



**Fernando Jorge Nunes Oliveira** **Sistema Domótico através de Comunicação por Luz Visível**

**Domotic System using Visible Light Communication**



**Fernando Jorge Nunes Oliveira** **Sistema Domótico através de Comunicação por Luz Visível**

## **Domotic System using Visible Light Communication**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís Filipe Mesquita Nero Moreira Alves, Professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e do Mestre António Manuel Rodrigues Tavares, Director da Unidade de Projecto e Execução de Engenharia Especializada e Director da Unidade de Projectos de Investigação e Desenvolvimento da empresa “Diferencial – Electrotécnica Geral, Lda.”

Dedico este trabalho ao meu falecido pai e à minha mãe, pelos sacrifícios que foram suportando ao longo dos últimos anos.

## **o júri**

presidente

**Professor Doutor Dinis Gomes de Magalhães dos Santos**

Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Mónica Jorge Carvalho Figueiredo**

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

**Professor Doutor Luis Filipe Mesquita Nero Moreira Alves**

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

**Mestre António Manuel Rodrigues Tavares**

Director da Unidade de Projecto e Execução de Engenharia Especializada e Director da Unidade de Projectos de Investigação e Desenvolvimento da empresa "Diferencial – Electrotécnica Geral, Lda

## agradecimentos

Não é possível, em tão pouco espaço, mencionar e agradecer a todos que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Assim, e não menosprezando qualquer tipo de contribuição, pretendo desta forma apresentar, em primeiro lugar, as minhas menções e agradecimentos aos que, de uma forma mais directa, contribuíram para a realização deste trabalho:

Aos meus orientadores, o Professor Doutor Luís Filipe Mesquita Nero Moreira Alves e o Mestre António Manuel Rodrigues Tavares, pela oportunidade apresentada e pela confiança que depositaram em mim.

Aos colegas do Laboratório de Circuitos e Sistemas Integrados, pelo bom ambiente de trabalho.

Ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro e ao Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, pelos meios disponibilizados. De uma forma especial, agradeço ao Mestre Nuno Rafael Lourenço pelas discussões científicas e aos técnicos Paulo Gonçalves e Paulo Martins pela paciência e pelos conhecimentos transmitidos na construção de circuitos impressos.

A todos os professores que ao longo destes anos me enriqueceram o conhecimento. Pela disponibilidade e pela paciência demonstradas em alturas-chave da minha vida académica, destaco o Professor José Luís Azevedo e o Professor Artur José Carneiro Pereira.

Ao meu pai, José Almiro Oliveira, que me viu entrar nesta Universidade e não viveu o tempo suficiente para me ver sair. À minha mãe, Maria Ferreira Oliveira, pelas condições que me proporcionou, apesar dos enormes sacrifícios que teve de suportar ao longo destes anos.

À minha família e amigos mais próximos, que sempre me apoiaram neste percurso, em especial, aos meus tios Rosa Maria Patinha e António Patinha e à prima Micaela Patinha, que me acolheram e apoiaram incondicionalmente.

Aos meus companheiros da equipa de futsal da Associação Académica da Universidade de Aveiro, por serem uma família e por me terem proporcionado momentos inesquecíveis.

A todos os jovens que passaram pelo clube de formação de futsal do Clube PT por me enriquecerem pessoalmente a vários níveis e que durante 6 anos me proporcionaram momentos fantásticos como seu treinador e amigo.

Finalmente à Carla, que, através do seu apoio, incentivo, inspiração e paciência tornou menos penosa a conclusão desta etapa.

A todos, muito obrigado!

**palavras-chave**

Domótica, Sistemas de iluminação, Comunicação, Luz visível.

**resumo**

Na última década, ocorreram vários desenvolvimentos na tecnologia dos díodos emissores de luz (LED), que permitiram que esta fosse encarada como a principal tecnologia na iluminação de interiores. A integração dos LEDs em sistemas de iluminação inteligentes através de comunicação por luz visível (VLC) deve ser o próximo passo. A solução proposta é baseada numa arquitectura Master/Slave, suportada por um micro-controlador de baixo custo. Este sistema pode ter vários tipos de sensores conectados, que recolhem informação local, e é capaz de controlar e adaptar-se às necessidades de iluminação locais num curto período de tempo.

O sistema domótico proposto foca-se na gestão da luz através de um sistema inteligente que se pretende compacto, altamente adaptável a vários cenários e pouco dispendioso quando comparados com soluções comerciais existentes.

O principal objectivo deste sistema é controlar a luminosidade quando exposto a uma grande variedade de condições, através de uma unidade compacta. Esta unidade adquire e processa dados localmente, através de um módulo que contém o emissor e receptor VLC, sensores de luz ambiente e detecção de movimento, a unidade de processamento e o próprio sistema de iluminação.

Um importante requisito deste sistema domótico envolve a monitorização das condições de uso que só é possível através de sensores que quantifiquem parâmetros específicos pretendidos. Apesar de ser possível a adição de outros sensores como temperatura, posição e consumo de energia, os sensores identificados como requisito mínimo para este sistema inteligente são: luz e movimento. Enquanto o sensor de luz mede a luminosidade de outras fontes de luz (artificial e natural), o movimento é detectado automaticamente através de um sensor infravermelho passivo (PIR). Funcionalidades adicionais podem incluir a possibilidade de ajustar parâmetros manualmente através de um comando portátil infravermelho.

**keywords**

Domotics, Lighting Systems, Visible light communication.

**abstract**

The developments of light emitting diode (LED) technology over the past decade has allowed it to be seen as the future housing lighting main technology. The integration of LEDs on intelligent lighting systems using visible light communication (VLC) should be the next logical step. The proposed solution is based on a Master/Slave architecture, each one based on a low cost micro-controller. This system can have several types of sensors connected gathering local information. It is able to control the lighting output and at the same time adapt to local luminance needs in a very short amount of time.

The proposed domotics system focuses light management through an intelligent system which is intended to be compact, highly adaptable to different application scenarios and with a very low cost when compared with existing commercial solutions.

The main objective of this domotics system is to control the light output under different conditions using a compact unit able to acquire and process data locally in a small and autonomous module which includes VLC emitter and receiver units, sensors for ambient light and motion detection, the main processor unit and the lighting system itself.

An important requirement of this domotics system involves monitoring of usage conditions. This is only possible through sensors that quantify specific parameters. Although it is possible to add sensing elements measuring different variables, like temperature, position and power consumption, the ones which can be interpreted as the minimum requisites for an intelligent lighting system are ambient light and motion. While the ambient light sensor measures luminosity from light sources (artificial or natural), motion is automatically detected through a passive infrared (PIR) detector. Additional functionalities may include the possibility of manually adjusting parameters through a portable IR command.

# Índice

<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>v</b>
<b>Tabela de Figuras.....</b>	<b>vii</b>
<b>Acrónimos.....</b>	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento.....	2
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objectivos.....	4
1.4 Estrutura da dissertação.....	4
1.5 Trabalho Original.....	5
1.6 Ferramentas Utilizadas.....	6
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Iluminação e Comunicação.....</b>	<b>7</b>
2.1 Perspectiva histórica dos LED .....	9
2.2 Propriedades dos LEDs.....	11
2.2.1 Características físicas.....	12
2.2.2 Manutenção de lumens .....	12
2.2.3 CCT.....	13
2.2.4 CRI .....	13
2.2.5 Estabilidade e uniformidade do Brilho .....	13
2.3 Iluminação .....	14
2.3.1 Tipologia de Controlo.....	15
2.3.2 Importância do controlo de iluminação.....	15
2.3.2.1 <i>Termos críticos</i> .....	16
2.3.3 Driver de Corrente .....	17
2.3.3.1 <i>Topologias de Drive</i> .....	18
2.3.4 Associação de LEDs.....	19
2.3.5 Esperança de vida.....	20
2.3.5.1 <i>Factores Térmicos</i> .....	21
2.4 Comunicação por luz visível.....	21
2.4.1 Circuito conceptual.....	22
2.4.2 Considerações complementares.....	23
2.4.3 Aplicações presentes e futuras.....	23



<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>25</b>
<b>3 Sistemas de Iluminação Comerciais.....</b>	<b>25</b>
3.1 Factores Condicionantes.....	26
3.1.1 Iluminação Natural.....	26
3.1.2 Ergonomia dos Espaços.....	27
3.1.3 Regulamentos e Normas.....	28
3.2 Factores de Eficiência.....	28
3.2.1 Camada de Detecção.....	29
3.2.1.1 <i>Infravermelho (IR)</i> .....	29
3.2.1.1.1 Sensores de Luminosidade.....	29
3.2.1.1.2 Sensores de Presença.....	30
3.2.1.2 <i>Microondas (MW)</i> .....	30
3.2.1.2.1 Sensores de Movimento.....	30
3.2.2 Plataforma de Comunicação.....	31
3.2.2.1 <i>Corrente Portadora (PLC)</i> .....	31
3.2.2.2 <i>Rádio-Frequência (RF)</i> .....	31
3.2.2.3 <i>Infravermelho (IV)</i> .....	32
3.2.3 Gestão de Iluminação.....	32
3.2.3.1 <i>DSI</i> .....	32
3.2.3.2 <i>DALI</i> .....	32
3.2.3.3 <i>KNX</i> .....	33
3.2.3.4 <i>Microcontrolador</i> .....	33
3.3 Definição de Espaços Comerciais.....	33
3.3.1 Condições de luminosidade.....	34
3.3.2 Método de caracterização.....	35
3.3.2.1 <i>Habitação T3</i> .....	36
3.3.2.2 <i>Habitação T4</i> .....	37
3.3.2.3 <i>Escritórios</i> .....	38
3.4 Apresentação de sistemas de iluminação comerciais.....	39
3.4.1 Método de análise.....	39
3.4.2 Informações técnicas.....	40
3.4.2.1 <i>Sistema ESYLUX</i> .....	40
3.4.2.2 <i>Sistema LEGRAND</i> .....	41
3.4.3 Sistema ESYLUX.....	42
3.4.4 Sistema LEGRAND.....	45
3.4.5 Consumo de energia.....	48
3.4.5.1 <i>Luminárias</i> .....	48
3.4.5.2 <i>Tempos de utilização</i> .....	49
3.4.5.3 <i>Custo energético</i> .....	50
3.4.5.4 <i>Retorno do investimento</i> .....	50
3.4.6 Sumário de Resultados.....	52

<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>53</b>
<b>4 Sistema doméstico</b> .....	<b>53</b>
4.1 Arquitectura do Sistema.....	54
4.1.1 Master.....	57
4.1.2 Slave.....	58
4.2 Gestão de dados.....	58
4.2.1 Transmissão.....	59
4.2.2 Recepção.....	60
4.2.3 Trama de dados.....	61
4.2.4 Programa principal.....	61
4.3 Bloco de Sensores.....	62
4.4 Emissor VLC .....	63
4.4.1 Luminárias.....	64
4.4.2 Nível DC.....	64
4.4.3 Emissor de Dados.....	66
4.4.4 Driver VLC .....	67
4.5 Receptor VLC.....	69
4.5.1 Fotodetector.....	69
4.5.1.2 Modelo do fotodíodo PIN.....	70
4.5.2 Pré-Amplificador.....	71
4.5.3 Andar de Filtragem.....	72
4.5.3.1 Filtro Passa-Alto (FPA).....	72
4.5.3.2 Filtro Passa-Baixo (FPB).....	73
4.5.3.3 Filtro Passa-Banda.....	74
4.5.4 Condicionamento de sinal.....	74
4.5.5 Descodificador.....	75
4.5.5.1 PLL.....	76
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>79</b>
<b>5 Apresentação de resultados</b> .....	<b>79</b>
5.1 Gestão de dados.....	80
5.1.1 Bibliotecas.....	80
5.1.1.1 <i>digitalWriteFast.h</i> .....	80
5.1.1.2 <i>SoftwareSerial.h</i> .....	80
5.1.1.3 <i>TimerOne.h</i> .....	81
5.1.2 Manipulação de dados.....	81
5.1.3 Funcionalidades.....	82
5.1.4 Resultados práticos.....	83
5.1.4.1 Caracterização temporal.....	84
5.1.4.2 Comunicação série.....	85
5.1.4.3 Monitorização de erros.....	86
5.1.4.4 Funcionalidades.....	87
5.2 Emissor VLC.....	88
5.2.1 Luminárias .....	88

5.2.2 Nível DC.....	88
5.2.3 Emissor de dados.....	89
5.2.4 Driver VLC.....	89
5.3 Receptor VLC.....	90
5.3.1 Pré-amplificador.....	90
5.3.2 Andar de filtragem.....	92
5.3.3 Condicionamento de sinal.....	93
5.4 Custo do sistema.....	93
5.5.1 Sumário de Resultados.....	95
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>97</b>
<b>6 Conclusões.....</b>	<b>97</b>
6.1 Aplicações comerciais.....	98
6.2 Trabalho Futuro.....	98
<b>Bibliografia.....</b>	<b>101</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>105</b>





## **Acrónimos**

### **A**

---

**AC** – *Alternating Current* (Corrente Alternada)  
**ADC** – *Analogic to Digital Circuit* (Conversor Analógico-Digital)

### **C**

---

**CCT** – *Correlated Color Temperature*  
**CRI** – *Color Rendering Index*

### **D**

---

**DAC** – *Digital to Analogic Circuit* (Conversor Digital-Analógico)  
**DC** – *Direct Current* (Corrente contínua)  
**DSI** – *Digital Serial Interface*  
**DALI** – *Digital Addressable Lighting Interface*

### **E**

---

**EIB** – *European Installation Bus*  
**EST** – *Engineering-Software-Tool*

### **F**

---

**FF** – *Flip-flop*  
**FPA** – Filtro Passa-Alto  
**FPB** – Filtro Passa-Baixo

### **G**

---

**GBW** – *Gain-Bandwidth Product*

### **H**

---

**HB-LED** – *High Brightness LED*  
**HP-LED** – *High Power LED*

### **I**

---

**IR** – *InfraRed* (Infra-Vermelho)  
**ISR** – *Interrupt Service Routine* (rotina de serviço à interrupção)

**L**

---

**LED** – *Light Emmiting Diode* (Diodo emissor de luz)  
**LOS** – *Line Of Sight* (campo de visão)

**M**

---

**MW** – *MicroWave* (Microondas)  
**M2M** – *Machine to Machine*

**N**

---

**NRZ** – *Non-Return to Zero*

**P**

---

**PC** – *Personal Computer* (Computador pessoal)  
**PCB** – *Printed Circuit Board* (Placa de circuito impresso)  
**PIN** – *P-Intrinsic-N*  
**PIR** – *Passive InfraRed* (Infravermelho passivo)  
**PLC** – *Power Line Communications* (Comunicação Corrente Portadora)  
**PLL** – *Phased-Locked Loop*  
**PWM** – *Pulse Width Modulation*

**R**

---

**RGB** – *Red, Green and Blue* (Vermelho, Verde e Azul)  
**RF** – *Radio-Frequency* (Rádio-Frequência)

**S**

---

**SMD** – *Surface Mount Device*  
**SSL** – *Solid State Lighting* (Dispositivos de estado sólido)

**T**

---

**TIA** – *TransImpedace Amplifier* (Amplificador Transimpedância)  
**TP** – *Twisted Pair* (Par entrelaçado)

**U**

---

**USB** – *Universal Serial Bus*  
**UART** – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

**V**

---

**VCO** – *Voltage-Controlled Oscillator* (Controlo de Voltagem)  
**VIDAS** – *VIisible light communications for advanced Driver Assistance Systems*  
**VLC** – *Visible Light Communication* (Comunicação por Luz Visível)

# CAPÍTULO I

## 1 Introdução

O recente aumento da procura global de fontes de energia, devido ao excesso de consumo, veio trazer novos desafios à sociedade moderna [18] [19]. Como não existem soluções imediatas e totalmente satisfatórias, os investigadores valem-se de tecnologias mais antigas, algumas delas esquecidas, no sentido de melhorar eficiência energética e diminuir o consumo eléctrico.

Neste contexto, e impulsionado pelos avanços tecnológicos dos díodos emissores de luz (LED) nos anos recentes [29], que permitiram maior luminosidade e eficiência, surgiu a tecnologia comunicação por luz visível (VLC) [35]. Esta técnica de comunicação sem fios, tal como seu nome indicia, usa a luz no espectro visível como meio para transmitir dados [23]. Na realidade, o VLC já é conhecido há milhares de anos e remonta ao tempo das tribos que usavam fumo como meio de comunicação. Também na Grécia Antiga, ou durante a Idade Média ou ainda mais recentemente, no início do século XIX, por intermédio de Graham Bell [10], ocorreram tentativas de transmissão de informação usando luz visível.

O trabalho desta dissertação consistiu na concepção de um sistema inteligente de iluminação com comunicação por luz visível. Pretende-se que este sistema faça reaproveitamento da iluminação, ou seja, que se sirva da iluminação que está a ser usada



para enviar e receber dados fazendo, simultaneamente, gestão de energia.

Neste capítulo são expostas as principais motivações deste projecto para investigação da tecnologia VLC e a viabilidade comercial de um sistema deste tipo. Os objectivos são traçados, é apresentada uma descrição breve da dissertação e é exposto o trabalho original.

## **1.1 Enquadramento**

A presente dissertação “Sistema domótico de iluminação suportado por VLC” está inserida numa área de investigação de comunicação sem fios, usando luz como meio de transmissão. Este trabalho é uma extensão do projecto “*Communications System using Visible Light: Emmitter/Receiver*” [28], concebido em 2009, que se foca no desenho conceptual do emissor e receptor VLC. Este último está inserido num projecto ainda maior, denominado projecto VIDAS (*Visible light communications for Advanced Driver Assistance Systems*) (PDTC/EEA-TEL/75217/2006), desenvolvido no laboratório de sistemas e circuitos integrados no Instituto de Telecomunicações de Aveiro.

No âmbito deste projecto, para além dos trabalhos referidos anteriormente, foram usados outros estudos prévios que permitiram um maior enquadramento nesta dissertação. Nesse sentido, o artigo “*Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights*” [24] destaca-se por fornecer uma análise de sistemas de comunicação usando LEDs, o relatório “Projecto Luz Comunicante” [43] e o artigo “*Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lightings*” [25] foram importantes por incluírem a análise inicial de sistemas VLC e caracterização de alguns LEDs e o artigo publicado “*Visible Light Communication Systems Conception and VIDAS*” [26] contém informações relativas a aplicações VLC.

## **1.2 Motivação**

O crescente aumento populacional e a dependência cada vez maior de aparelhos eléctricos implantam no mundo moderno uma necessidade galopante de energia [18]. Por conseguinte, este é um problema que gera preocupação. Considerando que é expectável que o consumo aumente nos próximos anos, terão que ser feitos avultados investimentos em novas fontes de energia, que resultarão num aumento de custo para as companhias eléctricas e consumidores.

Necessária e mesmo indispensável à vida humana, a luz artificial detém uma das maiores quotas de utilização em edifícios, quota da ordem dos 20-30% [9]. E por tal, nos últimos anos, as empresas têm procurado, incessantemente, melhorar a eficiência energética de lâmpadas que usam tecnologia mais antiga com o objectivo de diminuir o peso da iluminação na factura energética [29].

Nos anos mais recentes, assistiu-se ao aparecimento de uma variedade de sistemas (p.ex. automóveis, aviação) que se tornaram mais inteligentes, ou seja, mais autónomos da sua operação [31]. Um sistema inteligente aplicado à iluminação resultaria, portanto, num aumento de eficiência e poupança de energia eléctrica. Apesar das empresas de iluminação afirmarem que o investimento nestes sistemas é recuperável em 2-3 anos, devido a poupanças energéticas da ordem dos 60-70%, a verdade é que os consumidores

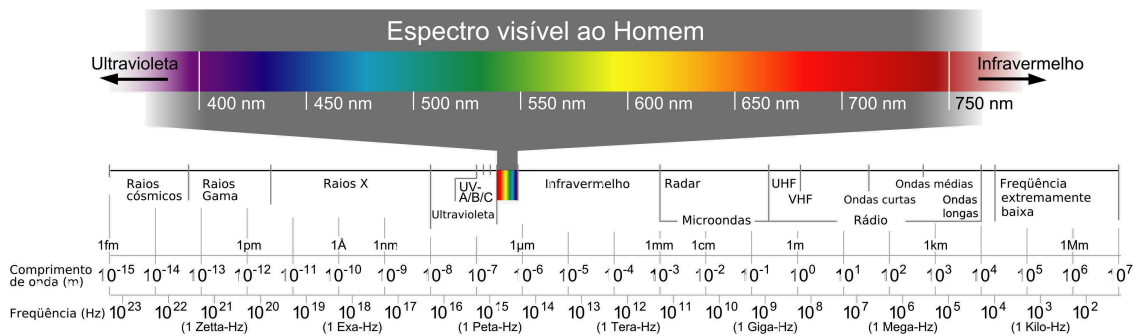


Figura 1.1: Espectro Electromagnético.

estão convencidos que o investimento inicial, amortizado pelos ganhos a médio-longo prazo não é proveitosa. É expectável que este panorama mude de figura em virtude da redução do custo previsto para os LEDs [39].

Por outro lado, e devido ao elevado custo dos sistemas inteligentes, a maioria, senão a totalidade dos sistemas comerciais, evoluiu no sentido de integrarem num só sistema outros parâmetros para além da iluminação, tais como: ar condicionado, segurança e estores. A aquisição de informação não podia ser obtida sem o uso de uma variedade de sensores (p.ex. luminosidade, posição, movimento e temperatura), de modo a que o sistema tivesse uma resposta rápida, precisa e adaptada às necessidades de quem utiliza. Os preços destes sistemas continuam extremamente elevados.

A grande maioria dos sistemas inteligentes actuais usa tecnologia baseada em rádio-frequência (RF) [27], corrente portadora (PLC) [38] ou infravermelho (IR) [14], e toma partido das estruturas já existentes. De modo a haver uma ponte entre estas tecnologias, são necessários outros dispositivos que acabam por tornar o custo do sistema completo ainda mais alto. A tecnologia VLC surge então como uma alternativa, pois usa a mesma infraestrutura para iluminação e comunicação, evitando assim a inclusão de mais *hardware*. Para além disso, é totalmente inofensiva ao ser humano, não é licenciada, tem grande largura de espectro electromagnético (inclusive RF - Figura 1.1) e não interfere com aparelhos electrónicos com comunicação baseada em RF [23]. No entanto, para que a tecnologia VLC prevaleça, é necessário não interferir e assegurar a coexistência pacífica com outros sistemas de iluminação, o que não pode ser atingido com fontes de luz convencionais, nomeadamente, fluorescentes e incandescentes.

