. 477–487, 2001, doi: 10.1016/S0378-7788(00)00100-6.
- [82] S. Onaygil and Ö. Güler, “Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul,” *Build. Environ.*, vol. 38, no. 7, pp. 973–977, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(03)00034-9.
- [83] I. H. Yang and E. J. Nam, “Economic analysis of the daylight-linked lighting control system in office buildings,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 8, pp. 1513–1525, 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.05.014.
- [84] H. Shen and A. Tzempelikos, “Daylight-linked synchronized shading operation using simplified model-based control,” *Energy Build.*, vol. 145, pp. 200–212, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.021.
- [85] M. R. Atif and A. D. Galasiu, “Energy performance of daylight-linked automatic lighting control systems in large atrium spaces: Report on two field-monitored case studies,” *Energy Build.*, vol. 35, no. 5, pp. 441–461, 2003, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00142-1.
- [86] C. AKSOY TIRMIKÇI and C. YAVUZ, “Energy Saving and Life Cycle Analysis of a Daylight-Linked Control System,” *Sak. Univ. J. Comput. Inf. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 183–187, 2020, doi:

- 10.35377/saucis.03.03.773517.
- [87] S. L. Wenqiang CHEN, Danny H W LI, "Evaluation of Energy Savings of Daylight-Linked Lighting Control Strategies Using Different Sky Distribution Models," 2019. doi: <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210626>.
- [88] H. Lee, C. ho Choi, and M. Sung, "Development of a dimming lighting control system using general illumination and location-awareness technology," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/en11112999.
- [89] B. Roisin, M. Bodart, A. Deneyer, and P. D'Herdt, "Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption," *Energy Build.*, vol. 40, no. 4, pp. 514–523, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.04.006.
- [90] T. de Rubeis *et al.*, "A first approach to universal daylight and occupancy control system for any lamps: Simulated case in an academic classroom," *Energy Build.*, vol. 152, pp. 24–39, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.025.
- [91] L. Martirano, "Lighting systems to save energy in educational classrooms," 2011.
- [92] I. Chew, *Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future*. Energy Build, 2017.
- [93] N. Gentile, "Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: Measurements of electricity savings and occupants," *Sol. Energy*, vol. 127, pp. 113–123, 2016.
- [94] G. Lowry, "Energy saving claims for lighting controls in commercial buildings," *Energy Build*, vol. 133, pp. 489–497, 2016.
- [95] N. Gentile and M. C. Dubois, "Field data and simulations to estimate the role of standby energy use of lighting control systems in individual offices," *Energy Build*, vol. 155, pp. 390–403, 2017.
- [96] A. K. Tripathy, A. K. Mishra, and T. K. Das, "Smart lighting: Intelligent and weather adaptive lighting in street lights using IOT," *2017 Int. Conf. Intell. Comput. Instrum. Control Technol. ICICICT 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1236–1239, 2017, doi: 10.1109/ICICICT1.2017.8342746.
- [97] M. Castro, A. J. Jara, and A. F. G. Skarmeta, "Smart lighting solutions for smart cities," *Proc. - 27th Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. Work. WAINA 2013*, pp. 1374–1379, 2013, doi: 10.1109/WAINA.2013.254.
- [98] E. Petritoli, F. Leccese, S. Pizzuti, and F. Pieroni, "Smart lighting as basic building block of smart city: An energy performance comparative case study," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 136, pp. 466–477, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.12.095.
- [99] M. I. Al Risyad, A. Halog, and R. Nepal, "Smart Grid Technology for Energy Conservation in Street Lights: Lesson Learnt from Six Years' Operation in Indonesia," *2019 Int. Conf. Technol. Policies Electr. Power Energy, TPEPE 2019*, 2019, doi: 10.1109/IEEECONF48524.2019.9102608.
- [100] W. Sutopo, I. S. Mardikaningsih, R. Zakaria, and A. Ali, "A model to improve the implementation standards of street lighting based on solar energy: A case study," *Energies*, vol. 13, no. 3, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/en13030630.
- [101] A. Gharaibeh *et al.*, "Smart Cities: A Survey on Data Management, Security, and Enabling Technologies," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2456–2501, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2736886.
- [102] U. . D. of Energy, "Adoption of LEDs in Common Lighting Applications," 2017.
- [103] P. Graça and L. M. Camarinha-Matos, "Performance indicators for collaborative business ecosystems — Literature review and trends," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 116, pp. 237–255, 2017, doi: 10.1016/j.techfore.2016.10.012.
- [104] M. P. Andersen, G. Fierro, and D. E. Culler, "Enabling synergy in IoT: Platform to service and beyond," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 81, no. November 2016, pp. 96–110, 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2016.10.017.
- [105] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of things for smart cities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
- [106] M. Alaa, A. A. Zaidan, B. B. Zaidan, M. Talal, and M. L. M. Kiah, "A review of smart home applications based on Internet of Things," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 97, no. July, pp. 48–65, 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2017.08.017.
- [107] F. A. Alaba, M. Othman, I. A. T. Hashem, and F. Alotaibi, "Internet of Things security: A survey," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 88, no. April, pp. 10–28, 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2017.04.002.
- [108] M. Burhan, R. A. Rehman, B. S. Kim, and B. Khan, "IoT Elements, Layered Architectures and