Entretanto, nas últimas duas décadas, os LEDs atingiram desenvolvimentos chave (luz branca, encapsulamento térmico melhorado e processos de fabricação mais eficientes) que tornaram possível a viabilidade de lâmpadas LED para espaços interiores e exteriores. Hoje em dia, luminárias LED consomem menos energia, têm maior eficiência e maior durabilidade que as lâmpadas tradicionais, são toleráveis à humidade e têm um baixo custo de manutenção [39]. Assim, os LEDs apresentam inúmeras características que o tornam o componente ideal para sistemas VLC. Ao ter atingido um desempenho comparável às lâmpadas incandescentes e fluorescentes, os LEDs atingiram novos mercados de iluminação, sendo expectável que, até ao final de 2012, a quota de mercado mundial atingida seja superior a 20% e que este valor suba para 60% em 2020 [11].

Este projecto aspira assim à concepção de um sistema que tem a pretensão de ser uma alternativa viável aos sistemas comerciais de iluminação actuais. Para essa situação

ocorrer, é necessário que, pelo menos, revele comportamento igual nos pontos fortes e melhor nos pontos fracos dos concorrentes. Das características que se pretendem, destaca-se a diminuição de desperdício de energia (p.ex. esquecimento de desligar ou inerente aproveitamento energético por via do VLC) e conseqüente redução de consumo, resultando numa economia substancial de energia. Apresenta-se ainda como prático, compacto e facilmente adaptável às condicionantes espaciais, além de economicamente mais acessível, o que abre portas a um acesso mais alargado por parte de possíveis consumidores.

### **1.3 Objectivos**

Os principais objectivos desta dissertação consistem em desenvolver e testar um sistema de iluminação inteligente através de VLC, e que seja ao mesmo tempo barato e económico. As tarefas propostas de modo a atingir este objectivo são:

- Estudar e perceber os conceitos de VLC;
- Caracterizar e desenvolver módulos capazes de comunicar por VLC;
- Desenvolver rotinas de *software* que permitam a gestão de energia, iluminação e comunicação;
- Estudar e pesquisar sistemas inteligentes semelhantes presentes no mercado;
- Conceber um sistema inteligente mais barato, adaptável e acessível às necessidades dos consumidores.

### **1.4 Estrutura da dissertação**

O capítulo II está dividido em cinco subsecções e é totalmente dedicado aos LEDs e à utilização dos mesmos como elemento crucial no desenvolvimento de aplicações por comunicação através de luz visível. Na secção 2.1, é introduzida uma breve história dos LEDs; seguida pela secção 2.2, onde são caracterizadas as propriedades comerciais mais relevantes dos LEDs presentes no mercado. Já na subsecção 2.3, é caracterizada a forma como a iluminação é efectuada. Neste ponto, também é feita a distinção entre os dois grupos de LEDs mais representados no mercado, nomeadamente, HB-LEDs (*High Brightness LEDs*) e HP-LEDs (*High Power LEDs*). A secção 2.4 é integralmente dedicada à comunicação por luz visível. Neste ponto estão referidos vários assuntos: análise das fontes de ruído, análise de problemas que podem surgir, descrição do método usado para transmissão/recepção de dados e exemplos de aplicações actuais e futuras usando VLC.

O capítulo III está dividido em cinco secções e apresenta um estudo baseado em soluções de controlo de iluminação presentes no mercado. Na secção 3.1, são referidos e discutidos, factores e normas, que se devem ter em atenção quando se pretende instalar um sistema de iluminação inteligente. A secção 3.2 pretende caracterizar os blocos constituintes de um sistema inteligente, nomeadamente, detecção (bloco de sensores), plataformas de comunicação (meio físico pelo qual a informação se propaga) e protocolos de comunicação (padrão que controla e possibilita a comunicação). Na secção 3.3, são caracterizados os espaços físicos que servem de base à comparação dos sistemas comerciais estudados. Neste ponto, a caracterização consiste em identificar espaços, número de divisões, área ocupada por cada divisão e tempo de utilização.

Ainda neste ponto são definidos e introduzidos 'focos de luz', que vão servir também para uma maior uniformização dos sistemas propostos na secção 3.4. Nesta secção, são apresentados possíveis soluções baseadas em sistemas de iluminação de duas empresas concorrentes na área da iluminação, mais especificamente, a ESYLUX e LEGRAND. Na secção 3.5, é efectuado um estudo que consiste no cálculo do retorno do investimento dos sistemas propostos, ou seja, o tempo que demora até que o investimento inicial seja rebatido, força da gestão de energia. Por fim, na secção 3.6, é apresentado o resumo dos resultados relativo aos sistemas propostos na secção 3.4 e ao retorno do investimento da secção 3.5. seguido de comentários e conclusões.

No capítulo IV, composto por cinco secções, é apresentado o projecto integral em termos de *hardware* e *software*. Na secção 4.1, é caracterizada a arquitectura e são apresentados os módulos básicos de actuação e comunicação, assim como os modos expectáveis de actuação do sistema. Na secção 4.2, é descrita a forma como a informação vai ser monitorizada, processada, transmitida e, por fim, recolhida no receptor. Na secção 4.3, é exposto o requisito mínimo do bloco de sensores responsáveis pela aquisição de informação. Nas secções 4.4 e 4.5, o emissor e receptor VLC são caracterizados. Em ambas as secções, são expostos blocos principais, descritas as soluções e apresentados os resultados individuais da simulação.

O capítulo V é dedicado à apresentação dos resultados experimentais obtidos através de um protótipo, cuja construção se baseou no capítulo IV. O protótipo consistiu na concepção de um módulo-base que podia comunicar com outros módulos semelhantes através de VLC, numa arquitectura *Master/Slave*. Assim, na secção 5.1, é caracterizado o *software* desenvolvido na concepção do sistema, que inclui também as funcionalidades mais importantes. Na secção 5.2 e 5.3, são apresentados os resultados experimentais dos circuitos electrónicos referidos em 4.4 e 4.5, relativos ao emissor e receptor VLC, respectivamente. Por fim, a secção 5.5 é dedicada totalmente ao cálculo dos custos associados aos módulos projectados e prototipados.

No capítulo VI, são expostas as conclusões atingidas no decorrer da execução desta dissertação. Serão efectuadas também, considerações sobre os resultados obtidos, aplicações comerciais actuais onde este sistema poderia ser inserido (secção 6.1), assim como indicações para futuros melhoramentos do dispositivo desenvolvido (secção 6.2).

## 1.5 Trabalho Original

Tal como foi referido em 1.1, esta dissertação é a continuação do projecto “*Communications System using Visible Light: Emmitter/Receiver*”, e como tal, os módulos VLC baseiam-se nas directrizes aí referenciadas. Assim, o trabalho original consiste em desenvolver um protótipo que permita comunicar por luz visível. Foi necessário, então, conceber um modelo baseado num microcontrolador que permitisse a aquisição, processamento e gestão dados, logo, foi necessário desenvolver *software* específico para esta aplicação.

Durante a execução do trabalho apresentado nesta dissertação, foi submetido ao *Conftele 2013 - 9<sup>th</sup> edition of the Conference Telecommunications* um artigo intitulado “*Domotic System using Visible Light Communication*” com o objectivo de ser publicado. O artigo apresenta uma solução de iluminação interior baseada num microcontrolador de baixo custo, que, através de uma arquitectura *Master/Slave* e de comunicação por luz visível, consegue adaptar-se à luminosidade do meio ambiente.

Esta solução é completamente adaptável às necessidades dos utilizadores, já que podem ser adicionados ou retirados sensores conforme as necessidades, comportando-se como um sistema *plug-and-play*.

## **1.6 Ferramentas Utilizadas**

No processo de escrita desta dissertação foram utilizadas várias ferramentas com inúmeras funções distintas. Desde já, o OpenOffice.org v3.4, disponibilizado gratuitamente pela *Apache Software Foundation*, foi usado simultaneamente como editor de texto e de tabelas de cálculo. Outras aplicações foram extremamente úteis, nomeadamente, Microsoft Visio Professional 2010 da *Microsoft* no desenho de figuras e diagramas de estados, e o programa de livre distribuição JabRef 2.7.2, como gestor de referências.

Na concepção, simulação e desenho dos circuitos electrónicos, foi utilizado o Altium Designer v10.0 da *Altium Limited*. No caso particular da concepção de filtros, foi empregue o FilterPro Desktop v3.1.0, disponibilizado gratuitamente pela *Texas Instruments*.

Os vários testes de *software* foram executados maioritariamente através do programa *freeware*, intitulado RealTerm: Serial Capture Program v2.0.0.70, que permite a visualização dos dados enviados e recebidos entre portos, assim como a captura desses mesmos dados em ficheiro para posterior tratamento. Com a ajuda do Matlab R2012a da empresa *The MathWorks, Inc.*, foi efectuada a análise dessa informação e foram gerados gráficos que permitiram uma verificação mais eficaz dos dados.

Este trabalho abrangeu também a construção de protótipos que permitissem a verificação dos circuitos projectados. Nesse sentido, foram utilizadas placas brancas numa primeira fase de teste, passando para placas de circuito impresso com componentes integrados SMD numa fase posterior. Houve necessidade também de recorrer a fontes de alimentação portáteis da *Hewlett Packard*, osciloscópios TEKTRONIX e pontas de prova, como ferramentas de *debugging*. Os osciloscópios permitiram também, a fotografia instantânea das formas, cujas imagens se encontram maioritariamente ao longo do capítulo 5. Todos estes elementos foram disponibilizados no laboratório de sistemas e circuitos integrados do Instituto de Telecomunicações de Aveiro.

## CAPÍTULO II

### 2 Iluminação e Comunicação

Muitos são os que consideram o fogo a descoberta mais importante da história da Humanidade. Os antepassados que usaram activamente o fogo com o propósito de protecção remontam há 2 milhões de anos, sendo que os primeiros vestígios arqueológicos de reunião à volta de uma fogueira remontam há 1.6 milhões de anos. Estes elementos encontrados no terreno permitem supor que talvez tenha sido nesta altura da nossa história que o fogo foi utilizado como fonte de iluminação. A evolução humana não mais parou desde então, milhares de anos depois, a iluminação já não era feita apenas através de fogueiras, mas também por intermédio de lamparinas alimentadas a óleo ou velas de cera.

As indesejadas guerras, constantes ao longo dos séculos, foram indubitavelmente importantes meios de desenvolvimento do engenho e da inteligência humana. A necessidade de comunicação entre exércitos era um desejo presente na mente dos responsáveis de qualquer nação, pois permitia a transmissão de mensagens muito mais rápida, assim como uma adaptação mais pró-activa e menos reactiva. Por conseguinte, a luz emitida pelo fogo, visível a muitos quilómetros, era um meio óbvio de comunicação à distância rápido e instantâneo [44].

A probabilidade de terem existido no passado outros dispositivos ópticos que se perderam na História é grande, no entanto, a primeira pessoa documentada e identificada como responsável pelo desenvolvimento de um telégrafo óptico foi Aeneas Stymphalus [37]. Na época em que viveu, por volta de 350 a.C., Aeneas era reconhecido como um autor de estratégia militar da Grécia Antiga. O seu trabalho principal, "A Arte da Guerra", sobreviveu até à nossa data, todavia não contém a descrição da sua invenção. A descrição do projecto sobreviveu ao tempo por intermédio do historiador grego Polybius, que no seu livro "As Histórias" descreve as limitações das tochas de fogo [45].

O maior problema do telégrafo de Aeneas residia na possibilidade de qualquer pessoa, amigo ou inimigo, poder traduzir e usar para seu próprio benefício a mensagem interceptada, pois esta não continha qualquer encriptação. Então, por volta do ano de 200 a.C., surge o primeiro telégrafo óptico com encriptação mencionado pelo mesmo historiador grego, Polybius. Este dispositivo consistia no uso de tochas de fogo e de um alfabeto dividido em cinco partes (Figura 2.1). Através de outras fontes da época, sabe-se que este aparelho foi desenvolvido por dois cidadãos gregos: Cleoxenus e Democleitus [41]. Outra aplicação do fogo como meio de comunicação é mencionado em textos Romanos, que na altura se mantinham em guerra com os Gregos, referem que usando o fogo à noite e luz do sol reflectida por espelhos, os Gregos conseguiram enviar mensagens a 40-100km ou mais, dependendo da visibilidade [45]. Este método usando espelhos e o sol é denominado heliografo, que significa '*escrever com a luz do sol*'.

A Humanidade percorreu um longo caminho desde então e foi desenvolvendo métodos cada vez mais sofisticados de comunicação. Os avanços tecnológicos alcançados nas últimas décadas eram inimagináveis há 100 anos, quanto mais há 2000 anos. Resultante dos avanços da ciência, a Humanidade passou a usar a electricidade como meio para atingir qualquer fim. Foram atingidos novos níveis máximos de conforto à medida que se desenvolvia um estilo de vida cada vez mais dependente dos aparelhos eléctricos, que passaram a ser considerados essenciais e omnipresentes. O uso globalizado destes instrumentos eléctricos resultou numa factura energética crescente, da qual se estima que 20-30% é responsabilidade da iluminação [9].

O desperdício, o aumento da procura, agravado pela escassez de fontes de energia e consequente aumento das taxas, fez aumentar a sensibilização de consumidores e produtores de energia no sentido dos fabricantes produzirem luminárias cada vez mais eficientes, quer em termos de luminosidade quer em termos de consumo. Consequentemente, foram sendo introduzidos no mercado mundial várias luminárias

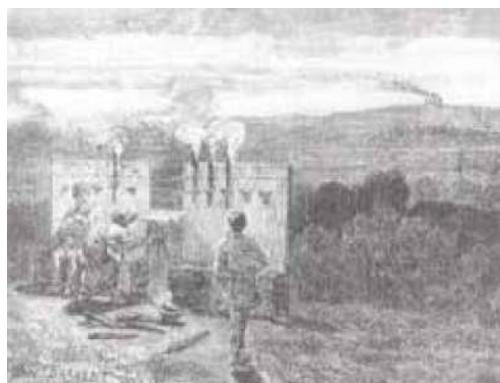


Figura 2.1: Primeiro telégrafo óptico com encriptação [41].

com eficiências energéticas substanciais. Foi neste ambiente que os LED surgiram como tecnologia alternativa e rapidamente foram identificados como 'a' tecnologia de futuro, tendo em conta a margem de progressão existente, fruto dos desenvolvimentos tecnológicos dos últimos anos [47].

Este capítulo pretende caracterizar os LEDs, explicando as suas vantagens e desvantagens relativamente às lâmpadas tradicionais, assim como evidenciar a potencialidade existente no que diz respeito à luminosidade, consumo de energia e comunicação por luz visível (VLC). A história dos LED é efectuada de uma maneira breve no ponto 2.1. Na secção 2.2, são referidas as propriedades físicas dos LEDs, assim como outras propriedades a ter em conta no momento da aquisição. De seguida, a secção 2.3 destina-se à exploração da iluminação, isto é, tipo de elementos, associação de lâmpadas e *drive* de corrente. O ponto subsequente, 2.4 é dedicado à comunicação, mais precisamente, à forma como esta pode ser efectuada através da variação de um sinal com *duty-cycle* programável.

## 2.1 Perspectiva histórica dos LED

Os constantes avanços da tecnologia globalizaram o estilo de vida moderno característico da sociedade da informação. Inevitavelmente o estilo de vida do cidadão comum contemporâneo passa pela dependência do acesso rápido e cómodo à informação.

Não se pode, no entanto, considerar a utilização de sistemas de comunicação através de luz um processo recente. A história da Humanidade relata episódios de utilização deste recurso com intuito comunicativo por parte de civilizações muito antigas, mas é em 1880 que surge a primeira referência à investigação conceptual e protótipo de construção de um sistema usando a comunicação por luz visível. A 3 de Junho desse ano, o escocês, mais tarde naturalizado americano, Alexander Graham Bell, mundialmente conhecido como o pai do telefone, consegue enviar as primeiras palavras, através do Fofone [5] [6] (Figura 2.2). O dispositivo permitiu que uma conversa telefónica fosse realizada através da luz, a uma distância de 213 metros. Usou a luz do sol como fonte, que, modulada através da vibração de um espelho reflector, era depois capturada por um espelho parabólico com células foto-condutoras de selénio ao ponto central. Nas palavras de Bell, “o inventor é um homem que olha para o mundo em torno de si e não fica satisfeito com as coisas como elas são. Ele quer melhorar tudo o que vê e aperfeiçoar o mundo. É perseguido por uma ideia, possuído pelo espírito da invenção e

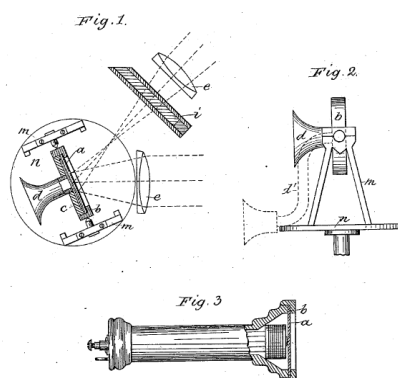


Figura 2.2: Protótipo do fofone original [5].



não descansa enquanto não materializa seus projectos."

É já no século XX, nomeadamente em meados da década de 20, que aparece o nome de Oleg Vladimirovich Losev, trabalhando no laboratório central de radio de Leninegrado, a descobrir a luz emitida por um díodo. O cientista desenvolveu esse díodo cristalino à base de óxido de zinco e carboneto de silício e, ao passar corrente eléctrica pelo mesmo, verificou uma emissão luminosa. Foi assim descoberto, o efeito de electroluminescência e nasceu assim o famoso díodo emissor de luz - LED, sigla da designação inglesa. A morte prematura do russo impediu que desenvolvesse o seu valioso invento e apenas mais tarde, em Abril de 2007, o mundo o reconhece como inventor do LED, através de um artigo da *Nature Photonics* [46].

Assim, e aplicado à prática, somente em 1962, foi conhecido o primeiro LED vermelho, que nos chega pela mão do engenheiro Nick Holonyak Jr., da General Electric, que descobre o método de sintetizar cristais de fosfeto e arseneto de gálio, cujos comprimentos de onda eram visíveis num espectro [40]. A partir desta data, a eficiência e aplicação dos LED foi crescendo significativamente, e os LEDs verdes e amarelos não demoraram muito a aparecer, ainda que a tecnologia ficasse limitada a esses três tons durante décadas.

É em 1992 que se assiste a uma revolução na história dos LEDs, quando o investigador japonês Shuji Nakamura consegue produzir o primeiro LED azul comercialmente viável [33]. Este, combinado às cores previamente existentes, permitiu finalmente a criação da tão desejada luz branca. Foi obviamente possível recriar outras cores, mas nenhuma delas alcança o impacto produzido pelos LEDs azuis e da luz branca, que abriram portas a vastíssimas aplicações antes inacessíveis.

Outro avanço tecnológico, ocorrido no início do corrente século, e que permitiu a integração comercial mais rápida dos LEDs, foi o encapsulamento térmico [12] [36]. Um LED emite mais luminosidade à medida que a corrente que o percorre aumenta, desde que o limite máximo não seja ultrapassado. A potência dissipada aumenta com a corrente, o que torna a temperatura da junção térmica um grave problema, pois, a partir de um determinado valor de temperatura, a eficiência em função da luminosidade decai [22]. Assim, a dissipação de calor através de um encapsulamento térmico mais eficaz permitiu intensidades de luz mais próximas das lâmpadas comuns.

Muitas são as vantagens que os LEDs apresentam face às lâmpadas incandescentes ou fluorescentes: menor consumo de energia, maior durabilidade (medida em dezenas de milhares de horas) e maior aproveitamento energético [24]. A desvantagem mais relevante diz respeito ao valor baixo de lm/W por elemento. Assim, e de modo a atingir luminosidade mais alta, é necessário que uma lâmpada LED seja na realidade um *array* de LEDs, o que se traduz num custo muito mais elevado quando comparado com as lâmpadas fluorescentes ou incandescentes. A evolução nos métodos de fabricação permitiu a diminuição de custo por LED e aumento de luminosidade que resultou numa maior competitividade e consequente maior comercialização [53].

Ao longo dos anos, os LEDs têm feito parte dos mais diferentes dispositivos electrónicos. A sua evolução não pára e a cada momento surgem novas aplicações e tecnologias, cada vez mais adaptadas às necessidades de vida dos cidadãos. No presente ano, espera-se que a iluminação através de LEDs atinja uma quota de mercado mundial na ordem dos 20% e estima-se que este valor suba para 60% em 2020 [11]. Os investimentos monetários envolvidos são superiores a centenas de milhões de dólares.

## 2.2 Propriedades dos LEDs

Avaliar produtos de iluminação de modo a comparar tecnologias concorrentes é imperativo. No que respeita à iluminação de interiores, a variedade de LEDs que vai surgindo no universo empresarial possibilita a obtenção de níveis de eficiência e luminosidade cada vez mais elevados (Figura 2.3), preço por lumen cada vez mais reduzido (Figura 2.4), além de uma manutenção reduzida, pelo que o factor qualidade na hora da escolha é uma questão decisiva.

A maior parte da responsabilidade reside nos fabricantes que cada vez mais tentam produzir LEDs com melhores características e que vão de encontro às expectativas dos clientes. Esta necessidade é quantificada, normalmente, em lumens por watt (lm/W); no entanto, existem mais factores que devem ser individualizados conforme a especificidade da aplicação. Esta secção pretende elaborar algumas considerações relativas às características dos LEDs que devem ser consideradas em qualquer projecto de iluminação.

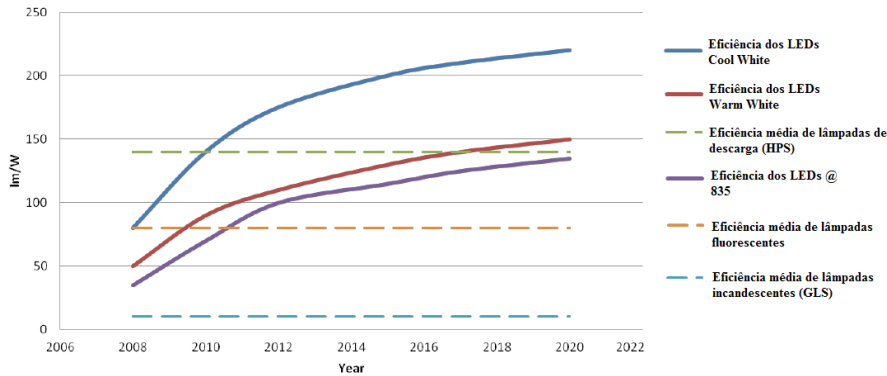


Figura 2.3: Previsão da eficiência de lâmpadas comerciais (adaptada de [55]).

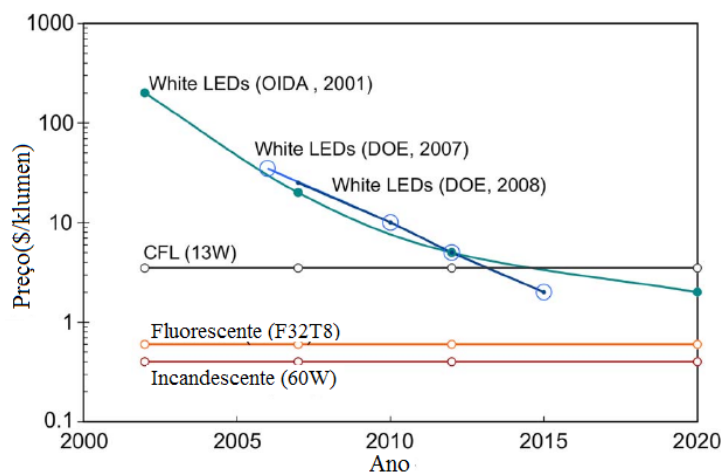


Figura 2.4: Previsão do custo por lumen (adaptada de [4]).

### 2.2.1 Características físicas

O LED é um diodo semiconductor com junção P-N, logo tem características de estimulação semelhantes às dos diodos normais (Figura 2.5). Da mesma forma, a denominação dos terminais de ambos é igual: ânodo (positivo) e cátodo (negativo). No entanto, ao contrário dos diodos normais, quando lhe é aplicada energia suficiente emite energia com comprimento de onda que corresponde a luz visível, produzindo um efeito denominado electroluminescência. É este efeito que torna o LED um elemento diferente dos demais diodos.

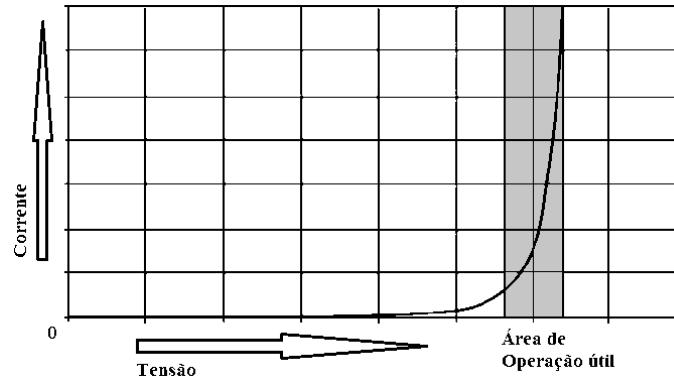


Figura 2.5: Resposta I-V típica de um diodo.

Os LEDs são dispositivos não-lineares, ou seja, a variação da tensão aos seus terminais não é proporcional à corrente. Por conseguinte, um LED, ao qual tenha sido aplicada uma tensão de polarização insuficiente, não vai entrar em condução comportando-se como um circuito aberto. Contudo, se a tensão continuar a aumentar e passar um certo limite, a condução de corrente (corrente de polarização) apresentada aumenta significativa e abruptamente. Nesta fase ocorre o estreitamento da barreira de potencial que favorece a recombinação. A nível atómico, quando ocorre a recombinação de um par electrão-lacuna há libertação de energia sob a forma de fotões. Assim, se a tensão de polarização continuar a aumentar, o LED, para além de emitir mais luz, também corre o risco de sobreaquecer e avariar permanentemente.

Da tabela periódica, os elementos básicos e mais comuns presentes nos materiais semicondutores são o germânio e o silício que, por serem muito opacos e emitirem mais calor que luz -necessitando de dissipadores-, não são os melhores elementos para utilizar em LEDs. Em contrapartida, noutros materiais do grupo III e V da tabela periódica acontece o contrário [42], ou seja, emitem mais fotões em detrimento do calor irradiado. Para além disso, a cor da luz emitida é determinada pela diferença de energia do material semiconductor, logo é possível obter várias cores dopando com outros materiais.

Uma última característica física diz respeito à área ocupada por um LED (alguns  $\text{mm}^2$ ). Devido ao espaço reduzido que ocupam são facilmente associáveis e integráveis em componentes ópticos.

### 2.2.2 Manutenção de lumens

Esta característica está fortemente relacionada com o facto das fontes de luz se

deteriorarem ao longo do tempo em que se mantêm ligadas. Outro factor importante associado a esta deterioração está relacionado com a flutuação de luminosidade que ocorre quando a temperatura varia. No caso dos LEDs, quanto mais frios forem maior brilho emitem. Nem todos os fabricantes publicam esta característica nos *datasheets* dos seus produtos por haver falta de acordo relativo a um *standard* de medição e publicação [56]. No entanto, os que publicam expressam esta característica através de uma percentagem de emissão de luz inicial após um determinado número de horas de funcionamento. Assim, esta característica é definida como o declínio da luminosidade produzida por uma fonte de luz ao longo do tempo.

### 2.2.3 CCT

As siglas CCT correspondem a *Correlated Color Temperature*, um importante aspecto de visualização de luminosidade. À medida que um corpo preto aquece, torna-se vermelho, laranja, amarelo, branco e, por fim, azul. CCT é uma forma de quantificar a luminosidade de uma fonte quando comparada com a dum corpo preto aquecido a altas temperaturas. Por este facto, é medido em Kelvins (K) e é caracterizado pela luz emitida e não pela cor dos objectos iluminados. Valores abaixo dos 3200K representam fontes semelhantes à das lâmpadas incandescentes, enquanto valores acima de 4000K são similares à luz do dia. A consistência da temperatura de cor ao longo da sua vida útil também é importante devido à uniformidade de aspecto. Hoje em dia, os sistemas baseados em LEDs já conseguem produzir luz branca na gama de CCTs tipicamente usados em iluminação geral, seja de interiores ou exteriores, assim como, adaptar a temperatura de cor [56].

### 2.2.4 CRI

CRI são as iniciais de *Color Rendering Index* e é definido como o índice de consistência de cor. Esta propriedade tenta caracterizar a percepção humana, de modo a que esta consiga identificar a cor correcta de um objecto. O CRI quantifica e compara a consistência de cor da fonte com uma fonte de referência com a mesma temperatura de cor, numa escala 0-100. Apesar de serem possíveis LEDs com CRI de 95, existem muitos outros com CRI na casa dos 80, no entanto, estes valores devem servir apenas como uma estimativa da eficiência real. Quanto maior o CRI, mais reais as cores vão parecer. Um CRI elevado é importante em aplicações que pretendem um aspecto natural, ou seja, ajuda a aumentar a claridade visual e ajuda a criar um ambiente de trabalho mais apelativo. O CRI tem algumas limitações técnicas que sobressaem quando LEDs brancos são avaliados, nomeadamente, o espectro de cor escolhido e os tipos de amostras de cor. Em alternativa, a avaliação visual subjectiva é o meio que inspira mais confiança na qualidade de cor adequada.

### 2.2.5 Estabilidade e uniformidade do Brilho

À medida que a eficiência dos LEDs e o número total de lumens aumenta, os projectistas são desafiados a desviar a luz em várias direcções sem provocar desconforto e visibilidade. Assim, as propriedades físicas de cada LED são cada vez mais importantes no sentido de proporcionar características mais estáveis e uniformes ao longo do tempo de vida útil. As variações dos processos de fabrico e a escolha pós-

produção permite a triagem dos LEDs baseado nas suas características: luminosidade, cromaticidade e, por vezes tensão de polarização.

Para além das propriedades físicas de cada LED, também as condições de operação podem afectar a consistência e constância do brilho. As mudanças inerentes à variação de temperatura podem resultar na aparição de cor. Adicionalmente, as características de cor podem mudar o LED à medida que estes envelhecem, devido à degradação do fósforo.

## **2.3 Iluminação**

Tal como referido anteriormente, o LED é uma fonte de luz baseada em semicondutores e que tem vindo a ser cada vez mais utilizadas no mercado global. Desde a descoberta oficial do primeiro LED, em 1962, um longo caminho foi percorrido.

O espectro da luz emitida, que se pensava ser apenas monocromática, afinal não o era. Na realidade, o primeiro LED emitia luz vermelha e, ao ser dopado com fósforo, radiou luz vermelha ou amarela, conforme as concentrações da material dopante. Com a ambição de obter todas as cores do espectro visível, foram encetadas novas experiências, usando vários tipos de materiais. Assim, através de métodos de dopagem de semicondutores cada vez mais sofisticados, resultaram LEDs que emitem a luz verde, azul, violeta e até ultravioleta.

O objectivo seguinte consistia na obtenção da luz branca, que era um passo importante, pois a ausência desta cor impedia o uso em muitas aplicações de iluminação geral. Assim, através de alguns passos extra na mistura de cores, a tão desejada luz branca foi alcançada [33]. O método consistia no uso de fósforo, de modo que este absorvesse luz azul ou ultravioleta e voltasse a emitir luz amarela [34]. Como o azul e o amarelo estão situados em lados opostos do espectro electromagnético, interferem, produzindo assim a luz branca. Outra possibilidade reside nos denominados LEDs RGB, que através do controlo de microcontrolador integrado, fazem a gestão de 3 'chips' (vermelho, verde e azul). Neste caso, a possibilidade de obter a maior parte das cores do espectro visível com um só LED resulta num preço elevado [53].

Historicamente, os LEDs tiveram poucas aplicações nos aparelhos electrónicos devido às suas próprias limitações. Hoje em dia, devido às melhorias significativas de produção e níveis de luminosidade cada vez mais altos, a utilização evoluiu para aplicações de consumo público, tais como iluminação geral (espaços fechados e ao ar livre), *displays* em telemóveis e televisões, luzes de presença na aviação e automóveis, *flash* em câmaras fotográficas ou projectores compactos.

Os desenvolvimentos atingidos com a descoberta do LED de cor azul foram fundamentais para o desenvolvimento da tecnologia LED. A consequente explosão da investigação em todo o mundo, rapidamente culminou na disponibilização *High-Brightness* LEDs (HB-LEDs) de cor branca comercializados principalmente por Nichia (Japão), Toyoda Gosei (Japão), Philips Lumileds (E.U.A.), Cree (E.U.A.), e OSRAM (Alemanha) [53]. Uma das razões principais que tornaram a utilização de HB-LEDs como elementos preferenciais em sistemas de iluminação é a melhoria da eficiência relativamente a outros tipos de lâmpadas tradicionais (Figura 2.3).

Com a introdução nos mercados de um maior número de LEDs, torna-se necessário perceber as diferenças entre eles. Desde já, pode-se considerar a existência

de dois grupos: os ditos LEDs normais e os LEDs de última geração, que conseguem alcançar níveis de luminosidade e brilho mais elevados. Dentro destes últimos, ainda existem dois tipos de LEDs que não devem ser confundidos: *High-Power* LEDs (HP-LEDs) e HB-LEDs. Geralmente é assumido que um HP-LED consome mais de 5 Watts de potência, enquanto os HB-LEDs produzem valores superiores a 50 lumens.

### 2.3.1 Tipologia de Controle

Uma das principais características dos LEDs e das lâmpadas convencionais reside no facto de permitir o controlo de luminosidade (também denominado *dimming*) por intermédio de sinais PWM. Nesta subsecção são apresentadas as soluções básicas que permitem alcançar esse controlo.

As configurações apresentadas na Figura 2.6 resultam da necessidade de impor uma tensão  $V_M$ , de modo a forçar uma corrente na resistência e, conseqüentemente, no LED. A corrente no LED pode ser calculada através da eq. 2.1. Por conseguinte, o *dimming* do(s) LED(s) pode ser atingido através do controlo ON/OFF do transistor.

$$I_{LED} = \frac{V_M - V_{BE}}{R} \quad (2.1)$$

Na Figura 2.6i), o sinal  $V_M$  não é mais que um sinal PWM com *duty-cycle* variável que provoca uma comutação rápida imperceptível ao olho humano. Esta solução, consegue assim, manter a temperatura do LED, pois a corrente máxima imposta no LED é fixa, no entanto, necessita de LEDs com grande largura de banda.

A configuração da Figura 2.6ii) é semelhante à referida anteriormente, no entanto, a função é completamente distinta: tenta impor uma corrente no LED proporcional ao nível de luminosidade pretendido. O PWM é aplicado a um FPB, cuja frequência de corte é, no máximo, metade da frequência do PWM. O sinal resultante é um sinal DC proporcional ao *duty-cycle* do PWM. Esta solução permite níveis de luminosidade ajustáveis, no entanto, caso o espectro emitido varie significativamente com a corrente DC, pode ocorrer a indesejável variação de temperatura de cor (CCT).

### 2.3.2 Importância do controlo de iluminação

É reconhecido que o domínio da iluminação pode melhorar o conforto pessoal, aumentar a produtividade dos ocupantes, aumentar a esperança de vida da luminária e poupar muita energia. O controlo é atingido forçando o LED a operar à corrente nominal

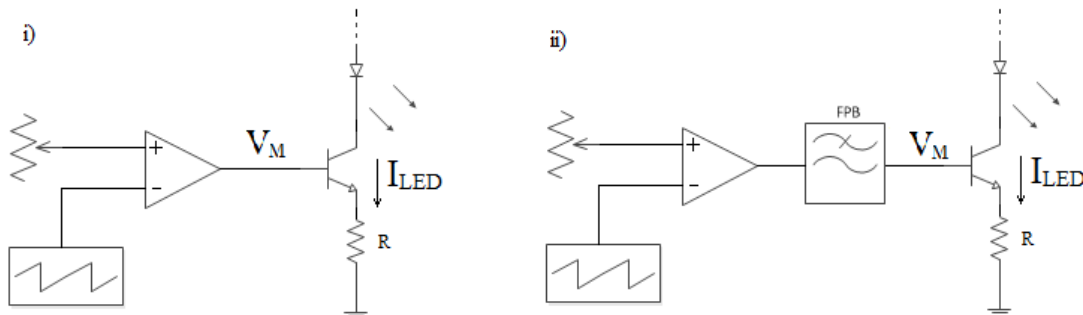


Figura 2.6: *Dimming* PWM e DC.

e desligar-se a uma grande velocidade, sendo que a média de luminosidade é proporcional ao tempo que o LED está activo. Relativamente a este assunto, será apresentada, nas secções 2.3.2 e 2.4.1, uma descrição mais pormenorizada. É um tema conhecido, mas frequentemente esquecido quando aparecem novas tecnologias.

A peça fundamental neste problema são as exigências dos consumidores, isto é, esperam que a sua fonte de luz actue como a antiga que usaram nos últimos 100 anos e, como tal, ambicionam dois aspectos fundamentais: a cor e o ambiente criado pelo controlo. Comercialmente, a luz artificial permite o aumento de produtividade do ser humano. Alguns fabricantes de LEDs perceberam a importância da cor de temperatura perfeita e estão a usar a tecnologia para obter a cor exacta pretendida pelos consumidores. No entanto, os mesmos fabricantes estão mais preocupados com a luminosidade que atingem do que com o resultado do controlo.

Indiscutivelmente uma das técnicas de poupança energética é precisamente o desligar das lâmpadas na ausência de pessoas, que também pode ocorrer durante a ocupação se existir algum tipo de controlo. Este controlo pode ser manual, através de ajustes de luminosidade dos ocupantes, ou automaticamente por intermédio de sistemas inteligentes que fazem monitorização da luz solar. Independentemente da técnica utilizada, vai ocorrer poupança de energia, no entanto, se for contabilizado apenas a resultante do controlo, a poupança energética, sem perda de conforto, é em média 20-30% superior. Contudo, devido às capacidades visuais e de conforto serem diferentes de um indivíduo para outro, a optimização ainda tem um longo caminho a percorrer.

### 2.3.2.1 Termos críticos

Tal como em todas as tecnologias, há sempre vantagens, desvantagens e pontos de maior discussão. Um desses pontos, quantificado por percentagem, diz respeito à comparação entre a luminosidade medida por um aparelho e a luminosidade pressentida pelas pupilas dos utilizadores que se dilatam, se os níveis de luz forem baixos. Este valor é calculado através da raiz quadrada da luminosidade verificada pelo aparelho de medida [3].

Se a voltagem à qual a fonte de luz inicia a operação é superior à voltagem para a qual o LED for projectado, as luzes aparecerão subitamente. O significado desta ocorrência significa que quando os LEDs têm um nível de luz baixo ou estão desligadas, as luminárias só se ligarão quando a curva do *dimmer* sobe rapidamente provocando um efeito denominado *pop-on*.

Se a voltagem à qual a fonte de luz deixa de funcionar é superior à voltagem para a qual o LED for projectado, a fonte de luz desliga-se antes do *dimmer*. Ou seja, as luzes apagar-se-ão antes da curva do *dimmer* atingir o pico negativo da fase descendente. Este efeito é denominado *drop-out*.

Um efeito bastante visível ao olho humano e comum é o *flickering*, piscar rápido em português, que ocorre inesperadamente, fruto da modulação da luz. Pode ser causado por muitos factores, tais como: ruído de linha, ruído de controlo, ruído de circuito, tolerância dos componentes e desenho do circuito. O efeito pode ser permanente, ocorrendo a toda a hora, ou intermitente se ocorrer aleatoriamente no tempo.

As expectativas de comportamento, baseadas no conhecimento público do *dimming* incandescente, denominam-se suave e contínuo. Um ajuste no controlo deve

ser reflectido proporcionalmente numa variação igual no nível de iluminação. Não deve haver mudanças abruptas no nível de luz, enquanto a fonte de luz está a ser controlada.

Por fim, a viagem morta (*dead travel*) define-se como a quantidade de mudança no controlo, antes que haja mudança na fonte de luz.

### 2.3.3 *Driver de Corrente*

Inúmeras empresas, que fazem da sua actividade principal a iluminação, estão cada vez mais inseridas em negócios mais especializados, relacionados com os avanços e oportunidades criadas pelos LEDs. Os LEDs criaram vários desafios ao nível do redesenho de novas aplicações de iluminação assim como adaptam as antigas baseadas nas lâmpadas tradicionais. Um dos maiores desafios é o *driver* do LED.

O diodo, tal como o LED, não pode receber tensão directamente aos seus terminais uma vez que a corrente deve ser limitada para que a junção não seja danificada. Geralmente, é usada uma resistência em série com o LED de modo a limitar a corrente.

A tensão de polarização é dependente do comprimento de onda emitido. Por exemplo, os LEDs infravermelhos geralmente funcionam com menos de 1.5V, os vermelhos com 1.7V, os amarelos com 1.7V ou 2.0V, os verdes entre 2.0V e 3.0V, enquanto os LEDs azuis, violeta e ultra-violeta geralmente precisam de mais de 3V. A potência necessária está na faixa típica de 10 a 150mW no caso dos LEDs normais e 1-5W nos restantes, com um tempo de vida útil superior a 50.000 horas. Por tal, os LEDs necessitam de correntes ajustadas às suas características eléctricas.

Os LEDs admitem também sistemas de suporte de tensão variável e tensões de polarização variáveis, que podem causar oscilações no brilho e cor dos LEDs. Desta forma, de modo a evitar essas indesejáveis variações e independentemente do tipo, tamanho ou potência, todos os LEDs funcionam melhor com uma fonte de corrente constante com pequenas variações na corrente de *drive*.

Na presente conjectura, podem ser adquiridos no mercado *drivers* de LED de várias companhias tais como a *Philips Advance*, *LED Dynamics*, *Meanwell* ou *Magtech*. Podem ser usadas fontes de alimentação de 230V AC para iluminação geral, enquanto as de 12 e 24V DC são usados para subsistemas. Comprar um *driver* de LEDs pode ajudar rapidamente no desenho, mas também vai resultar em custos adicionais do produto final. Como não existem *standards* definidos para esta indústria, é importante verificar se as especificações do LED são iguais às do *driver*, correndo o risco de perder eficiência, o que resulta na impossibilidade de oferecer ao cliente a poupança de energia oferecida pelas soluções LED.

Resumindo, um *driver* de LED é um dispositivo electrónico autónomo que regula a potência de um ou mais LEDs. A diferença relativa às fontes de energia convencionais reside no facto do *driver* LED responder às necessidades do(s) LED(s), fornecendo uma quantidade constante de corrente à medida que as propriedades eléctricas variam com a temperatura. O desafio consiste em que o *driver* LED seja bem controlado, programável, com fonte de corrente constante e alta eficiência.



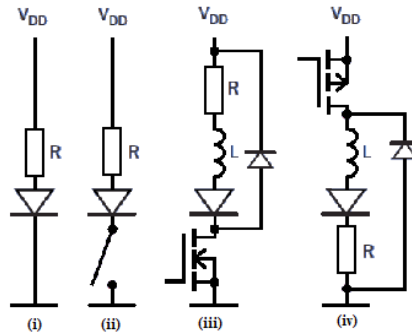


Figura 2.7: Topologias de *drive* de LEDs.

### 2.3.3.1 Topologias de Drive

Existem várias formas de controlar LEDs, no entanto, só as topologias apresentadas na Figura 2.7 são referidas, por se considerar que as restantes variações são versões mais complexas e melhoradas das referidas na imagem.

Tal como foi referido no ponto anterior, a maneira mais simples de fazer o *drive* de um LED é colocar uma resistência em série com o LED (Figura 2.7i). Para calcular o valor da resistência usa-se (eq. 2.1), onde  $V_{DD}$  é a tensão disponível,  $I_F$  é a corrente de polarização do LED e  $V_F$  é a tensão de polarização.

$$R = \frac{V_{DD} - V_F}{I_F} \quad (2.2)$$

Como tal, esta solução é uma aproximação linear, pois é necessário uma fonte de tensão e tensão de polarização constantes, de modo a obter corrente constante. Como a temperatura e  $I_F$  variam com  $V_F$  torna-se necessário minimizar este efeito, aplicando um  $V_{DD}$  mais alto. Esta solução, no entanto, cria perdas energéticas significativas, reduzindo ainda mais a eficiência.

Resumindo, a topologia tem a vantagem de ter um baixo preço, facilidade de implementação e não gera ruído originado pela transição de estados. Tem a desvantagem de ter uma eficiência reduzida, devido às perdas significativas na resistência e a impossibilidade de variar a luminosidade consoante as necessidades visuais. Assim, de modo a melhorar, foi criada outra versão apresentada na Figura 2.7ii. Esta configuração permite que o controlo de luminosidade seja efectuado através de um simples controlo de corrente.

O esquema da Figura 2.7iii representa um interruptor *low-side*, cujo comportamento é similar a um conversor tipo *boost*. O interruptor foi substituído por um MOSFET tipo N, que, quando está ON, permite que a bobina armazene energia, e que, quando está OFF, a liberte. A resistência R permite que seja imposta a corrente de *drive*, enquanto o diodo resulta da necessidade da corrente percorrer um caminho quando o interruptor está OFF. Trata-se de uma configuração barata e acessível, pecando apenas pela necessidade de haver controlo da voltagem através de R, para extrair corrente através do LED.

A topologia da Figura 2.7iv é similar à referida anteriormente com a diferença que o interruptor está na parte superior do esquema e, por isso, é denominado interruptor *high-side*. O funcionamento é semelhante a um conversor *buck* e tem a

vantagem de a corrente ser imposta directamente através de R, não necessitando de controlo de tensão.