- Security Issues: A Comprehensive Survey,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, pp. 1–37, 2018.
- [109] I. Jawhar, N. Mohamed, and J. Al-Jaroodi, “Networking architectures and protocols for smart city systems,” *J. Internet Serv. Appl.*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s13174-018-0097-0.
- [110] M. K. Manyake and T. N. D. Mathaba, “An Internet of Things Framework for Control and Monitoring of Smart Public Lighting Systems: A Review,” *5th Int. Conf. Artif. Intell. Big Data, Comput. Data Commun. Syst. icABCD 2022 - Proc.*, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1109/icABCD54961.2022.9856268.
- [111] C. H. Chen and C. T. Liu, “A 3.5-tier container-based edge computing architecture,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 93, pp. 107–227, 2021.
- [112] S. Chen, J. Xiong, J. Xu, S. Han, F. Wang, and K. Wang, “The Smart Street Lighting System Based on NB-IoT,” *Chinese Autom. Congr.*, pp. 1196–1200, 2018.
- [113] K. Aarika, M. Bouhlal, R. A. Abdelouahid, and S. Elfilali, “Perception layer security in the internet of things,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 175, pp. 591–596, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.07.085.
- [114] Mahoor, Z. S. Hosseini, A. Khodaei, A. Paaso, and D. Kushner, “State-of-the-art in smart streetlight systems: a review,” *IET Smart Cities*, vol. 2, no. 1, pp. 24–33, 2020.
- [115] M. Y. Mukta, A. Rahman, T. Asyhari, and Z. Alam, “IoT forenergy efficient green highway lighting systems: Challenges and issues,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 158, pp. 1–38, 2020.
- [116] A. Djuretic and M. Kostic, “Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting,” *Energy*, vol. 157, pp. 367–378, 2018.
- [117] X. Xu, A. Zhan, and X. Li, “Design and implementation of street light control system based on power line carrier communication,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, pp. 734–739, 2019.
- [118] Y. Chang, Y. Wei, J. Zhang, X. Xu, L. Zhang, and Y. Zhao, “Mitigating the greenhouse gas emissions from urban roadway lighting in China via energy-efficient luminaire adoption and renewable energy utilization,” *Conserv. Recycl.*, vol. 164, pp. 105–197, 2021.
- [119] P. Chiradeja, S. Yoomak, and A. Ngaopitakkul, “Economic Analysis of Improving the Energy Efficiency of Nanogrid Solar Road Lighting Using Adaptive Lighting Control,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23–38, 2020.
- [120] S. Ernst, L. Kotulski, T. Lerch, M. Rad, A. Sedziwy, and I. Wojnicki, “Application of reactive power compensation algorithm for large-scale street lighting,” *J. Comput. Sci.*, vol. 51, pp. 101–338, 2021.
- [121] G. Pasolini, P. Toppan, F. Zabini, C. De Castro, and O. Andrisano, “Design, Deployment and Evolution of Heterogenous Smart Public Lighting Systems,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 16, pp. 32–81, 2019.
- [122] M. Patel and S. Mukhejee, “Lighting Control Protocols and Standards,” *Handb. Adv. Light. Technol.*, 2017.
- [123] A. Ozadowicz and J. Grela, “Energy saving in the street lighting control system—a new approach based on the EN-15232 standard,” *Energy Effic.*, vol. 10, pp. 563–576, 2016.
- [124] A. V. Kudryashov, E. S. Galishheva, and A. S. Kalinina, “Lighting control using DALI interface,” *Proc. - 2018 Int. Conf. Ind. Eng. Appl. Manuf. ICIEAM 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728728.
- [125] M. A. George, S. Choudhary, D. Sahay, T. Yerra, and C. P. Kurian, “Digitally addressable wireless interface for lighting control system,” *Proc. - 2013 Texas Instruments India Educ. Conf. TIIEC 2013*, pp. 222–229, 2013, doi: 10.1109/TIIEC.2013.46.
- [126] M. Ragnoli, T. De Rubeis, A. Leoni, G. Ferri, and V. Stornelli, “A Low Power Digital Addressable Lighting Interface System for Daylight Control,” *2024 10th Int. Conf. Autom. Robot. Appl.*, pp. 397–401, 2024, doi: 10.1109/ICARA60736.2024.10553079.
- [127] J. Kim and A. Choi, “Reduction of lighting power consumption through lighting control using the KNX/digital addressable lighting interface protocol in liquefied natural gas carrier accommodation mock-up,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 182, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113374.
- [128] Y. Mehmood, F. Ahmad, I. Yaqoob, A. Adnane, M. Imran, and S. Guizani, “Internet-of-Things-Based Smart Cities: Recent Advances and Challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 16–24, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600514.
- [129] and A. K. A. Gehlot, R. G. Mishra, R. Singh, “IoT and Zigbee based Street Light Monitoring System with LabVIEW,” *Int. J. Sens. Its Appl. Control*, vol. 4, pp. 1–8, 2016.

- [130] F. Leccese, "Remote-control system of high efficiency and intelligent street lighting using a zigbee network of devices and sensors," *Power Deliv.*, vol. 28, no. 1, pp. 21–28, 2013.
- [131] M. Collotta, G. Pau, T. Talty, and O. K. Tonguz, "Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 7, pp. 125–131, 2018.
- [132] C.-A. Cheng, "A Single-Stage High Power Factor Power Supply for Providing an LED Street-Light Lamp Featuring SoftSwitching and Bluetooth Wireless Dimming Capability," *Energies*, vol. 14, no. 2, pp. 801–813, 2021.
- [133] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Assessment of Communication Technologies Supporting Smart Streetlighting Applications," *IEEE Int. Smart Cities Conf.*, pp. 1–7, 2018.
- [134] G. Mulligan, "The 6LoWPAN Architecture," *Proc. 4th Work. Embed. networked sensors*, pp. 78–82, 2007.
- [135] W. Mark and P. Michael, "Outdoor Lighting Control System Fundamental.," *Light. Int.*, 2015.
- [136] Z. Alliance, "Zigbee alliance, WPAN Industry Group," *Zigbee Alliance*, 2010. <http://www.zigbee.org/>
- [137] C. M. Ramya, M. Shanmugaraj, and R. Prabakaran, "Study on ZigBee technology," *ICECT 2011 - 2011 3rd Int. Conf. Electron. Comput. Technol.*, vol. 6, pp. 297–301, 2011, doi: 10.1109/ICECTECH.2011.5942102.
- [138] A. Zohourian *et al.*, "IoT Zigbee device security: A comprehensive review," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 22, no. May, pp. 100–791, 2023, doi: 10.1016/j.iot.2023.100791.
- [139] A. Peterson, "Yes, Terrorists Could Have Hacked Dick Cheney's Hear," *Washingt. Post, USA*, vol. 21, 2013.
- [140] A. Barua, M. A. Al Alamin, M. S. Hossain, and E. Hossain, "Security and Privacy Threats for Bluetooth Low Energy in IoT and Wearable Devices: A Comprehensive Survey," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, no. January, pp. 251–281, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3149732.
- [141] C. Li and Z. Cao, "LoRa Networking Techniques for Large-scale and Long-term IoT: A Down-to-top Survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 3, 2022, doi: 10.1145/3494673.
- [142] P. Gkotsiopoulos, D. Zorbas, and C. Douligeris, "Performance determinants in LoRa networks: A literature review," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1721–1758, 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3090409.
- [143] P. Elejoste *et al.*, *An easy to deploy street light control system based on wireless communication and LED technology*, vol. 13, no. 5. 2013. doi: 10.3390/s130506492.
- [144] C. W. Yang, E. Nefedov, S. Sierla, and P. Flikkema, "Vehicle and pedestrian aware street lighting automation," *Proceeding - 2015 IEEE Int. Conf. Ind. Informatics, INDIN 2015*, pp. 1269–1274, 2015, doi: 10.1109/INDIN.2015.7281917.
- [145] J. P. Pallo, S. Manzano, D. Chicaiza, C. Nunez, F. Placencia, and F. Nunez, "Wireless system for control, monitoring and preventive maintenance of public street lighting," *Iber. Conf. Inf. Syst. Technol. Cist.*, vol. 2018-June, pp. 1–6, 2018, doi: 10.23919/CISTI.2018.8399382.
- [146] Parkash, Prabu V, and Dandu Rajendra, "Internet Of Things Based Intelligent Street Lighting System for Smart City," *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. (An ISO)*, vol. 5, no. 5, pp. 1–8, 2016, doi: 10.15680/IJRSET.2016.0505181.
- [147] A. Kaur, S. . Saini, L. Singh, A. Sharma, and E. Sidhu, "Efficient Arduino UNO driven smart highway/bridge/tunnel lighting system employing rochelle piezoelectric sensor," *2nd IEEE Int. Conf. Control Comput. Commun. Mater.*, pp. 9–12, 2017.
- [148] I. Lhadi, M. Rifai, and Y. S. Ali, "An energy-efficient WSN-based vehicle movement traffic safety system," *5th Int. Conf. Inf. Commun. Syst.*, pp. 1–6.
- [149] J. Zhang, G. Qiao, G. Song, H. Sun, and J. Ge, "Group decision making based autonomous control system for street lighting," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 46, no. 1, pp. 108–116, 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2012.05.025.
- [150] R. Husin, "Automatic Street Lighting system for energy efficiency based on low-cost microcontroller," *Int. J. Simulat. Syst. Sci. Technol*, vol. 13, pp. 29–34, 2012.
- [151] M. S. Digamber, M. . Maruti, M. . Amol, and M. . Sachin, "Intelligent traffic light and automatic street lighting system according to traffic density," *Int. J. Res. Eng. Adv. Technol.*, vol. 3, pp. 18–21, 2015.
- [152] D. Khandelwal, B. M. Thomas, K. Mehndiratta, and N. Kumar, "Sensor based automatic street lighting system," *Int. J. Simulat. Syst. Sci. Res. Rev*, 2015.