### 2.3.4 Associação de LEDs

A evolução tecnológica dos LEDs já permitiu grandes avanços em termos de luminosidade disponibilizada, todavia, ainda não atingiu o nível necessário que permita que essa luminosidade seja emitida apenas por apenas um LED. Por conseguinte, é forçoso associar LEDs de modo que estes atinjam o nível desejado de lumens. Além disso, como os LEDs têm um tamanho reduzido, a associação de vários LEDs resulta num espaço ocupado reduzido. Assim, existem três maneiras básicas de associar LEDs: série, paralelo, série/paralelo, cujas vantagens e desvantagens são apresentadas de seguida.

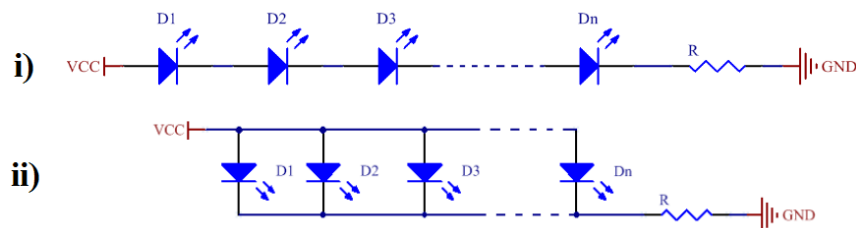


Figura 2.8: Associação de LEDs em série (i) e em paralelo (ii).

Na Figura 2.8i), está representada a associação em série de LEDs. Esta representação traz várias vantagens: todos os LEDs são percorridos pela mesma corrente, o que permite estabilizar o CCT e o CRI; verifica-se alta eficácia, pois não é necessário ajustar a resistência R; os LEDs estão protegidos contra defeitos que provoquem o curto-circuito; por fim, apresenta-se ideal para controlo da corrente de polarização, através do PWM. Esta configuração, no entanto, tem desvantagens. A que ressalta mais à vista diz respeito à avaria de um LED, que força os restantes a desligarem-se o que, no caso de serem muitos, torna-se também num pesadelo em termos de manutenção. Outra desvantagem diz respeito ao *driver* do LED, que é tão mais caro quanto maior for o número de LEDs, pois necessita muita potência:  $P=(N \cdot V_F + V_R) \cdot I_F$ .

Na Figura 2.8ii) está representada a associação de LEDs em paralelo. A análise da figura permite concluir que é um circuito protegido contra o circuito aberto, em caso de falha de um dos elementos. Também permite *drivers* mais baratos por não necessitarem de potências elevadas para pôr em funcionamento. Esta configuração, no entanto, não possibilita o controlo da corrente de polarização, tem eficácia baixa e torna-se instável quando um dos LEDs deixa de funcionar. Consequentemente a corrente vai ser redireccionada para os restantes LEDs, aumentando a corrente que os atravessa e diminuindo o seu tempo de vida. Significa isto que, havendo mais que uma avaria, a sobrecarga nos restantes poderá conduzir a uma ruptura total do circuito.

Na tentativa de resolver os problemas citados nas configurações anteriores, foi projectada uma associação mista representada na Figura 2.9. Esta configuração resolve os problemas de circuito aberto ou curto-circuito e tem a possibilidade de fazer o *drive* a um grande número de LEDs. No entanto, continua a não ser possível controlar a corrente de polarização e a eficácia continua a ser baixa, devido às perdas resultantes da resistência.

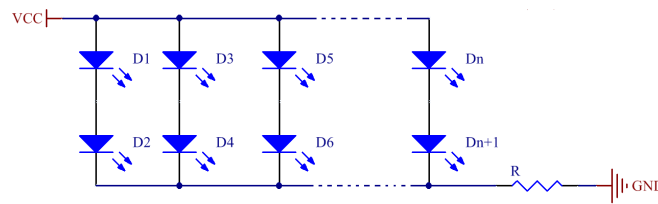


Figura 2.9: Associação de LEDs série/paralelo.

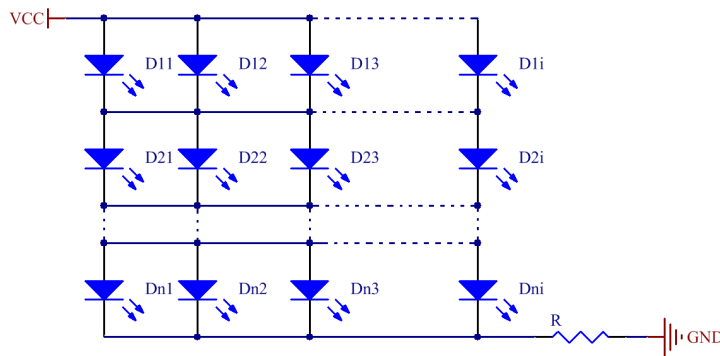


Figura 2.10: Associação de LEDs em matriz.

Por fim, a associação em matriz, representada na Figura 2.10, permite resolver a maior parte dos problemas referidos nas configurações anteriores: consegue fazer o *drive* de um grande número de LEDs, altamente eficaz; consegue controlar a corrente de polarização e o *dimming PWM* (quando a corrente do *driver* do LED está a ser usada); e tem protecção contra riscos de curto-circuito, assim como circuito aberto. A maior desvantagem diz respeito à complexidade da placa de circuito impresso no qual os LEDs são instalados.

### 2.3.5 Esperança de vida

O tempo de vida é frequentemente utilizado como factor comparativo relativamente a outras lâmpadas, por resultar em poupanças directas na substituição. Existem inúmeros factores que afectam o tempo de vida do LED, portanto, identificando-os, mais facilmente é assegurada a protecção do LED de situações adversas que resultam em menor manutenção. Esta subsecção pretende enumerar algumas dessas situações. A fonte de alimentação necessita de estar em sintonia com o LED, no sentido de ambos alcançarem um tempo de vida óptimo. Para além de a voltagem ser regulada, a corrente deve ser controlada de modo a assegurar que o LED não está a ser percorrido por uma corrente acima do recomendado.

As condições gerais, tais como a vibração, as temperaturas extremas (mesmo quando não estão em funcionamento), colocam muita pressão nas partes mecânicas do díodo, reduzindo o seu tempo de vida. Idealmente, o LED deve operar, sempre que possível, em espaços secos e estáveis. Quando estas condições não são possíveis, deve ser previsível a diminuição do tempo de vida.

Também pode ocorrer que, devido a restrições orçamentais, não haja a gestão mais eficaz da temperatura, sendo que, nestes casos, deve ser tomada uma decisão no sentido de balancear entre a esperança de vida e o custo do LED.

Existem excepções em que a luminosidade é mais importante que o tempo de vida. Nestes casos, pode ser possível forçar o LED a actuar acima da sua corrente

nominal, o que, neste caso em particular resulta numa redução drástica do tempo de vida do LED.

Alguns destes problemas podem ser resolvidos se forem antecipados durante a fase de projecto: colocando lâmpadas que disponibilizam maior luminosidade que o necessário e a funcionarem a uma corrente nominal mais baixa, permite-se o ajuste da corrente de modo a compensar a degradação, ao mesmo tempo que se poupa energia.

### 2.3.5.1 Factores Térmicos

Um dos maiores problemas referidos anteriormente, que pode diminuir o tempo de vida de um LED, é a temperatura. O excesso de temperatura reduz substancialmente o tempo de vida, portanto, de modo a prevenir que esta situação ocorra, devem haver elementos incluídos no LED que previnam o aumento significativo da temperatura. A Figura 2.11 representa a esperança de vida em função da temperatura ambiente de um LED LM-80 da empresa de fabricação Cree. A sigla L70, definida para iluminação geral, refere-se ao ponto, a partir do qual, a luminosidade é 70% da inicial.

Assim, deve ser assegurado que o calor é efectivamente removido do próprio semiconductor, ou seja, evitar que a temperatura da junção do LED aumente significativamente. É certificar-se que o encapsulamento térmico do LED está vinculado ao suporte no qual é montado. A resistência térmica deve ser a mais baixa possível, podendo usar-se substâncias condutoras de modo a assegurar o contacto completo.

De modo a que o calor possa ser removido eficazmente do conjunto de todas as partes constituintes do LED, é necessário um bom dissipador externo com pouca resistência térmica de forma a que o calor se disperse rapidamente. No caso de iluminação por intermédio de LEDs, este é um factor importante, porque, muitas vezes, as lâmpadas estão localizadas em pequenos espaços, o que não ajuda ao arrefecimento, diminuindo assim a esperança de vida do LED.

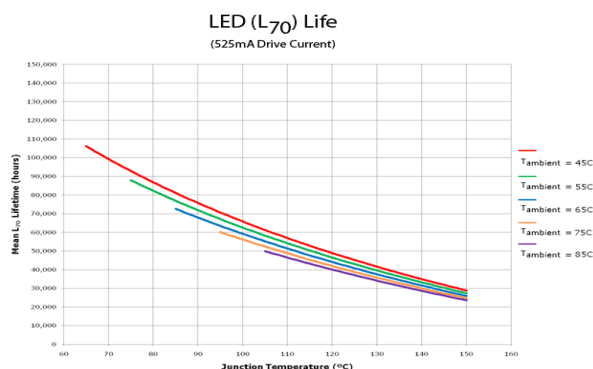


Figura 2.11: Esperança de vida média de um LED vs Temperatura da junção.

## 2.4 Comunicação por luz visível

Fruto das necessidades energéticas actuais e da procura de soluções alternativas para reduzir o consumo de electricidade através de respostas mais eficientes, a tecnologia VLC tem recebido alguma atenção que, infelizmente, está confinada maioritariamente à investigação. Originalmente, o estudo foi iniciado no Japão que antevendo as possibilidades desta tecnologia criou o *Visible Light Communication Consortium* (VLCC) [51] com o intuito de investigar, fomentar e sensibilizar possíveis

parceiros económicos (produtores de electricidade, fabricantes de luminárias e consumidores). O interesse tem aumentado rapidamente nos últimos anos um pouco por todo o mundo, onde o *Wireless World Research Forum* (WWRF) [48] tem trabalhado nesta área, assim como o *Optical Wireless Communications – An Emerging Technology (OPTICWISE)* em exercício desde 2011 [52].

O VLC faz um reaproveitamento da energia utilizada para iluminação e comunicação simultâneas. A luz visível, ao contrário da RF e IR, não é sujeita a legislação, pois é inofensiva ao ser humano, podendo ser utilizada sem restrições em qualquer aplicação desde que tecnologicamente possível. Além disso, a largura de banda disponível é bastante superior à RF.

A comunicação é feita através da modulação da intensidade da luz visível a frequências altas. Consoante a corrente que percorre a luminária, obtêm-se variações de brilho imperceptíveis ao olho humano, mas visíveis a um receptor óptico electrónico, munido com a melhor resposta possível no espectro de luz visível. Resumindo, a transmissão e recepção por luz visível estão dependentes do campo de visão *line of sight* (LOS – campo de visão) [24]. Esta característica impossibilita a comunicação através de superfícies rígidas e opacas, tornando-a perfeita para aplicações com restrições de segurança. Existe também a possibilidade da criação de redes de comunicação sem fios com equipamento simples.

Conceptualmente, todas as lâmpadas convencionais, podem ser utilizadas para comunicação por luz visível, no entanto, apenas as incandescentes estão postas de parte por razões técnicas. Apesar de haver sistemas inteligentes que usam comunicação por luz visível através de lâmpadas fluorescentes [30], as desvantagens relativamente aos LEDs são demasiado grandes para serem vistas como alternativa. Devido à eficácia, rápida velocidade de transição, taxa de transmissão e controlo por PWM, os LEDs apresentam-se como os elementos perfeitos para esta tecnologia.

#### 2.4.1 Circuito conceptual

Tendo em conta que os *drivers* podem ter mais que um canal para controlo separado do conjunto de LEDs, as duas configurações da Figura 2.6 são complementares. Ou seja, sobrepondo os dois sinais, um sinal dominante ( $I_{DC}$ ) e um sinal de menor magnitude com pulsos de informação ( $I_S$ ), pode-se atingir o objectivo da iluminação e comunicação simultânea tal como representado na Figura 2.12.

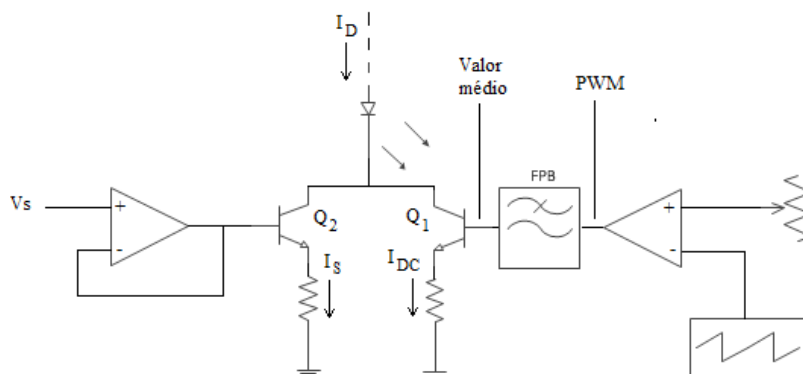


Figura 2.12: Circuito conceptual de comunicação VLC.

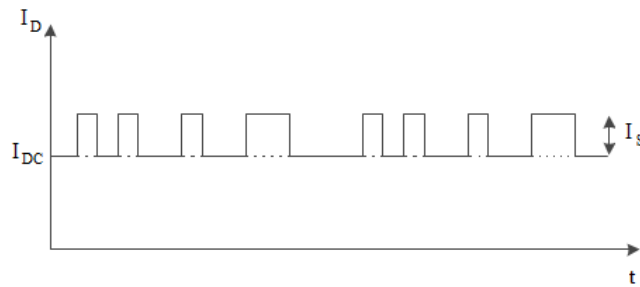


Figura 2.13: Forma de onda da corrente do LED expectável.

O transístor  $Q_1$  controla a corrente DC nos LEDs, enquanto o  $Q_2$  deve ser um transístor rápido de forma a comutar os LEDs consoante o sinal. Como  $I_D$  é o somatório dos dois sinais referidos anteriormente, o resultado da soma das formas de onda é expresso na Figura 2.13.

### 2.4.2 Considerações complementares

Alguns dos elementos que fazem parte de um sistema VLC são óbvios (LEDs, *driver* do LED, regulador de tensão). Convém relembrar que o sistema, quando for projectado, deve ter capacidade para fornecer mais iluminação que o necessário, pois as luminárias perdem eficácia ao longo do seu tempo de vida e, por este facto, deve ser possível compensar essa característica que também afecta a comunicação.

Existem outros elementos que adicionados tornam a gestão e comunicação mais facilitada. Neste aspecto, consideram-se o sensor de luminosidade e o microcontrolador como partes fundamentais de um sistema VLC.

As luminárias dispostas no espaço devem estar distribuídas de forma a obter uma iluminação constante. No caso de VLC, as luzes LED percorrem espaços distintos provocando assim atrasos de propagação, o que causa interferência intersimbólica [24]. Assim, os emissores devem transmitir o mesmo sinal simultaneamente.

Ao contrário da comunicação sem fios óptica, na tecnologia VLC, a interferência intersimbólica depende apenas da taxa de transmissão e do campo de visão do receptor já que o emissor pode ter um ângulo até  $180^\circ$  de irradiação de luz [24].

### 2.4.3 Aplicações presentes e futuras

A evolução que a tecnologia VLC atingiu nos últimos 10 anos, impulsionada pelos avanços tecnológicos dos LEDs, resultou no desenvolvimento de variadas aplicações e projectos-piloto que serão apresentados seguidamente.

Do Japão, surge um projecto que utiliza tecnologia de sensor de imagem para memorizar fotografias através de luz LED, enquanto um receptor detecta a intensidade óptica do *pixel* onde a luz LED está focada. Este sistema, para além de ter um grande raio de acção (2km), é insensível a interferências e permite a coabitação de múltiplos utilizadores [17].

A *Infrared Data Association* (IrDA), localizada na Califórnia (E.U.A.), e o VLCC, localizado em Tóquio (Japão), trabalharam em parceria num projecto LAN baseado em VLC, usando camadas protocolares IrDA. O resultado foi uma transmissão de 100Mbps em full-duplex a distâncias inferiores a 3m [17].

Na área da segurança, foi desenvolvido um sistema denominado 'Farol, usando

VLC', que permite que um barco, munido de um sensor de imagem, desmodule os dados enviados pelos faróis e bóias. O resultado é apresentado num monitor dentro de cada barco presente no raio de acção [17].

Na área de transportes, o projecto VIDAS, realizado no Instituto de Telecomunicações de Aveiro (Portugal), utiliza controlo centralizado através de luz comunicante para o *Intelligent Transport System* (ITS) e *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS). Coloca HB-LEDs em semáforos de modo a disseminar informação, evitar colisões ou funcionar como sistema de navegação [26].

Outra aplicação interessante, desenvolvida em parceria pela NEC e a *Matsushita Electric Works*, resultou num protótipo que consistia num serviço de comunicação global em ambientes fechados. Este equipamento foi utilizado numa cadeia de supermercados e consistia em monitorizar o movimento dos seus clientes dentro das suas instalações. O identificador de luzes LED, colocado estrategicamente no fundo de um carrinho de mão permitia ser identificado à medida que percorria certas passagens com transmissores [17]. Através deste método, os proprietários conseguem monitorizar os movimentos dos clientes e desenvolver estratégias que permitam aumentar as vendas.

Por fim, foi demonstrado que era possível comunicar por voz a uma profundidade de 30m debaixo de água. Os sinais são transmitidos através de VLC por intermédio de uma lanterna e recebidos por um fotodetector nele incorporado. Este produto está planeado que entre no mercado em 2011 [21].

### ***Em Conclusão....***

A evolução tecnológica, que já ocorreu e que se espera que ainda venha a ocorrer ao longo dos próximos anos, identifica o LED como a lâmpada do futuro, assim definida por inúmeras previsões. As características dos LEDs tornam-nos elementos perfeitos para comunicação por luz visível devido, entre outras, a uma grande velocidade de *switch*.

A tecnologia VLC ainda tem um caminho longo pela frente. No entanto, tendo em conta projectos existentes, pode-se tornar uma tecnologia viável e *standard* em muitas aplicações. O reaproveitamento energético e as taxas de transmissão de alguns Mbps permitem encarar o VLC como uma alternativa viável (consoante as aplicações e os meios físicos) às tecnologias convencionais.

## **CAPÍTULO III**

### **3 Sistemas de Iluminação Comerciais**

Quando se pretende iniciar um novo projecto com o intuito de o introduzir no mercado, é necessário constituir uma base de sucesso, que consiste essencialmente em dois factores: adaptação ao mercado e diferenciação relativamente aos produtos já existentes.

A adaptação ao mercado obriga à constante actualização ou melhoramento de produtos, assim como à monitorização de novos sistemas que podem tornar os antigos obsoletos. Compete a cada empresa analisar em que sentido o produto a introduzir encaixa nas necessidades do consumidor final, e adaptar-se de acordo com essas necessidades.

As empresas tendem a aproximar os seus produtos ao melhor dos produtos já inseridos no mercado. E a concorrência é muito subjectiva devido essencialmente à variedade e quantidade de produtos de empresas existentes. A diferenciação através da inovação é então fundamental como factor de desenvolvimento e de competitividade, pois coloca a fasquia mais alta. A inovação deve ter como prioridade a qualidade do produto ou serviço prestado que se deve basear na adaptabilidade, fiabilidade e robustez. Pode incluir a associação de produtos e tecnologias já existentes a preços



competitivos, assim como, a introdução de novas tecnologias. Compete a quem inova e produz demonstrar a mais-valia do seu produto, de modo a convencer o consumidor final que as características que o tornam diferente também o tornam melhor relativamente à concorrência.

Este capítulo visa o estudo de soluções de controlo de iluminação em edifícios já existentes no mercado. Permite também uma abordagem ao mesmo no sentido de traçar objectivos comerciais, de modo a que o produto proposto seja uma opção no mercado a curto/médio prazo em termos de inovação, gestão de energia e de relação qualidade/preço.

### **3.1 Factores Condicionantes**

Devido ao estilo de vida moderno, o ser humano passa muito tempo do seu dia em espaços interiores, o que faz com que a quantidade e qualidade de luz nestes espaços seja de extrema importância. Os aspectos quantitativos da iluminação natural nos edifícios dependem das condições climáticas, das características físicas dos edifícios, dos espaços e dos materiais de revestimento interiores. Para além dos aspectos relacionados com a expressão quantitativa da iluminação natural, (que tem essencialmente que ver com a garantia de uma iluminação suficiente para a realização das tarefas visuais) há ainda que referir os factores adicionais relacionados com os aspectos qualitativos que regulam o encandeamento, a atenção e a distração e que se manifestam no conforto visual dos ocupantes. Esta secção pretende enumerar os factores mais relevantes que condicionam um sistema de iluminação inteligente.

#### **3.1.1 Iluminação Natural**

Nos dias de hoje, torna-se imperativo o aproveitamento máximo de todos os recursos naturais ao nosso dispor, sejam eles usados para produção de energia ou para obtenção de índices mais elevados de eficiência energética. Por conseguinte, se houver disponibilidade de luz natural esta deve ser usada; no entanto, é determinante que seja suficiente, pois a exposição prolongada em espaços mal iluminados pode ser nociva à saúde dos utilizadores. Também em termos biológicos, a luz natural pode garantir uma sensação de bem-estar e um maior relacionamento com o ambiente em que estamos envolvidos, permitindo simultaneamente níveis elevados de produtividade e relaxamento (Figura 3.1).

Numa primeira análise, a iluminação natural disponível no interior dos edifícios



Figura 3.1: *City Plaza*, Hong Kong

está dependente da disponibilidade de luz natural total no exterior. Esta disponibilidade está dependente da nebulosidade do céu, período do dia e do ano, posicionamento e número de entradas de luz. As condições climatéricas e o posicionamento global (dependente da latitude a que estão localizadas) constituem os aspectos mais condicionantes das condições de conforto ambiental no interior dos edifícios por diminuir a luminosidade que penetra no espaço. Outro aspecto está relacionado com objectos situados no exterior que impedem um maior aproveitamento como, por exemplo, edifícios e árvores.

O papel fundamental da iluminação artificial consiste em proporcionar um ambiente visual interior adequado, compensando a falta de luz natural. Considera-se que esse ambiente luminoso é adequado quando permite assegurar as necessidades de conforto visual e quando permite a execução das diferentes tarefas visuais que tenham lugar nos espaços interiores.

### 3.1.2 Ergonomia dos Espaços

Para além dos factores referidos anteriormente, condições de iluminação adversas (fraca restituição de cores e/ou luz não uniforme) podem mesmo levar o indivíduo a situações stressantes e potencialmente perigosas. Dois factores determinantes da iluminação de um espaço é a uniformidade da iluminação e o posicionamento espacial de obstáculos da área a iluminar.

Qualquer projecto de iluminação de edifícios implica necessariamente a divisão do espaço útil disponível. A caracterização de cada espaço e a definição das necessidades em termos de iluminação requerem planeamento no sentido de atender às necessidades dos utilizadores. Esquecendo momentaneamente as condições referidas em 3.1.1, o número de luminárias necessário à iluminação de uma divisão é proporcional ao espaço que se pretende iluminado, o que significa que é perfeitamente distinto iluminar uma divisão com uma área de 10m<sup>2</sup> ou uma divisão com uma área 3 ou 4 vezes maior. Assim, quanto maior for a área a iluminar, mais luminosidade é necessária, e, logo, mais lâmpadas são necessárias de modo a manter os níveis de luz adequados.

A estrutura de um espaço implica, muitas vezes, a existência de obstáculos à propagação de luz, isto é, a divisão em causa pode ter obstáculos intrínsecos como pilares, escadas ou abertura/fecho de portas (Figura 3.2). O próprio espaço a considerar pode não ser geometricamente perfeito e necessitar de ajustes através da inclusão de um maior número de lâmpadas. Posteriormente, podem ser inseridos outros obstáculos por



Figura 3.2: Vista do interior da Livraria do *Orchard Learning* em Selly Oak.

razões estéticas, tais como plantas ornamentais, como se mostra a Figura 3.1.

Para além do grau de obstruções exteriores, das características geométricas do edifício e dos espaços, existem outros motivos relacionados com os materiais usados. Existem materiais com características superficiais reflectoras, como o alumínio, azulejo, madeira e vidro. No caso particular do vidro, vulgarmente coexistem no mesmo ambiente com dimensões e características espectro-fotométricas diferentes.

### **3.1.3 Regulamentos e Normas**

O Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE) veio definir um conjunto de requisitos aplicáveis a edifícios de serviços e de habitação dotados sistemas de climatização e de iluminação. O RSECE define clara e objectivamente aspectos relacionados com a envolvente dos espaços e da limitação dos consumos energéticos, assim como a eficiência e manutenção dos sistemas de climatização dos edifícios.

A Comunidade Europeia aconselha a utilização de tecnologias eficientes em termos energéticos. A nível europeu, e no âmbito da directiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios, foram criadas normas que definem procedimentos de estimativa de iluminação necessária em edifícios, além de definirem também a metodologia para obter um indicador numérico de performance. A Norma Europeia EN 15193 (“Desempenho energético dos edifícios - Exigências de energia para iluminação”) e a norma EN 15232 (“Eficiência energética de edifícios - Efeitos da automação e da gestão de edifícios”) estão a afirmar-se como normas importantes para definição de sistemas de iluminação energeticamente eficientes.

A norma EN 15193 dá orientação sobre técnicas que medem a energia usada na iluminação e que dão resposta periódica no que concerne à eficácia do controlo de luminosidade [1]. A metodologia da estimativa de energia fornece indicadores numéricos, assim como dados relativos à performance do aquecimento e refrescamento da energia total combinada no edifício. A utilização do *standard* de iluminação correcto é de extrema importância e a convenção e procedimentos assumem que os esquemas de iluminação (projecto e instalação) estão conforme as boas práticas.

O modelo EN 15232 descreve métodos de avaliação de influência da automação e gestão técnica de edifício, no que diz respeito ao consumo de energia em edifícios [2]. Quatro classes de eficiência, de A (Alta Eficiência) a D (Eficiência nula) foram introduzidas com esse objectivo em mente. Depois de um edifício ter sido equipado com automação e sistemas de controlo, uma destas classes é-lhe atribuída. As poupanças potenciais de energia térmica e eléctrica podem ser calculadas para cada classe, baseadas no tipo de edifício e na finalidade do mesmo. Os valores de energia de classe C são usadas como referência para comparação da eficiência energética.

## **3.2 Factores de Eficiência**

Definem-se como factores de eficiência todas as variáveis que contribuem para uma melhoria do sistema, quer a nível energético, quer a nível de desempenho [54]. Nestes sistemas de iluminação em particular, podem ser definidas três camadas: detecção, comunicação e gestão. No respeitante à detecção, a sua função é adquirir dados localmente. No que concerne à comunicação, a sua missão é caracterizar o meio

físico por onde os dados são transferidos. Por fim, relativamente à gestão, o objectivo é receber, processar os dados e tomar decisões relativamente à actuação no sistema.

### **3.2.1 Camada de Detecção**

Não é possível falar em controlo de luminosidade ou gestão de recursos se a respectiva unidade de controlo não tiver informação que lhe permita tomar decisões. Essa informação é obtida através de sensores, tendo cada um a sua função específica, isto é, se for pretendido medir a luminosidade num espaço, devemos utilizar um sensor específico para esse efeito.

Esta dissertação não inclui uma discussão aprofundada sobre os vários tipos de sensores existentes no mercado. Por conseguinte, nesta secção está contida apenas uma breve descrição dos tipos de detectores e tecnologias usadas pelas empresas cujos sistemas irão ser analisados.

#### **3.2.1.1 Infravermelho (IR)**

O princípio de detecção térmica é baseado na teoria física que refere que um corpo, cuja temperatura seja superior a zero, emite radiação electromagnética. Portanto, se um corpo está mais quente do que o espaço que o rodeia, a radiação é deslocada para comprimentos de onda mais curtos e a sua intensidade torna-se maior. A absorção de fótons por um material sensorial resulta assim, numa resposta quântica ou térmica. Os efeitos térmicos da radiação IR incidente podem ser seguidos através de muitos fenómenos dependentes da temperatura. Regra geral, os sensores são sujeitos a flutuações térmicas no ambiente circundante, logo, devem ser arrefecidos de modo a minimizar o ruído térmico [13].

##### **3.2.1.1.1 Sensores de Luminosidade**

Os detectores de luminosidade são assim denominados por detectarem radiação electromagnética no espectro de ultravioleta até frequências mais altas que IR. Por tal, detectores de luz têm que se basear em fontes adicionais de luz que iluminam o objecto. A luz é reflectida pelo corpo do objecto na direcção do dispositivo para consequente detecção. A luz solar ou qualquer lâmpada podem servir de fonte de luz adicional [13].

A função do detector de luminosidade é quantificar o nível de luminosidade e enviar os dados de modo a que a unidade de controlo possa ajustar o sistema de iluminação. Pela sua natureza, as fontes de luz perdem fluxo luminoso ao longo da sua vida. E a iluminação pode também ser afectada negativamente pelas luminárias ou pela sujidade presente nas lentes. Por tudo isto, uma parte muito importante do sistema diz respeito à possibilidade de ser fornecida capacidade extra para aumento de luminosidade posterior, de modo a colmatar situações como as anteriormente referidas. O objectivo do sensor é, então, proporcionar o nível de conforto óptimo, e por tal o seu posicionamento em diferentes áreas é de extrema importância: deve estar livre de reflexões ou impactos directos de fontes fortes de luz, de modo a não afectar a aquisição de dados. A disposição espacial permite a gestão independente de diferentes partes do sistema de iluminação.

### **3.2.1.1.2 Sensores de Presença**

Para fins de iluminação, a função básica do detector de presença é ligar as fontes de luz artificiais se, e só se, o espaço de detecção do sensor verificar que existe presença humana. Este tipo de automatismo combina o conforto do usuário com gestão de energia. Consiste num sensor *Passive InfraRed* (PIR) que reage ao calor dissipado por pessoas numa determinada área.

Estes detectores tornaram-se extremamente populares no campo da segurança e gestão de energia. O PIR deve ter uma resposta espectral entre 4 e 20 $\mu$ m, onde a maior parte da potência térmica emanada pelos humanos se situa [13]. Podem ser utilizados ao ar livre ou dentro de edifícios desde que a sua sensibilidade seja ajustada.

A altura a que é montado também é importante, de modo a cobrir a área que se pretende gerir, e deve haver uma sobreposição de campos de detecção sensores, de forma a haver monitorização mais eficaz do espaço circundante. Também devem ser montados de forma a não serem afectados por possíveis fontes de iluminação IR, nomeadamente ar condicionado, lâmpadas ou outros elementos que emitam calor. Também convém referir que os PIR, devido à sua natureza passiva, não necessitam de energia para operarem, tornando-se assim num elemento extremamente eficiente num sistema de iluminação.

São especialmente sensíveis a posicionamento incorrecto: nestas condições não detectam qualquer sinal, diminuindo os níveis de conforto em áreas escuras e estranhas. A situação ideal é o sensor detectar quando alguém entra no seu raio de acção e manter o sinal de saída activa enquanto houver movimento. Pessoas que estejam durante um certo tempo imóveis (a ler, dormir) podem originar a ausência de detecção por parte do PIR e, conseqüentemente, o desligar das luminárias. Em espaços, onde a área de detecção pode estar obstruída por elementos, poderá ser necessária uma densidade maior de detectores.

### **3.2.1.2 Microondas (MW)**

Comparativamente a outros detectores, os MW oferecem alternativas atractivas, quando é necessário cobrir áreas amplas ou quando operam numa gama de temperaturas extensa, sob a influência de fortes interferências tais como: o vento, o ruído acústico, o nevoeiro, a poeira e humidade. O princípio de funcionamento consiste na reflexão dos corpos de ondas RF electromagnética numa determinada área. As frequências mais comuns são 10.525GHz (banda 'X') e 24.125GHz (banda 'K') [13]. A estas frequências as ondas podem trespassar a maioria dos materiais e serem reflectida por objectos maiores.

#### **3.2.1.2.1 Sensores de Movimento**

O detector envia pulsos micro-ondas (banda 'X') e mede a reflexão de um objecto em movimento através do efeito de Doppler. Deve ser salientado que este efeito é um verdadeiro detector de movimento porque é reactivo apenas a alvos em movimento. Estes sinais são gerados por um díodo Gunn, a operar em limites que não afectam humanos ou *pacemakers*.

Apesar de ser usada pouca energia, o sistema entrega energia suficiente para um detector projectar um sinal superior a algumas dezenas de metros num campo de visão

ininterrupto. A maior parte dos sensores está ajustada de modo a detectar as frequências relacionadas com o movimento humano (20-120Hz) e directamente relacionadas com o princípio de mudança de frequência do efeito de Doppler. O dispositivo quantifica o movimento e pode ser conectado ou integrado noutros dispositivos. Estes últimos alertam o utilizador para a presença de um objecto em movimento no campo de detecção do sensor.

Existem dois tipos básicos de sensores MW: sensores mono-estáticos, onde o transmissor e receptor constituem um elemento único; e os sensores bi-estáticos, onde o emissor e receptor são duas unidades distintas e afastadas, criando uma zona de detecção entre eles. Este último pode cobrir uma área maior e é usada habitualmente se for necessário mais que um sensor.

Como os sensores operam na banda 'X', a associação próxima ou proximidade a outros sinais de frequência elevada pode afectar a fiabilidade de detecção. Áreas que contenham emissores fortes de campos eléctricos (transmissores de rádio) ou campos magnéticos (geradores ou motores eléctricos) podem afectar o funcionamento correcto e devem ser evitados ou compensados através de uma distinção e separação de sinal.

As zonas que contenham luzes fluorescentes também causam problemas: o ciclo de ionização criado por elas pode ser interpretado pelo detector como movimento e assim provocar falsos alarmes. O posicionamento do sensor, externa e paralelamente à parede evita reflexão de sinal gerado por ele próprio, o que é um problema comum. Por fim, aparelhos metálicos de dimensão apreciável devem ser mantidos fora do campo de detecção, porque proporcionam zonas onde a detecção não é possível.

### **3.2.2 Plataforma de Comunicação**

A plataforma de comunicação é designada como o meio físico de transporte de informação entre o detector e controlador. Permite a transmissão de comandos e recepção de dados de e para a unidade de controlo, respectivamente.

Ao longo dos anos e por variadas vezes, as empresas foram obrigadas a usar mais que um meio de comunicação. Vários factores foram responsáveis, tais como: a variedade e especificidade de alguns dispositivos [7], surgimento de novas tecnologias [8] e reaproveitamento de infra-estruturas já existentes. Assim, para não desenvolver produtos de raiz e evitarem investimentos maiores, as empresas preferiram adaptar os seus produtos. Por conseguinte, as tecnologias a considerar basear-se-ão nas mais convencionalmente utilizadas nos sistemas comerciais.

#### **3.2.2.1 Corrente Portadora (PLC)**

A disseminação da informação é feita através da rede eléctrica (230V~) sem recorrer a *bus* dedicado. É particularmente importante porque usa infra-estruturas presentes num grande número de casas e assim evita custos estruturais adicionais. No entanto, caso seja pretendida a comunicação com outras tecnologias, são necessários interfaces modulares.

#### **3.2.2.2 Rádio-Frequência (RF)**

A propagação da informação é efectuada através de ondas de rádio com uma frequência variável entre 3kHz e 3GHz, com bandas dedicadas, em que o

funcionamento correcto, está dependente do uso de emissores/receptores dedicados.

### **3.2.2.3 Infravermelho (IV)**

Tal como foi referido em 3.2.1.1, o transporte de informação é efectuado através de radiação infravermelha. Usa comprimentos de onda superiores à luz visível (0.74 – 300 $\mu$ m) e, regra geral, é usada em comandos individuais por uma questão de portabilidade. Não existem sistemas de comunicação baseados em IV, pois têm limitações a nível de comunicação e adaptabilidade em espaços com obstáculos, tornando este tipo de sistemas susceptível às condicionantes do ambiente circundante.

## **3.2.3 Gestão de Iluminação**

A definição de casa inteligente foi evoluindo ao mesmo tempo que foi possível integrar novos sistemas que permitem controlar elementos específicos tais como: ar condicionado, água, energia, iluminação e segurança. Assim, deixou de ser prático e eficiente cada sistema ter um dispositivo de controlo específico, o que culminou num controlo centralizado. De modo a diminuir a complexidade desses sistemas, foram criados protocolos que permitem a interacção e correcta aquisição de dados. Como tal, o sistema geral é constituído por subsistemas que comunicam entre si, usando protocolos pré-estabelecidos e que têm uma unidade de decisão comum.

Mais especificamente, a gestão de parâmetros de luminosidade é executada pela mesma unidade de controlo dos restantes elementos que recebe dados relativos a luminosidade, presença ou movimento adquiridos localmente. Depois de adquirida a informação local, esta é processada e, posteriormente, envia sinais de comando caso seja necessário.

### **3.2.3.1 DSI**

O protocolo *Digital Serial Interface* (DSI) é usado para controlar a luz em edifícios e oferece flexibilidade suficiente para grandes e pequenos sistemas de iluminação. Baseado no código Manchester com *baudrate* 1200, usa 8 bits destinados ao comando digital de balastos electrónicos, e usa um valor compreendido entre 0 e 255 para definir o nível de luminosidade pretendido. Não é necessário endereçamento, ou seja, cada dispositivo está conectado ao controlador por um fio, logo, o aumento, substituição ou diminuição de um controlador pode ser efectuado ora introduzindo um novo fio, ora retirando o velho. Tem a desvantagem de não ser uma solução *standard* como o protocolo mais sofisticado DALI e, por isso, é cada vez menos utilizado.

### **3.2.3.2 DALI**

O *standard Digital Addressable Lightning Interface* (DALI), especificado na norma IEC 60929 para balastos de lâmpadas fluorescentes, engloba o protocolo de comunicação e o interface eléctrico para controlo de redes de luminosidade em edifícios. Uma rede DALI consiste num controlador e um ou mais dispositivos de luz (balastos eléctricos ou *dimmers*). O controlador pode monitorizar e controlar cada ponto de luz por intermédio de uma troca bidireccional de informação. Cada dispositivo de luz tem associado um endereço estático numerado de 0 a 63. Alternativamente, também pode ser usado como subsistema, de modo que o número de endereços estáticos

é maior que 64. DALI necessita apenas de um par de fios entrelaçados para formar o *bus* de comunicação para todos os dispositivos numa rede DALI.

### 3.2.3.3 *KNX*

É um sistema de gestão simultânea de diversas aplicações (luz, segurança, aquecimento, ar condicionado) em edifícios inteligentes, baseada numa aplicação de *software* denominada *Engineering-Software-Tool*. Este sistema foi concebido de forma a uniformizar a linguagem desses sistemas sem necessidade de centros de controlo adicionais. É o resultado da convergência de três protocolos *European Home Systems Protocol* (EHS), *BatiBUS* e *European Installation Bus* (EIB ou *Instabus*). O KNX foi projectado para ser independente de qualquer plataforma de *hardware* (PLC, RF, *Ethernet*, *twisted pair*). Uma rede com dispositivos KNX pode ser controlada por um microcontrolador ou um computador pessoal mediante as necessidades da implementação.

### 3.2.3.4 *Microcontrolador*

Geralmente, o bloco de processamento consiste num microcontrolador. São populares e empregáveis em qualquer tipo de sistema, seja ele simples, complexo, pequeno ou grande. São baratos e existe uma grande oferta, assim como uma grande variedade, o que permite ajustar qual melhor se adapta à sua aplicação. Tem um elevado número de utilizadores, é personalizável, tem suporte de *software*, faz programação série e reprogramação, usando a memória *flash* incorporada.

## 3.3 Definição de Espaços Comerciais

É difícil definir “o espaço físico” ou “um espaço físico” que abranja a maior parte dos espaços aos quais os projectos de iluminação se destinam. Em primeiro lugar, existe uma enorme quantidade de plantas de apartamentos, sendo impossível compará-los todos individualmente; e em segundo lugar, não existem muitos apartamentos com a mesma configuração, excepto, muito provavelmente apartamentos que estejam inseridos em projectos executados pela mesma empresa construtora. As plantas de escritórios partilham exactamente do mesmo problema dos apartamentos, tendo como agravante o facto de, mesmo tratando-se de áreas iguais, a divisão da mesma é adequada às necessidades da empresa que ocupa o espaço, o que torna a divisão do mesmo aleatória. Resumindo, cada caso é um caso e todo o projecto de iluminação deve ser adaptado à realidade

Por conseguinte, foram tomados como referência três espaços de tipologias distintas, com o intuito de simular o universo de variedade no mercado imobiliário. As tipologias 3 (T3) e 4 (T4) são assim denominadas devido ao número de quartos existentes no espaço: 3 quartos no caso de T3 e 4 no caso de T4. A outra tipologia é direccionada a espaços comerciais, nomeadamente, escritórios.

O objectivo desta secção consiste na caracterização dos espaços físicos distintos referidos anteriormente, tendo por base de referência plantas que se enquadram no tipo de espaços existentes no mercado imobiliário do nosso país.



### 3.3.1 Condições de luminosidade

O intuito de um sistema de iluminação é iluminar. Portanto, deve-se ter a certeza que esta é suficiente e que não provoca desconforto visual nos utilizadores que usufruem do espaço. A afirmação anterior não implica que o estudo aqui apresentado inclua uma discussão exaustiva relativa à quantidade de luminosidade necessária (definida por normas), número de lâmpadas ou à disposição espacial das lâmpadas. Aliás, são aspectos que por si só necessitavam de um estudo paralelo específico que requer conhecimentos de luminotecnia e que fogem ao âmbito do presente trabalho. Por outro lado, quando é referido que um espaço inclui 'focos de luz', este deve ser interpretado como o posicionamento central relativo de uma ou várias lâmpadas que permitem obter luminosidade igualmente distribuída e necessária em qualquer secção do espaço-alvo. Assim, considera-se que o número e posicionamento de focos de luz necessários a uma iluminação suficiente está mais dependente da forma da divisão e menos dependente da área da divisão.

São muitos os factores de que depende a luz natural no interior do espaço, alguns já referidos em 3.1.1. É necessário assim, definir valores quantitativos de modo a que as exigências dos utilizadores sejam satisfeitas. Por conseguinte, os valores de iluminância recomendados para os cenários propostos vão incidir nas normas da Comissão Internacional de Iluminação (CIE) cujos valores são expostos na Tabela 3.1.

Na Figura 3.3, estão descritos os tipos de iluminação que vão ser considerados de modo a caracterizar as tabelas de ocupação. As cores estão relacionadas com o gasto de energia previsto. Assim, a vermelho não existe presença, logo não há utilização de iluminação, o que implica consumo nulo. No segundo caso, a amarelo, existe utilização do espaço mas sem presença de luz natural, logo as luminárias estão ligadas a 100%. Por fim, a verde, há utilização do espaço com presença de luz natural, logo o funcionamento das luminárias vai ter uma percentagem variável e proporcional à luz natural disponível. É aceite que 20-30% da poupança energética possa ser atingida desde que haja controlo logo, no caso de presença de luz natural ou em casos que a utilização é periódica sem ser permanente, assume-se que seja de 70%.

Tabela 3.1: Iluminâncias quantitativas recomendadas pelo CIE.

Domínios	Iluminâncias recomendadas (lux)	Tipo de Actividade
Iluminação geral para áreas pouco utilizadas ou com poucas exigências de tarefas visuais	20-50	Áreas públicas com zonas circundantes 'escuras'
	50-100	Orientação simples apenas para estadia temporárias de curta duração
	100-200	Compartimentos usados em actividades não contínuas (p.ex. Áreas de armazenamento, vestíbulos, átrios, etc.)
Iluminação geral em zonas interiores com exigências elevadas do ponto de vista visual	300-500	Tarefas com exigências visuais limitadas (salas de aula, gabinetes, trabalho com máquinas de precisão média, etc.)
	500-1000	Tarefas com exigências visuais normais (trabalho com máquinas de pouca precisão, anfiteatros, etc.)
	1000-2000	Tarefas com exigências visuais especiais (salas de desenho, gabinetes de arquitectura, tarefas de inspecção, etc.)

0%	Não existe utilização do sistema de iluminação e ocupação
100%	Existe utilização do sistema de iluminação sem presença de luz natural
70%	Existe utilização do sistema de iluminação com presença de luz natural

Figura 3.3: Legenda das tabelas de ocupação.

### 3.3.2 Método de caracterização

O método utilizado é meramente indicativo, já que este tipo de estudos necessita de um estudo luminotécnico mais rigoroso que obriga a outro tipo de considerações.

A caracterização do espaço alvo consiste na definição de divisões, número de divisões, área ocupada e taxa de utilização. Todos os espaços que se pretendem caracterizar já se encontram subdivididos em divisões, portanto, esse passo intermédio é ignorado. Assim, a normalização da caracterização do espaço alvo foi baseada em três fases distintas, descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Fases de caracterização.