- [153] C. C. Da Fonseca, R. P. Pantoni, and D. Brandão, "Public street lighting remote operation and supervision system," *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 38, pp. 25–34, 2015, doi: 10.1016/j.csi.2014.08.003.
- [154] P. K. Y. Rajput, G. Khatav, M. Pujari, and P. Yadav, "Intelligent street lighting system Using GSM," *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, vol. 2, no. 3, pp. 60–69, 2013, [Online]. Available: [http://www.ijesi.org/papers/Vol\(2\)3 \(Version-3\)/J236069.pdf](http://www.ijesi.org/papers/Vol(2)3 (Version-3)/J236069.pdf)
- [155] M. Karthikeyan, V. Saravanan, and S. Vijayakumar, "Cloud based automatic street light monitoring system," *Proceeding IEEE Int. Conf. Green Comput. Commun. Electr. Eng. ICGCCEE 2014*, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1109/ICGCCEE.2014.6922286.
- [156] Y. M. Tech and K. E. College, "Design and Development of Intelligent Wireless Street Light Control and Design and Development of Intelligent Wireless Street Light Control and Monitoring System Along With GUI," vol. 3, pp. 2115–2119, 2019.
- [157] F. Pardo-Bosch, A. Blanco, E. Sesé, F. Ezcurra, and P. Pujadas, "Sustainable strategy for the implementation of energy efficient smart public lighting in urban areas: case study in San Sebastian," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 76, 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103454.
- [158] F. J. Bellido-Outeiriño, F. J. Quiles-Latorre, C. D. Moreno-Moreno, J. M. Flores-Arias, I. Moreno-García, and M. Ortiz-López, "Streetlight control system based on wireless communication over DALI protocol," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, 2016, doi: 10.3390/s16050597.
- [159] K. Ronay and C. D. Dumitru, "An Approach to Intelligent Road Lighting System with Renewable Energy Based Power Supply," *Procedia Technol.*, vol. 22, pp. 836–839, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.01.057.
- [160] A. N. Shaikh, N. Shah, A. Tripathy, and M. H. Naikwadi, "Intelligent Monitoring and Control Rendered to Street Lighting," *2013 Int. Conf. Adv. Technol. Eng. ICATE 2013*, no. 151, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1109/ICAdTE.2013.6524761.
- [161] G. Pasolini *et al.*, "Smart city pilot projects using LoRa and IEEE802.15.4 technologies," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 4, pp. 1–17, 2018, doi: 10.3390/s18041118.
- [162] A. Szalai, T. Szabo, P. Hovath, A. Timar, and A. Poppe, "SmartSSL: application of IoT/CPS design platforms in LED-based street-lighting luminaires," *IEEE Light. Conf. Visegr. Ctries.*, pp. 1–6, 2016.
- [163] E. C. F. STANDARDIZATION, "EUROPEAN STANDARD EN 13201:2015." 2015.
- [164] N. Simicondutor, "nRF24L01 Specification - Datasheet," no. March, pp. 1–75, 2008, [Online]. Available: https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf
- [165] . Infraestruturas de Portugal, "Investimentos na modernização da Linha do Douro avança," 2024. <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/investimentos-na-modernizacao-da-linha-do-douro-avancam>

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

Diogo João Moura de Carvalho

ISEP, Porto, 26 de setembro de 2024