<b>Fase 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclusão na imagem dos nomes das divisões (<i>hall</i> de entrada, sala, quartos, etc) e do posicionamento dos elementos mais importantes para a iluminação, nomeadamente, dos focos de luz (lâmpadas).</li> <li>• O número de focos de luz por divisão foi estipulado caso a caso, tendo em conta factores como esquinas, e espaço a iluminar.</li> </ul>
<b>Fase 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construção de uma tabela onde seja feita a discriminação do tipo de divisão, número de divisões equivalentes (função e espaço), área ocupada, iluminância por m<sup>2</sup> (1 lux =1lm/m<sup>2</sup>), iluminância por divisão (Área x lm/m<sup>2</sup>).</li> <li>• Nas imagens fornecidas, existem divisões cujos nomes são semelhantes, mas que não partilham da mesma área ocupada como, como por exemplo, alguns quartos de dormir e casas de banho. Nestes casos, são introduzidas entradas adicionais na tabela que reflectem essa diferença.</li> <li>• A área ocupada é calculada nos casos em que esta não se encontra descrita na imagem da planta.</li> </ul>
<b>Fase 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição de um horário de ocupação geral. Este horário consiste na distinção entre dias de trabalho (2<sup>a</sup> a 6<sup>a</sup> feira) e fins de semana (sábado e domingo), e posterior divisão em intervalos de 90min, de modo a obter a melhor imagem dos períodos de ocupação. Pressupõe-se que o horário se mantenha igual, quer seja hora de Verão, quer seja de Inverno e independente das condições climatéricas, pois introduziria complexidade acrescida.</li> <li>• Incluído no horário, e com as condicionantes referidas anteriormente, encontra-se a estimativa de ausência ou presença de luz natural de modo a que o cálculo de consumo de energia possa ser avaliado posteriormente na secção 3.4.5.</li> </ul>

### 3.3.2.1 Habitação T3

De seguida são apresentados os resultados referentes à Fase 1 (Figura 3.4), Fase 2 (Tabela 3.3) e Fase 3 (Tabela 3.4).



Figura 3.4: Planta de Habitação T3.

Tabela 3.3: Total de divisões da Habitação T3.

Tipo de Divisão	Nº Divisões	Área (m2)	Nº Focos de Luz	Iluminância	
	iguais			por m2	por divisão
Quarto	2	11,40	1	350	3990
Quarto	1	18,00	2	350	6300
Banho	2	6,00	1	500	3000
Banho	1	3,50	1	500	1750
Cozinha	1	16,00	1	500	8000
Sala Comum	1	37,20	2	300	11160
Lavandaria	1	3,50	1	500	1750
Hall	1	20,00	2	150	3000
Hall	1	7,00	1	150	1050
Varanda	1	28,00	2	200	5600

Tabela 3.4: Taxa de utilização temporal da Habitação T3.

Período	6h30	8h01	9h31	11h01	12h31	14h01	15h31	17h01	18h31	20h01	21h31	23h01
2ª a 6ª	70%	70%			70%			70%	100%	100%	100%	100%
Sáb. E Dom.	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%

### 3.3.2.2 Habitação T4

De seguida são apresentados os resultados referentes à Fase 1 (Figura 3.5), Fase 2 (Tabela 3.5) e Fase 3 (Tabela 3.6).

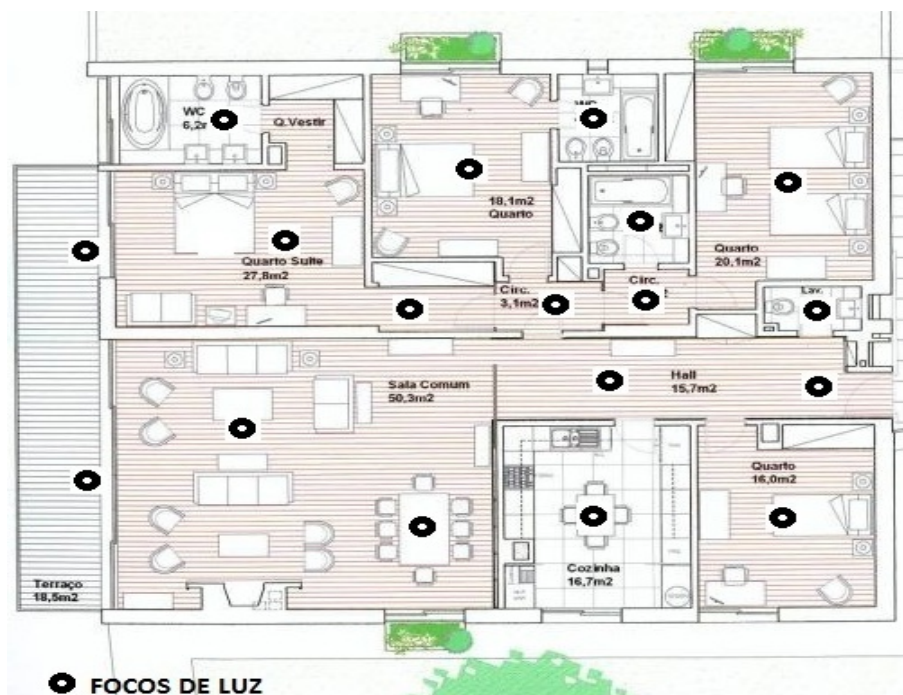


Figura 3.5: Planta de Habitação T4.

Tabela 3.5: Total de divisões da Habitação T4.

Tipo de Divisão	Nº Divisões iguais	Área (m2)	Nº Focos de Luz	Iluminância	
				por m2	por divisão
Quarto Suite	1	27,80	2	400	11120
WC	1	6,20	1	500	3100
Quarto	1	18,10	1	350	6335
WC	2	4,30	1	500	2150
Hall	1	3,10	1	150	465
Hall	1	2,30	1	150	345
Quarto	1	20,10	1	350	7035
WC	1	2,10	1	500	1050
Terraço	1	17,50	2	200	3500
Sala Comum	1	50,30	2	300	15090
Cozinha	1	16,70	1	500	8350
Hall	1	15,70	2	150	2355
Quarto	1	16,20	1	350	5670

Tabela 3.6: Taxa de utilização temporal da Habitação T4.

Período	6h30	8h01	9h31	11h01	12h31	14h01	15h31	17h01	18h31	20h01	21h31	23h01
2ª a 6ª	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%
Sáb. E Dom.	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%

### 3.3.2.3 Escritórios

De seguida são apresentados os resultados referentes à Fase 1 (Figura 3.6), Fase 2 (Tabela 3.7) e Fase 3 (Tabela 3.8).



Figura 3.6: Planta de Escritórios.

Tabela 3.7: Total de divisões de Escritórios.

Tipo de Divisão	Nº Divisões iguais	Área (m2)	Nº Focos de Luz	Iluminância	
				por m2	por divisão
W.C.	2	1,81	1	500	905
W.C.	2	1,25	1	500	625
Diretor	1	16,00	1	750	12000
Advogados	1	10,25	1	750	7687,5
Estagiários	1	10,00	1	750	7500
Arquivo	1	3,50	1	500	1750
Recepção	1	11,50	1	200	2300

Tabela 3.8: Taxa de utilização temporal de Escritórios.

Período	6h30	8h01	9h31	11h01	12h31	14h01	15h31	17h01	18h31	20h01	21h31	23h01
	8h00	9h30	11h00	12h30	14h00	15h30	17h00	18h30	20h00	21h30	23h00	00h30
2ª a 6ª		70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%			
Sábado		70%	70%	70%	70%							

### 3.4 Apresentação de sistemas de iluminação comerciais

Esta secção pretende apresentar os resultados do estudo efectuado relativos a duas empresas (ESYLUX e LEGRAND) que comercializam sistemas de iluminação em Portugal. Estas soluções baseiam-se primariamente numa uniformização do procedimento de cálculo e posicionamento do número de equipamentos necessários. Como ambas oferecem, pelo menos, duas soluções para o problema proposto, devido aos equipamentos disponíveis, também são apresentadas essas alternativas. No final, são exibidas tabelas com o sumário dos resultados obtidos.

#### 3.4.1 Método de análise

As três fases de estudo são executadas para as duas empresas, para ambas as soluções e para cada espaço representado em 3.3 (habitação T3, T4 e escritórios), segundo a ordem descrita na Tabela 3.9. Para melhor navegação e compreensão do estudo efectuado, foram introduzidas siglas nas imagens e tabelas resultantes presentes nos sistemas ESYLUX (3.4.3) e LEGRAND (3.4.4), que se referem às três fases inseridas na tabela. Assim, no início da descrição podem estar: F1 relativamente à fase 1, F2 relativamente à fase 2 e F3 relativamente à fase 3.

Tabela 3.9: Fases de estudo.

<b>Fase 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inclusão na imagem do posicionamento dos elementos mais importantes para o funcionamento dos sistemas, nomeadamente: foco de luz (lâmpadas), sensor (dispositivo ou módulo que detecta a presença, movimento e luminosidade) e actuador (dispositivo ou módulo que controla o foco de luz).</li> </ul>
<b>Fase 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Explicação do cálculo do número de dispositivos usados. Nesta fase, é evidenciado se o símbolo sensor/actuador da imagem diz respeito a um dispositivo ou a um módulo (dois dispositivos no máximo). O número total de dispositivos é posteriormente calculado e inserido na tabela.</li> </ul>
<b>Fase 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tabela informativa dos custos energéticos e financeiros envolvidos na solução apresentada: inclui preço unitário e custo total do número de dispositivos usados, contabilização da potência gasta apenas pelos dispositivos, custo financeiro absoluto e potência consumida apenas pelos equipamentos.</li> </ul>

### 3.4.2 Informações técnicas

Todas as empresas que concorrem no mercado livre de iluminação (ou qualquer outra actividade comercial) têm uma estratégia de *marketing* cuja função é evidenciar as qualidades das suas soluções e dispositivos que os compõem. Para além da fiabilidade e eficiência dos produtos instalados, factores como adaptabilidade a várias condições (por exemplo, ajuste de luminosidade consoante a presença de luz natural), facilidade de instalação (nenhum cliente pretende uma instalação que demore tempo excessivo a ser efectuada) e manuseamento (aprendizagem simples e facilidade na utilização) são importantes e funcionam como mais-valias.

Nos pontos seguintes, são evidenciadas características e procedimentos presentes nos catálogos das respectivas empresas. No final de cada ponto, encontra-se uma tabela, cuja função é discriminar e caracterizar os equipamentos utilizados em cada solução apresentada. A caracterização de cada equipamento consiste na referência do fabricante, tipo de dispositivo (emissor -Tx- ou receptor -Rx-) com legenda (S – sim, N - não), bloco em que se enquadra (actuador -■- ou sensor -★-) incluído (O) ou não incluído (X), preço unitário e potência consumida por hora. No caso da LEGRAND, é inserida uma coluna com uma breve descrição do equipamento, pois a referência fornecida pelo fabricante não é elucidativa da sua função.

#### 3.4.2.1 Sistema ESYLUX

A empresa tem disponíveis manuais actualizados que contêm informação detalhada relativa ao que um instalador e utilizador podem esperar se decidirem utilizar os seus produtos. A instalação e integração são fáceis, ficando imediatamente operacionais. Tem vários canais de comunicação: iluminação e AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). O canal de iluminação comuta em função da incidência da luz natural e da presença. Usa controlo remoto, para ajuste de precisão de vários parâmetros com rapidez e precisão. Admite escolha de programas de poupança de energia: automático, semiautomático e manual.

A ESYLUX usa dois tipos de detectores de presença: DSI/DALI e KNX (EIB, TP). No caso dos detectores de presença DALI/DSI, não existe endereçamento dos componentes/balastos electrónicos, isto é, são todos accionados simultaneamente através *broadcast*. No caso dos detectores de presença KNX (EIB), o ajuste de parâmetros e funções são efectuados através do *Emergency Technical Support* (ETS).

A luminosidade no acto de ligação é pré-definida e, sempre que a luz disponível for inferior ao pré-programado, a luz artificial liga-se, desde que seja detectado

Tabela 3.10: Componentes usados no sistema proposto ESYLUX.

	Referência	Tx	Rx	■	★	Preço s/IVA	Potência
Solução 2 Solução 1	EPL-Transmitter/1	S	N	x	O	112,60 €	<0.2W Stand-by
	EPL- Receiver /10A	N	S	O	x	122,90 €	<0.2W Stand-by
	EPL – Transciever/TLA	S	S	O		154,40 €	<0.2W Stand-by
	ERF-Transmitter/RC	S	N	x	O	136,50 €	<0.5W Stand-by
	ERF- Receiver/5A	N	S	O	x	142,80 €	<0.5W Stand-by
	ERF-Transceiver/5A	S	S	O		157,50 €	<0.5W Stand-by
Sensor	PD-C360i/8 mini DIM	-	-	-	O	174,30 €	0.2W
Opcional	Mobil-PDi/plus	S	-	-	-	29,80 €	-

movimento.

Em modo manual, tem disponível um módulo portátil que permite a regulação constante de luminosidade. Em modo automático, a regulação de luz constante depende de dois aparelhos *Master* e *Slave*. O *Master* comuta a iluminação, faz o ajuste de parâmetros (luminosidade e temporização), detecta a luminosidade e presença e processa os sinais de presença do *Slave*. O *Slave* tem como função apenas a detecção de presença/movimento, transmite o sinal de presença/movimento ao *Master* e não pode fazer ajustes.

Por fim, a ESYLUX fornece um guia de instalação cuja intenção é alertar para vários aspectos que podem pôr em risco o correcto funcionamento do sistema:

- Detector deve ser montado superiormente a uma distância inferior a 5m (quanto mais alto, menos sensibilidade).
- Campo de visão do detector deve estar desimpedido.
- Detectores têm que estar distanciados, pelo menos, 1m dos candeeiros.
- Deve ser posicionado de modo a detectar apenas luz artificial.
- Não é permitida a ligação em paralelo dos detectores de presença.
- Cada detector deve ter associado um transmissor (ERF ou EPL).
- Cada actuador deve ter associado um receptor (ERF ou EPL).

### 3.4.2.2 Sistema LEGRAND

Os manuais fornecidos pela empresa contêm pouca informação referente ao equipamento comercializado. Como tal, a instalação requer técnicos com alguma experiência ou corre-se o risco de obter um sistema ineficaz.

A LEGRAND tem disponíveis módulos de integração que permitem o ajuste de vários parâmetros: temperatura, estores e iluminação.

No caso específico do sistema de iluminação, a gestão depende da programação de eventos a que a LEGRAND denominou 'cenários'. Os 'cenários' são definidos como um conjunto de programas distintos que permite controlar o funcionamento das lâmpadas. É expectável que estes programas se ajustem às necessidades do utilizador. Assim, é necessária a pré-programação dos cenários que é denominada 'aprendizagem do sistema', e usa dispositivos específicos para essa função. Dos aparelhos incluídos no catálogo, o maior número de cenários possíveis são oito.

A detecção é feita através de um detector de movimento RF. Como existem vários aparelhos com tecnologias diferentes são necessários interfaces (PLC/IV e RF).

Tabela 3.11: Componentes usados no sistema proposto LEGRAND.

	Referência	Tx	Rx	■	★	Preço s/IVA	Potência	Descrição
Solução 1	882 01	S	N	O	x	66,46 €	Pilhas	Emissor Portátil (IV)
	7756 18	S	N	O	x	117,19 €	-	Emissor fixo (aprende cenários)
	7756 37	N	S	O	x	127,24 €	-	Receptor/actuador fixo
	036 06	S	S	x	x	237,14 €	-	Interface PLC/RF
Solução 2	882 15	S	N	O	x	130,04 €	Pilhas	Emissor Portátil (RF)
	7756 16	S	N	O	x	102,19 €	-	Emissor fixo (aprende cenários)
	7756 36	N	S	O	x	132,85 €	-	Receptor/actuador fixo
	7756 42	N	S	O	x	108,90 €	-	Receptor/actuador fixo
Sensor	882 09	-	-	-	O	127,92 €	Pilhas	Sensor Movimento



### 3.4.3 Sistema ESYLUX

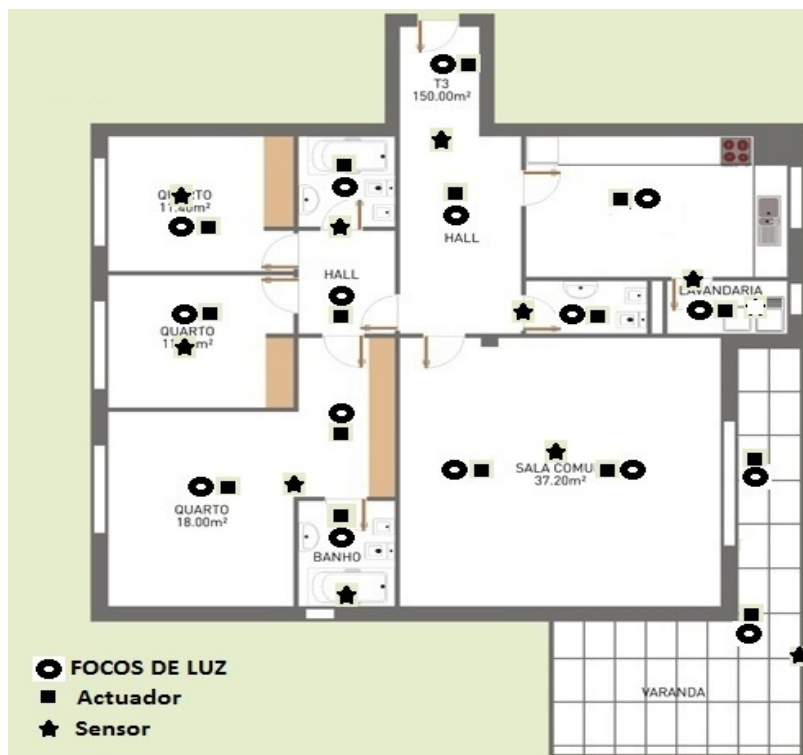


Figura 3.7: F1 Habitações T3 com plano de sistema ESYLUX proposto.

#### OBSERVAÇÃO:

Cada divisão com um ou mais quadrados usa apenas um actuador para controlar os focos de luz.

Tabela 3.12: F2 Cálculo do número de componentes ESYLUX (T3).

		Núm.	Emissor	Receptor	Sensor
Solução 1/2	★	10	10	---	10
	■	10	---	10	---

Tabela 3.13: F3 Resultados financeiro e energético ESYLUX (T3).

	Referência	■	★	Preço s/IVA	Custo	Potência		
Solução 1	EPL-Transmitter/1	x	10	112,60 €	1.126,00 €	2	Total €	4.127,80 €
	EPL- Receiver /10A	10	x	122,90 €	1.229,00 €	2	Potência/h	6,0 W
	EPL – Transciever/TLA	0		154,40 €	0,00 €	0		
Solução 2	ERF-Transmitter/RC	x	10	136,50 €	1.365,00 €	5	Total €	4.565,80 €
	ERF- Receiver/5A	10	x	142,80 €	1.428,00 €	5	Potência/h	12,0 W
	ERF-Transciever/5A	0		157,50 €	0,00 €	0		
Sensor	PD-C360i/8 mini DIM	-	10	174,30 €	1.743,00 €	2		
Opcional	Mobil-PDi/plus	-	1	29,80 €	29,80 €	-		



Figura 3.8: F1 Habitações T4 com plano de sistema ESYLUX proposto.

**OBSERVAÇÃO:**

Cada divisão com um ou mais quadrados usa apenas um actuador para controlar os focos de luz.

Tabela 3.14: F2 Cálculo do número de componentes ESYLUX (T4).

		Núm.	Emissor	Receptor	Sensor
Solução 1/2	★	10	10	----	10
	■	10	----	10	----

Tabela 3.15: F3 Resultados financeiro e energético ESYLUX (T4).

	Referência	■	★	Preço s/IVA	Custo	Potência		
Solução 1	EPL-Transmitter/1	x	11	112,60 €	1.238,60 €	2,2	Total €	4.906,30 €
	EPL- Receiver /10A	14	x	122,90 €	1.720,60 €	2,8	Potência/h	7,2 W
	EPL – Transciever/TLA	0		154,40 €	0,00 €	0		
Solução 2	ERF-Transmitter/RC	x	11	136,50 €	1.501,50 €	5,5	Total €	5.447,80 €
	ERF- Receiver/5A	14	x	142,80 €	1.999,20 €	7	Potência/h	14,7 W
	ERF-Transciever/5A	0		157,50 €	0,00 €	0		
Sensor	PD-C360i/8 mini DIM	-	11	174,30 €	1.917,30 €	2,2		
Opcional	Mobil-PDI/plus	-	1	29,80 €	29,80 €	-		



Figura 3.9: F1 Planta de Escritórios com plano de sistema ESYLUX proposto.

**OBSERVAÇÃO:**

Cada divisão com um ou mais quadrados usa apenas um actuador para controlar os focos de luz.

Tabela 3.16: F2 Cálculo do número de componentes ESYLUX (Escritórios).

		Núm.	Emissor	Receptor	Sensor
Solução 1/2	★	6	6	----	6
	■	7	----	7	----

Tabela 3.17: F3 Resultados financeiro e energético ESYLUX (Escritórios).

	Referência	■	★	Preço s/IVA	Custo	Potência		
Solução 1	EPL-Transmitter/1	x	6	112,60 €	675,60 €	1,2	Total €	2.611,50 €
	EPL- Receiver /10A	7	x	122,90 €	860,30 €	1,4	Potência/h	3,8 W
	EPL – Transceiver/TLA	0		154,40 €	0,00 €	0		
Solução 2	ERF-Transmitter/RC	x	6	136,50 €	819,00 €	3	Total €	2.894,20 €
	ERF- Receiver/5A	7	x	142,80 €	999,60 €	3,5	Potência/h	7,7 W
	ERF-Transceiver/5A	0		157,50 €	0,00 €	0		
Sensor	PD-C360i/8 mini DIM	-	6	174,30 €	1.045,80 €	1,2		
Opcional	Mobil-PDi/plus	-	1	29,80 €	29,80 €	-		

### 3.4.4 Sistema LEGRAND



Figura 3.10: F1 Habitações T3 com plano de sistema LEGRAND proposto.

#### OBSERVAÇÃO:

A copa e a casa de banho necessitam apenas de um actuador/receptor para ambos.

Tabela 3.18: F2 Cálculo do número de componentes LEGRAND (T3).

	Núm.	Emissor	Receptor	Sensor
<b>Solução 1/2</b>	4	---	---	4
	11	11	11	---

Tabela 3.19: F3 Resultados financeiro e energético LEGRAND (T3).

	Referência	Descrição			Preço s/IVA	Descrição	
Solução 1	882 01	Emissor Portátil (IV)	1	x	66,46 €	66,46 €	
	7756 18	Emissor fixo (aprende cenários)	11	x	117,19 €	1.289,09 €	Total €
	7756 37	Receptor/actuador fixo	11	x	127,24 €	1.399,64 €	
	036 06	Interface PLC/RF	1		237,14 €	237,14 €	3.504,01 €
Solução 2	882 15	Emissor Portátil (RF)	1	x	130,04 €	130,04 €	
	7756 16	Emissor fixo (aprende cenários)	11	x	102,19 €	1.124,09 €	Total €
	7756 36	Receptor/actuador fixo	0	x	132,85 €	0,00 €	
	7756 42	Receptor/actuador fixo	11	x	108,90 €	1.197,90 €	2.963,71 €
Sensor	882 09	Sensor Movimento	-	4	127,92 €	511,68 €	



Figura 3.11: F1 Habitações T4 com plano de Sistema LEGRAND proposto.

**OBSERVAÇÃO:**

Usam-se sensores de movimento em todos os espaços cuja área é superior a 17m<sup>2</sup>.

Tabela 3.20: F2 Cálculo do número de componentes LEGRAND (T4).

		Núm.	Emissor	Receptor	Sensor
Solução 1/2	★	6	----	----	6
	■	13	13	13	----

Tabela 3.21: F3 Resultados financeiro e energético LEGRAND (T4).

	Referência	Descrição	■	★	Preço s/IVA	Descrição	
Solução 1	882 01	Emissor Portátil (IV)	1	x	66,46 €	66,46 €	
	7756 18	Emissor fixo (aprende cenários)	13	x	117,19 €	1.523,47 €	Total €
	7756 37	Receptor/actuador fixo	13	x	127,24 €	1.654,12 €	4.248,71 €
	036 06	Interface PLC/RF	1		237,14 €	237,14 €	
Solução 2	882 15	Emissor Portátil (RF)	1	x	130,04 €	130,04 €	
	7756 16	Emissor fixo (aprende cenários)	13	x	102,19 €	1.328,47 €	Total €
	7756 36	Receptor/actuador fixo	13	x	132,85 €	1.727,05 €	3.953,08 €
	7756 42	Receptor/actuador fixo	0	x	108,90 €	0,00 €	
Sensor	882 09	Sensor Movimento	-	6	127,92 €	767,52 €	



Figura 3.12: F1 Planta de Escritórios com plano de sistema LEGRAND proposto.

**OBSERVAÇÃO:**

Usam-se sensores de movimento em todos os espaços cuja área é superior a 17m<sup>2</sup>.

Tabela 3.22: F2 Cálculo do número de componentes LEGRAND (Escr.).

	Núm.	Emissor	Receptor	Sensor
<b>Solução 1/2</b>	3	---	---	3
	6	6	6	---

Tabela 3.23: F3 Resultados financeiro e energético LEGRAND (Escr.).

	Referência	Descrição	■	★	Preço s/IVA	Descrição	
Solução 1	882 01	Emissor Portátil (IV)	1	x	66,46 €	66,46 €	
	7756 18	Emissor fixo (aprende cenários)	6	x	117,19 €	703,14 €	<b>Total €</b>
	7756 37	Receptor/actuador fixo	6	x	127,24 €	763,44 €	<b>2.153,94 €</b>
	036 06	Interface PLC/RF	1		237,14 €	237,14 €	
Solução 2	882 15	Emissor Portátil (RF)	1	x	130,04 €	130,04 €	
	7756 16	Emissor fixo (aprende cenários)	6	x	102,19 €	613,14 €	<b>Total €</b>
	7756 36	Receptor/actuador fixo	6	x	132,85 €	797,10 €	<b>1.924,04 €</b>
	7756 42	Receptor/actuador fixo	0	x	108,90 €	0,00 €	
<b>Sensor</b>	882 09	Sensor Movimento	-	3	127,92 €	383,76 €	

### 3.4.5 Consumo de energia

Esta secção tem função efectuar um estudo financeiro dos sistemas comerciais a nível de consumo energético. O objectivo é determinar o gasto de energia por hora, para todas as tipologias e, posteriormente calcular o tempo que o investimento inicial de instalação demora a ser recuperado. Para além das condições adicionais que vierem a ser definidas, a utilização de HB-LEDs como fontes de iluminação e os diagramas temporais de utilização globais da secção 3.3, devem ser respeitadas.

#### 3.4.5.1 Luminárias

Antes de calcular o número de luminárias, é necessário definir as luminárias que servirão de base de comparação para iluminação. Assim, foram escolhidas as lâmpadas descritas na Tabela 3.24, cujas potências são equivalentes a uma lâmpada incandescente de 60W com características semelhantes no que diz respeito à cor, CRI e CCT.

O passo seguinte, consiste em obter o número de luminárias necessárias para cada divisão. Relembrando as tabelas apresentadas no ponto 3.3.2, e dividindo a iluminância por divisão pelo fluxo luminoso máximo da lâmpada, obtém-se o número de lâmpadas. Seguidamente, o número total de luminárias é calculado mediante o número de divisões iguais, cujo resultado final está exposto na Tabela 3.25.

Tabela 3.24: Luminárias para iluminação geral.

Tipo de lâmpadas	Modelo	Cor	CRI	CCT (K)	Fluxo luminoso (lm)	Potência dissipada (W)	Nº horas	Custo (€)	Garantia
Incandescente	Halco 6117	--		--	530	60	3000	0,75	N/A
CFL	GE 15831	Warm white	82	2700 K	950	15	8000	3,53	12 meses
LED	Kobi Warm 60+	Warm white	80	2700 K	800	13	25000	13,95	5 anos

Tabela 3.25: Cálculo do número de luminárias.

T3						T4					
Tipo de Divisão	Nº Divisões iguais	Iluminância por divisão	Nº total lâmpadas			Tipo de Divisão	Nº Divisões iguais	Iluminância por divisão	Nº total lâmpadas		
			Incandescente	CFL	LED				Incandescente	CFL	LED
Quarto	2	3990,0	16	10	10	Quarto Suite	1	11120,0	21	12	14
Quarto	1	6300,0	12	7	8	WC	1	3100,0	6	4	4
Banho	2	3000,0	12	8	8	Quarto	1	6335,0	12	7	8
Banho	1	1750,0	4	2	3	WC	2	2150,0	10	6	6
Cozinha	1	8000,0	16	9	10	Hall	1	465,0	1	1	1
Sala Comum	1	11160,0	22	12	14	Hall	1	345,0	1	1	1
Lavandaria	1	1750,0	4	2	3	Quarto	1	7035,0	14	8	9
Hall	1	3000,0	6	4	4	WC	1	1050,0	2	2	2
Hall	1	1050,0	2	2	2	Terraço	1	3500,0	7	4	5
Varanda	1	5600,0	11	6	7	Sala Comum	1	15090,0	29	16	19
						Cozinha	1	8350,0	16	9	11
						Hall	1	2355,0	5	3	3
						Quarto	1	5670,0	11	6	8
Escritórios						Escritórios					
W.C.	2	905,0	4	2	4	Advogados	1	7687,5	15	9	10
W.C.	2	625,0	4	2	2	Estagiários	1	7500,0	15	8	10
Diretor	1	12000,0	23	13	15	Arquivo	1	1750,0	4	2	3
						Recepção	1	2300,0	5	3	3

### 3.4.5.2 Tempos de utilização

Este ponto pretende que seja calculado o tempo em que a iluminação de cada divisão é utilizado durante um dia inteiro.

Numa primeira fase são definidos os tempos de ocupação das divisões para cada tipologia. Consideram-se iguais os períodos de ocupação para as tipologias T3 e T4, por se admitir tratarem-se de habitações domésticas, cujas famílias partilham da mesma rotina diária. Também se considera que não existe diferenciação entre hora de Verão e de Inverno.

A ocupação temporal das divisões é discutível por não fornecer a imagem completa da utilização das mesmas (p.ex. casas de banho, hall). Nesse sentido, considera-se que em alguns períodos existe utilização, compensada pela ausência completa em outros períodos. Assim, são apresentados as tabelas de ocupação de cada tipo de divisão para as tipologias t3 e t4 (Figura 3.13) e escritórios (Figura 3.14).

O número de horas diárias para cada divisão e para todas as topologias é exposto na Tabela 3.26. Quando não há controlo, todos os períodos ocupados são assumidos como consumo a 100%. Havendo controlo os períodos definidos a verde determinam consumo energético a 70%.

Tabela 3.26: Cálculo do número de horas diário.

T3, T4				Escritórios			
Tipo de divisão por divisão	Período	Nº de horas diárias efectivas		Tipo de divisão	Período	Nº de horas diárias efectivas	
		s/ controlo	c/ controlo			s/ controlo	c/ controlo
Quarto de banho	2ª a domingo	4,5	3,6	W.C. ou copa	2ª a 6ª	3	2,1
Quarto de dormir	2ª a domingo	3	2,55		Sábado	1,5	1,05
Cozinha, Lavand.	2ª a domingo	4,5	3,15	Salas de escritório	2ª a 6ª	12	8,85
Sala e hall	2ª a 6ª	7,5	6,15		Sábado	6	4,2
	Sáb. E Dom.	13,5	10,8	Arquivo	2ª a 6ª	6	4,2
Varanda, terraço	2ª a domingo	3	2,55		Sábado	3	2,1

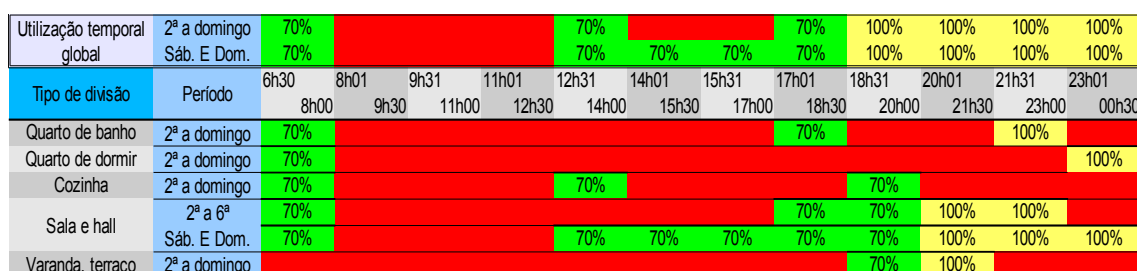


Figura 3.13: Ocupação temporal para T3 e T4.

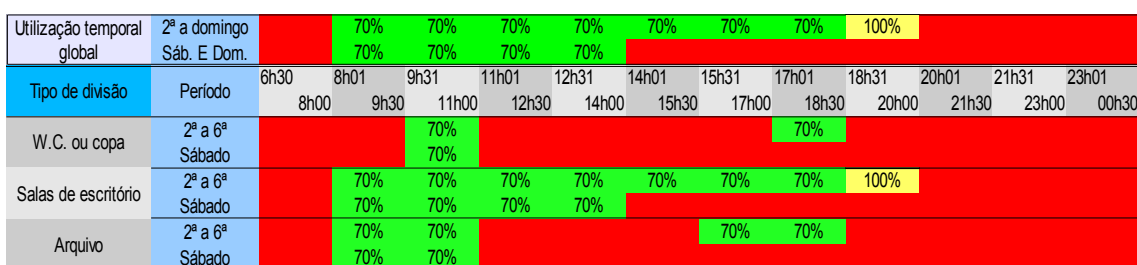


Figura 3.14: Ocupação temporal para escritórios.



Tabela 3.27: Custo semanal da potência gasta em iluminação.

	Sem controlo			Com controlo
	Incandescente	CFL	LEDs	LEDs
T3	29,72 €	4,27 €	4,16 €	3,33 €
T4	39,81 €	5,72 €	5,75 €	4,65 €
Escritórios	38,08 €	5,37 €	5,46 €	3,99 €

### 3.4.5.3 Custo energético

O custo da potência semanal ( $CP$ ) relativa à iluminação consumida é estimada a partir da seguinte fórmula:

$$CP_{semana} = \frac{N^{\circ} \text{ Total de luminárias} \cdot N^{\circ} \text{ horas ON} \cdot P_{\text{luminária}} \cdot \text{tarifa}_{\text{kWh}}}{1000}$$

O número total de LEDs é retirado da Tabela 3.25, o número de horas ON é calculado através da determinação do número de horas por semana baseado na Tabela 3.26,  $P_{LED}$  é a potência de cada lâmpada LED (18W) e o preço do kWh é 0,1551€. O somatório de todas as divisões para cada tipologia é apresentada na Tabela 3.27.

### 3.4.5.4 Retorno do investimento

Ambas as empresas afirmam que o investimento inicial é recuperável em 2-3 anos, sem especificar a forma como atingiram esse valor. Este ponto, pretende assim, estimar o tempo a partir do qual o investimento inicial dos sistemas propostos é totalmente rebatido, por intermédio da poupança energética. O retorno do investimento (RI) pode ser calculado através do método descrito seguidamente:

1. Cálculo do custo energético relativo à iluminação sem controlo (CESC) e com controlo (CECC). Estes valores estão expostos na Tabela 3.27.
2. Cálculo dos custos operacionais (CO), ou seja, custo da energia que os elementos consomem de modo a poderem funcionar. O consumo energético ao longo do tempo é dado por:  $CE = CO \times t$
3. Cálculo do preço total dos elementos constituintes do sistema (Inv. Inicial) já efectuado nos pontos 3.4.3 e 3.4.4.
4. O custo energético sem controlo (a) e com controlo (b), é dado então pelas seguintes expressões, onde  $t$  corresponde ao tempo em semanas. Igualando-as, obtém-se o retorno de investimento (eq. 3.1).

$$(a) \quad CE = CESC \cdot t$$

$$(b) \quad CE = (CECC + CO) \cdot t + \text{Inv. Inicial}$$

$$RI_{semanas} = \frac{\text{Inv. Inicial}}{(CESC - CECC - CO)} \cdot \frac{7}{365} \quad (3.1)$$

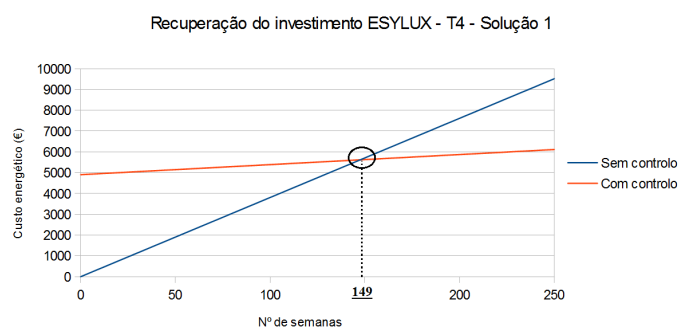


Figura 3.15: Exemplo gráfico do cálculo da recuperação de investimento.

Um exemplo gráfico do resultado da expressão 3.1, relativo à solução 1 para a tipologia T4, é exposto na Figura 3.15, onde se verifica que o retorno total do investimento inicial é atingido após 149 semanas.

No caso específico da LEGRAND, a empresa não fornece valores de consumo de energia por hora para cada equipamento. Os únicos dados fornecidos dizem respeito às pilhas utilizadas no sensor e nos emissores portáteis, que são 2 pilhas alcalinas de 1.5V, LR03 em ambos os casos. Assumindo que a sua substituição das pilhas ocorre a cada 6 meses, são estas que vão ser consideradas como custos de operação (CO).

No caso da substituição de lâmpadas incandescentes por LEDs e controlo de luminosidade, o tempo de retorno do investimento é apresentado na Figura 3.16.

No caso das lâmpadas CFL não faz sentido o cálculo do retorno de investimento já que os gastos semanais em iluminação estão muito próximos das dos LEDs, o que implicaria tempos de retorno demasiado longos em que estas tecnologias já poderão estar obsoletas.

			T3	T4	Escritórios
	Luminárias	Incandescentes	29,72 €	39,81 €	38,08 €
		Com controlo	3,33 €	4,65 €	3,99 €
ESYLUX	Solução 1	CO	0,16 €	0,19 €	0,10 €
		Inv. Inicial	4.127,80 €	4.906,30 €	2.611,50 €
		Retorno em	<b>3 anos 0 meses</b>	<b>2 anos 8 meses</b>	<b>1 anos 5 meses</b>
ESYLUX	Solução 2	CO	0,31 €	0,38 €	0,20 €
		Inv. Inicial	4.565,80 €	5.447,80 €	2.894,20 €
		Retorno em	<b>3 anos 4 meses</b>	<b>3 anos 0 meses</b>	<b>1 anos 7 meses</b>
LEGRAND	Solução 1	CO	0,03 €	0,04 €	0,03 €
		Inv. Inicial	3.504,01 €	4.248,71 €	2.153,94 €
		Retorno em	<b>2 anos 6 meses</b>	<b>2 anos 3 meses</b>	<b>1 anos 2 meses</b>
LEGRAND	Solução 2	CO	0,03 €	0,04 €	0,03 €
		Inv. Inicial	2.963,71 €	3.953,08 €	1.924,04 €
		Retorno em	<b>2 anos 1 meses</b>	<b>2 anos 1 meses</b>	<b>1 anos 1 meses</b>

Figura 3.16: Retorno do investimento no caso de substituição de lâmpadas incandescentes por LEDs + controlo.

### 3.4.6 Sumário de Resultados

Tabela 3.28: Sumário dos resultados financeiro e energético.

		T3		T4		Escritórios	
		Custo s/IVA	Ret. Inv.	Custo s/IVA	Ret. Inv.	Custo s/IVA	Ret. Inv.
ESYLUX	Solução 1	4.127,80 €	3a 0m	4.906,30 €	2a 8m	2.611,50 €	1a 5m
	Solução 2	4.565,80 €	3a 4m	5.447,80 €	3a 0m	2.849,20 €	1a 7m
LEGRAND	Solução 1	3.504,01 €	2a 6m	4.248,71 €	2a 3m	2.153,29 €	1a 2m
	Solução 2	2.963,71 €	2a 1m	3.953,08 €	2a 1m	1.924,04 €	1a 1m

Tabela 3.29: Sumário de características técnicas.

	Ajuste de luminosidade				Detector	
	Automático	Semi-autom	Manual	Luz natural	Movimento	Presença
ESYLUX	X	X	X	X		X
LEGRAND		X	X		X	

#### Em Conclusão...

O sistema ESYLUX, com a configuração proposta, faz o controlo desejado de iluminação. No entanto, é um sistema cujo preço é incomportável para consumidores que não sejam de classe média-alta/alta. Os seus detectores ajustam-se à luz natural, apesar de ser necessária a sua pré-programação. Permite também a adição de módulos (*Slave*), assim como o controlo de outros parâmetros tais como aquecimento, ventilação e segurança.

O sistema LEGRAND, com a configuração proposta, faz o controlo desejado de iluminação; no entanto, é muito limitado, pois depende excessivamente da programação de 'cenários' (neste caso foram usados quatro). O número de 'cenários' usado pode ser insuficiente e obrigar à reprogramação periódica, o que torna o sistema pouco prático tendo em conta o preço elevado do mesmo. Outra limitação é a gestão de energia que não é otimizada, pois não faz ajuste de luminosidade mediante a presença de luz natural.

Fica claro que, seja qual for a empresa ou a solução estudada, estes sistemas são sempre caros e destinam-se a consumidores de classe superior ou igual a média-alta. As diferenças de preço nos componentes devem-se às características dos próprios equipamentos, isto é: quanto mais funcionalidades o equipamento tiver, mais dispendioso será. O sistema *blue-mode* da ESYLUX é prático e permite um ajuste por *broadcast*, enquanto o da LEGRAND necessita de ser individualizado. Ambos os sistemas partem do princípio que quem compra não quer só controlar a luminosidade, e dá várias opções de controlo de outros parâmetros: aquecimento, ar condicionado, controlo de estores e segurança.

Outro factor em comum é ambas defenderem que o investimento efectuado é recuperável em 2-3 anos, com eficiências energéticas elevadas entre os 60 e 70%, sem revelarem a forma como chegam ao valor. Os sistemas estudados prevêem gastos adicionais em energia, no equipamento usado, no entanto, recuperam o investimento através da gestão de iluminação e acabam por ser irrisórios comparativamente ao balanço energético final.

## **CAPÍTULO IV**

### **4 Sistema domótico**

Nos dias de hoje, existe um consumo excessivo de energia eléctrica originado pelo estilo de vida moderno. Devido ao consumo crescente dos últimos anos, não é expectável que o preço do Watt/h diminua, muito antes pelo contrário. Assim, ocorreu uma mudança de mentalidades, que se baseia no consumo racional e combate ao desperdício, resultante da necessidade de haver um aumento da eficiência de sistemas eléctricos.

Estudos realizados e publicados afirmam que, do total de energia eléctrica gasta em edifícios, 40% é em iluminação. Por conseguinte, o sistema proposto nesta dissertação pretende, desde logo, diminuir significativamente os consumos energéticos de sistemas de iluminação através de actuação, controlo e gestão inteligente de iluminação através de VLC. O sistema deverá respeitar as directivas da União Europeia relativas ao fluxo luminoso mínimo, consumo de energia e emissão de gases contribuidores para o aquecimento global.

Tal como foi referido no capítulo II, a evolução da tecnologia LED nos últimos anos permitiu que a tecnologia VLC fosse implementada também, como forma de

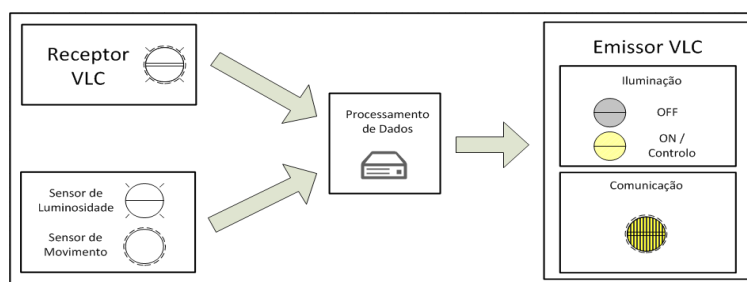


Figura 4.1: Visão geral do sistema domótico proposto.

comunicação fazendo o reaproveitamento da luminosidade. Ou seja, os LEDs vão funcionar não só como actuadores, mas também como meio de transmissão de dados o que implica desde logo, projectar um sistema que permita a emissão e recepção de dados com ajustamento automático de luminosidade.

Por fim, deve ser referido que este capítulo foi construído seguindo uma abordagem de implementação suportada em simulação. Na verdade, bastaria a discussão de conceitos e especificação de requisitos que por vezes são omissos ou dispersos.

## 4.1 Arquitectura do Sistema

Um sistema de iluminação inteligente tem como função principal controlar a luminosidade. Neste, em particular, é pretendido que tanto a actuação, como a aquisição de dados e o respectivo processamento sejam locais, ou seja, comportam-se como um módulo autónomo (Figura 4.1). Numa primeira análise, o sistema deve ter incorporado meios que permitam adquirir essa informação, nomeadamente, sensores. De seguida, deve haver um elemento que processe e comunique a tomada de decisão. Por fim, deve haver possibilidade de comunicação com outros módulos, ou seja, o módulo principal deve incorporar um emissor e um receptor.

Os sensores a utilizar dependem das grandezas que se pretendem quantificar, que neste caso são duas: luminosidade e movimento. Os sensores de luminosidade amostram a luz medida. Os sensores de movimento/presença emitem um sinal eléctrico sempre que o movimento for detectado. A descrição, função e modo de funcionamento já foram realizados, na secção 3.2.1. Os dados adquiridos são tratados pela unidade de processamento, e esta última actua, fazendo variar os sinais de saída que pretendem controlar as lâmpadas HB-LED.

O sistema pretende-se que seja modular, de modo a que seja possível adicionar ou remover elementos, no sentido de aumentar ou diminuir a área de detecção e iluminação (Figura 4.2). Assim, prevê-se o uso de dois tipos de módulos, denominados

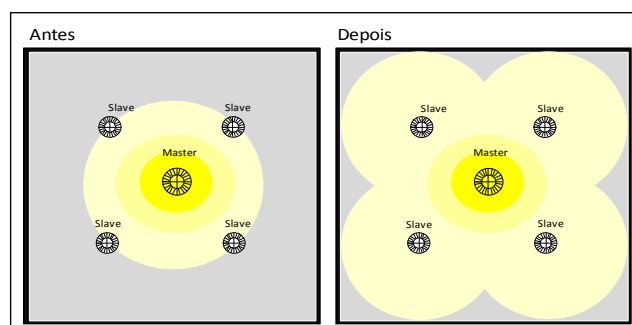


Figura 4.2: Exemplo de Comunicação VLC entre módulos (*Master* e *Slave*).

*Master e Slave.* A informação trocada entre ambos diz respeito apenas à luminosidade pretendida e ao consumo de energia. Ambos têm em comum o facto de controlarem as lâmpadas localmente e o facto de usarem a tecnologia VLC como meio de comunicação. O que os diferencia é o facto de somente o *Master* incluir bloco de sensores que lhe conferem a capacidade de decisão, logo o *Slave* é apenas um receptor, retransmissor e actuador em termos de iluminação.

A comunicação entre módulos é efectuada por intermédio de luz visível que, não sendo recente, só após o desenvolvimento da tecnologia LED e das melhorias em termos de eficiência se tornou uma alternativa aos restantes tipos de lâmpadas. Outra vantagem fulcral diz respeito à infra-estrutura de iluminação já existente, o que resulta num reaproveitamento energético intrínseco, pois a luz só é activa quando necessário.

Na Figura 4.3, é apresentada a sequência de imagens elucidativas de como se espera que o sistema proposto actue. Tal como foi referido anteriormente, apenas o *Master* tem sensores instalados, ou seja, só o *Master* pode detectar movimento ou presença. Assim, após a detecção, o *Master* reage ligando as luminárias. Simultaneamente, 'acorda' os *Slaves* e envia informação através de VLC sobre os níveis de luminosidade e potência consumida (Figura 4.3i). O *Slave* actua de acordo com essa informação e mantém-se *ON*, enquanto o *Master* também estiver *ON*.

Em algumas situações pode ocorrer sobreposição de campos de detecção relativos a dois ou mais *Master* distintos (Figura 4.3ii). Nesse caso, ambos os *Master* actuam e ajustam-se independentemente do estado individual, baseando-se apenas na informação recolhida localmente pelos respectivos sensores.

Na última situação da Figura 4.3iii, o primeiro *Master* deixa de detectar presença/movimento e, conseqüentemente, desliga as luminárias, mudando de seguida o seu estado para '*wait*'. Por conseguinte, o *Slave* deixa de receber informação do primeiro *Master* e muda o seu estado para '*sleep*'. O *Slave* pode receber informação do segundo *Master* e actuar mediante essa informação, no entanto, este tipo de controlo/gestão tem por base situações específicas que visam resolver problemas específicos. Assim, nesta

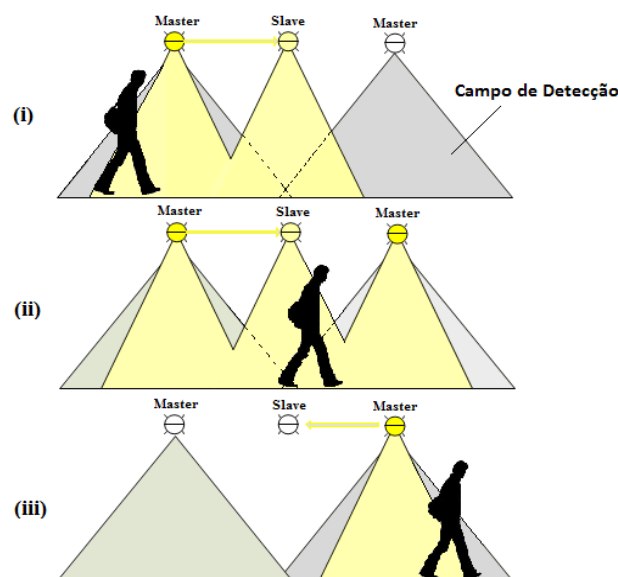


Figura 4.3: Controlo de luminosidade.

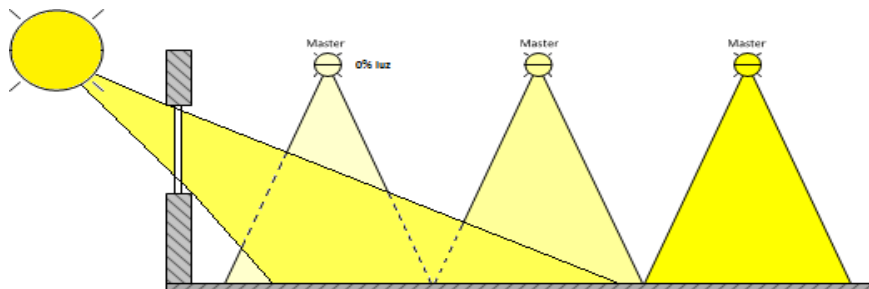


Figura 4.4: Ajuste do nível dos níveis de luminosidade.

fase, é apenas considerado que o *Slave* só é activado mediante a informação enviada pelo *Master* que lhe estiver associado.

O ajuste de luz só ocorre mediante a aquisição em tempo real dos níveis de luminosidade. Tal como no caso dos sensores de movimento/presença, apenas o *Master*, através de um sensor de luminosidade, pode fazer a amostragem e actuação nos níveis de luz. Como se pode verificar através da Figura 4.4, o *Master* controla a luz artificial cujo nível de luminosidade é tanto maior quanto menor for a luz natural. O mesmo podia ser dito se houvesse várias fontes de luz artificial, cujos cones de iluminação se sobrepusessem. Compete à unidade de processamento do *Master* controlar a luminosidade, de modo a manter o nível de luminosidade aceitável e suficiente.

Neste caso, o sistema acaba por beneficiar da compactação, ou seja, espera-se que todos os blocos que compõem os dispositivos principais (*Master* e *Slave*) estejam próximos o suficiente, de modo a que o uso de fios de cobre extra seja reduzido ou inexistente.

A organização do sistema obriga a que haja, no mínimo, um *Master* por divisória, no entanto, o sistema permite mais que um *Master* e mais que um *Slave* a partilharem o mesmo espaço. O *Master* faz *broadcast* da informação, através da pulsação dos HB-LEDs. Qualquer dispositivo, seja *Master* ou *Slave*, pode receber essa informação, todavia, cada *Slave* só pode ter um *Master*, o que implica que o *Slave* deverá reconhecer o seu *Master*, através de um identificador único. Entre *Slaves*, a informação é retransmitida o mais rapidamente possível, mas a actuação nos HB-LEDs só é executada se o identificador corresponder ao seu *Master*. Outra característica passível de ser mencionada diz respeito à comunicação entre *Slaves*, mesmo que estes estejam fora do campo de detecção do *Master* associado. Na Figura 4.5, está representada a topologia de rede, onde são evidenciadas as características relatadas

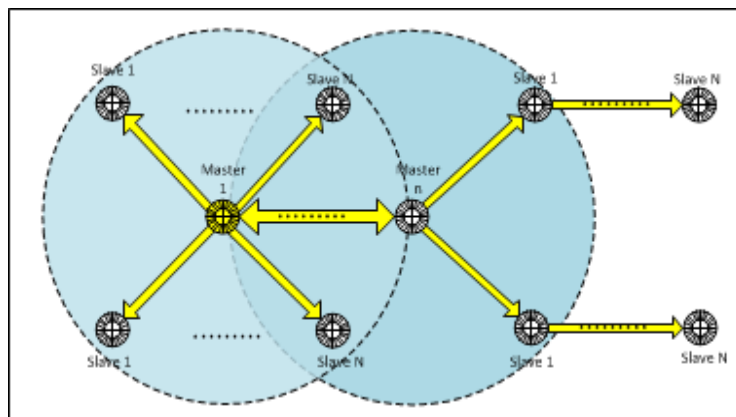


Figura 4.5: Topologia de rede do sistema.

anteriormente.

Apesar de não ser um requisito, deve haver uma forma do utilizador poder fazer um controlo manual ON/OFF do sistema, através de um interruptor manual (fixo ou remoto).

#### 4.1.1 Master

O *Master* representado na Figura 4.6 é responsável pela arbitragem, aquisição e processamento de dados localmente. Assim, o *Master* consiste em quatro blocos principais: bloco de sensores, Emissor VLC, Receptor VLC e unidade de controlo.

A aquisição de dados é efectuada através do bloco de sensores e do receptor VLC. O bloco de sensores adquire dados relativamente à presença e luminosidade no espaço em tempo real. O receptor VLC está encarregue pela aquisição e descodificação de informação antes de enviar os dados para a unidade de controlo.

A unidade de controlo processa os dados, transforma em informação e executa actualizações de estado, a partir da informação colhida. Estas últimas resultam na codificação e transmissão da informação para o emissor VLC. Cada *Master* tem uma classe única e inclui-a em cada trama de informação que envia, de modo aos destinatários distinguirem informação válida da informação desnecessária.

O emissor VLC tem duas funções básicas: iluminação e transmissão de dados. A iluminação básica é efectuada através da variação do fluxo luminoso, definido pelo conjunto PWM e filtro referido anteriormente no capítulo II, nomeadamente na Figura 2.6ii). Isto é necessário por forma a não interferir com a comunicação. Por outro lado, sem comunicação, a corrente dos LEDs assume um valor constante.

O receptor VLC tem apenas uma função básica, isto é, receber os dados enviados por outros módulos, *Master* ou *Slave*. Em ambos os casos, a informação é apenas retransmitida, sem efectuar qualquer tipo de actualização.

Obrigatoriamente, tem que haver, no mínimo, um *Master* por divisão. Também existe a possibilidade de vários *Masters* poderem coexistir no mesmo espaço, mas nenhum partilha os *Slaves* associados. Por fim, o *Master*, sempre que se desliga, sinaliza o evento antecipadamente, através do envio de uma trama específica, obrigando os *Slaves* a desligarem-se.

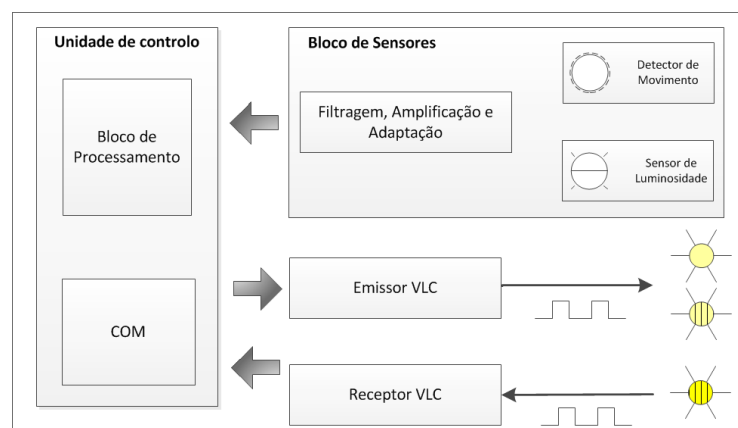
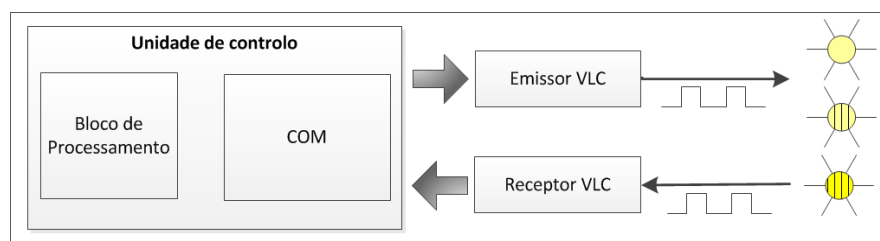


Figura 4.6: Arquitectura do dispositivo tipo *Master*.



Figura 4.7: Arquitectura do dispositivo *Slave*.

### 4.1.2 *Slave*

O módulo *Slave*, representado na Figura 4.7, é uma versão simplificada do *Master*, pois apenas diferem no bloco de sensores inexistente no *Slave*, ou seja, o módulo *Slave* consiste em três blocos distintos: Emissor VLC, Receptor VLC e unidade de controlo. Por conseguinte, a quantidade de funções que o *Slave* pode executar está limitada à iluminação e retransmissão de informação.

Este módulo permite uma extensão do espaço de iluminação. Entre *Slaves*, toda a informação adquirida é comparada com o estado presente, actualizada, se necessário, e retransmitida. A trama a retransmitir pode incluir a indicação de que a informação foi recebida pelo *Slave*, através da manipulação de dois *bits*. Vários *Slaves* podem compartilhar a mesma divisão, no entanto, cada *Slave* só pode ter um e só um *Master* associado. Por isso, independentemente do número de *Masters* que partilham a mesma divisão, o *Slave* só obedece a um. Significa isto, que cada *Slave* deve estar associado a um grupo (ou classe), que não existe restrição do número de *Slaves* pertencentes a uma mesma classe e cada classe deve ter um *Master* associado.

## 4.2 Gestão de dados

O dispositivo central dos módulos *Master* e *Slave* é a unidade de controlo que consiste numa placa de desenvolvimento denominada Arduino UNO, baseada no microcontrolador Atmega328 [49]. Este dispositivo contém 14 entradas/saídas digitais (das quais, 6 podem ser usadas como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, conexão USB, tomada de alimentação directa, um ICSP, *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) e um botão de *reset*. Contém também todas as primitivas necessárias para suportar o microcontrolador, de modo que basta conectar a um computador, através de um cabo USB, ou ligar directamente a um adaptador AC-DC ou bateria DC para iniciar o funcionamento. Para além disso, o Arduino UNO é de baixo custo (~25 euros), amplamente comercializado no mercado com ferramentas de suporte *open-source*, possibilitou a disponibilização de diversas bibliotecas públicas, fruto da vasta comunidade que utiliza esta placa como meio principal de desenvolvimento das suas aplicações.

A gestão de dados só pode ser efectuada se houver monitorização de dados locais, tomada de decisão e actuação locais e comunicação externa. O Arduino UNO permite executar todas estas funções de e para vários pontos de referência, definidos como circuitos electrónicos periféricos que desempenham uma função específica. Neste caso, os pontos de referência são três: bloco de sensores, o Emissor e Receptor VLC.

No fórum dedicado ao Arduino [50], podem-se encontrar várias bibliotecas com inúmeros propósitos aplicáveis a diversas situações, que incluem as necessárias neste

sistema. Assim, neste programa em particular, foram usadas três bibliotecas: *digitalWriteFast* (*setup*, leitura e escrita rápida de portos), *SoftwareSerial* (transmissão e recepção série de dados) e *TimerOne* (funções que permitem a fácil programação e interação com o *Timer 1*).

### 4.2.1 Transmissão

Devido ao uso de luz visível como meio de comunicação, e de modo a evitar a sobreposição de sinais transmitidos simultaneamente, a comunicação vai ser executada em *half-duplex*. O diagrama de blocos da Figura 4.8 apresenta as rotinas e o modo como a transmissão de dados é executada.

A transmissão é iniciada através da chamada da função *mySerial.println(tx\_data)*, onde *tx\_data* é uma variável *string* (*char tx\_data[3]*). Quando o comando é invocado, o programa envia o pacote de dados terminado com *carrier return* (CR - 0x0D) e *line feed* ou *new line* (LF – 0x0A) com algumas dezenas de  $\mu$ s de intervalo. Ao atingir oito envios de pacotes, o programa atrasa a próxima transmissão, de modo a que os receptores tenham um intervalo de tempo para reenviar essa informação. As linhas de código utilizadas para a transmissão são apresentadas na Figura 4.9.

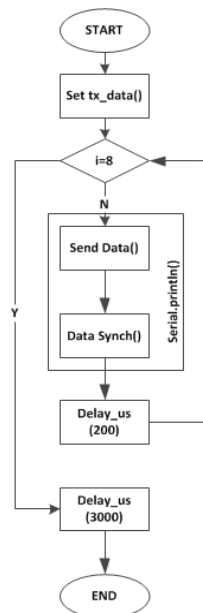


Figura 4.8: Diagrama de blocos da rotina de transmissão.

```

void loop() // run over and over
{
    .....
    tx_data[1] = DuCy; // Set Data
    tx_data[0] = header; // Set header
    mySerial.println(tx_data); // enviar dados para serial port
    delayMicroseconds(200);

    for( int i = 0; i < 8; i++); //ao fim de 8 tramas enviadas
    delayMicroseconds(3000); //atrasa 3 milisegundos
    .....
}
  
```

Figura 4.9: Código usado na rotina de transmissão.

## 4.2.2 Recepção

A rotina de recepção consiste em adquirir a informação enviada por um módulo emissor, que também inclui electrónica adicional descrita em 4.5. O diagrama de blocos da Figura 4.10 apresenta a ordem das rotinas e variáveis utilizadas na recepção de dados.

O programa fica à espera que o *buffer* de entrada sinalize que tem um caractere pronto a ser lido através do comando *mySerial.available()*. Tal como na rotina de transmissão, também na recepção existe um comando específico para leitura que, neste caso, é o *mySerial.read()*. Quando é detectado um carácter, compara-se com CR e LF e, se for igual, é ignorado. Caso contrário, se for diferente, os dados são guardados numa variável *string* (*char rx\_data[3]*). A variável do tipo *char rx\_process* sinaliza que *rx\_data* está pronto a ser processado e é definida após a recepção de *rx\_data[1]*. As linhas de código utilizadas para a recepção são apresentadas na Figura 4.11.

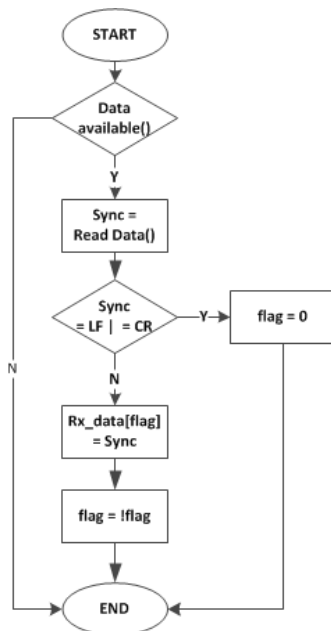


Figura 4.10: Diagrama de blocos da rotina de recepção.

```

void loop() // run over and over
{
    .....
    if (mySerial.available()){
        sync = mySerial.read(); // ler char
        if ((sync == 0x0A) | (sync == 0x0D))
            flag = 0;
        }
        else {
            rx_data[flag] = sync; // salvar rx chars
            if (flag == 1) rx_process = 1;
            flag = !flag;
        }
        ..... // processamento de rx_data
    }
}
  
```

Figura 4.11: Código usado na rotina de recepção.

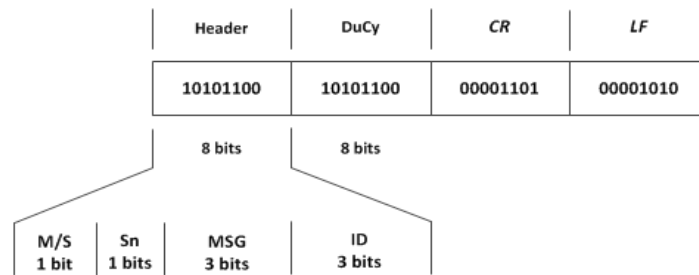


Figura 4.12: Sequência de transmissão e trama de dados.

### 4.2.3 Trama de dados

A sequência dos dados transmitidos é apresentada na Figura 4.12, assim como os *bits* correspondentes ao campo *header*. Em cada trama, a informação transmitida está dividida em quatro *bytes*, onde o primeiro diz respeito à informação do dispositivo que envia (*header*), o segundo é relativo ao valor do *duty-cycle*, o terceiro e o quarto referem-se ao *carriage return* e *line feed*, respectivamente.

O conteúdo do primeiro *byte* é constituído por quatro campos: i) *M/S*, tipo de dispositivo que originou a mensagem (0 – *Slave*, 1 – *Master*); ii) *Sn*, dispositivo que enviou a mensagem (0 – *Slave*, 1 – *Master*); iii) *MSG*, número da mensagem enviada (0..7); iv) *ID*, número de identificação do dispositivo, onde o *bit* mais à esquerda sinaliza o tipo de dispositivo que enviou mensagem e os restantes *bits* dizem respeito ao *CLASS ID*. Relativamente a este último campo, *CLASS ID*, foi assim definido de modo a sinalizar todas as *N* luminárias da mesma classe, estando limitado a quatro diferentes classes. Conceptualmente, a adaptabilidade torna-se maior sem aumento de complexidade do sistema. O *bit* 2 do campo *ID* também tem a função de testar a validade de informação, isto é, se o *bit* for diferente do *Sn*, o programa ignora a informação.

O segundo *byte* tem apenas um campo, *DuCy*, que representa o *duty-cycle* do sistema de iluminação a variar entre 0 e 100%, onde os quatro *bits* mais à esquerda definem as dezenas, e os restantes da direita definem as unidades.

### 4.2.4 Programa principal

Tal como foi referido anteriormente, na secção da arquitectura do sistema, existem dois tipos de dispositivos, *Master* e *Slave*, cujas diferenças físicas se resumem à ausência de sensores no módulo *Slave*. A Figura 4.13 pretende, assim, evidenciar as diferenças a nível de programação entre ambos, assim como fornecer uma visão geral do modo como a gestão de iluminação é efectuada.

Sempre que for detectada presença, o respectivo sensor emite um sinal que pode ser usado como *trigger* da *Interrupt Service Routine* (rotina de serviço à interrupção - *ISR*). Na respectiva *ISR*, a variável *LAST\_PRESENCE* salvaguarda o momento do primeiro acesso e actualiza-se nos subsequentes. Assim, é fácil verificar que no caso de um módulo *Slave*, *LAST\_PRESENCE* nunca vai ter outro valor para além de *NULL*. De seguida, o dispositivo fica à escuta, esperando que seja sinalizada a recepção de dados, tal como referido em 4.2.2. No caso de se obter a validação de dados, assim como a correcta certificação do *ID*, então o PWM é ajustado e os dados recebidos são retransmitidos. Se não for detectado o correcto *ID*, o PWM não é ajustado e a informação apenas é retransmitida, pois pode ser dirigida a um *Slave* que partilha o mesmo espaço, mas que é de uma classe diferente.

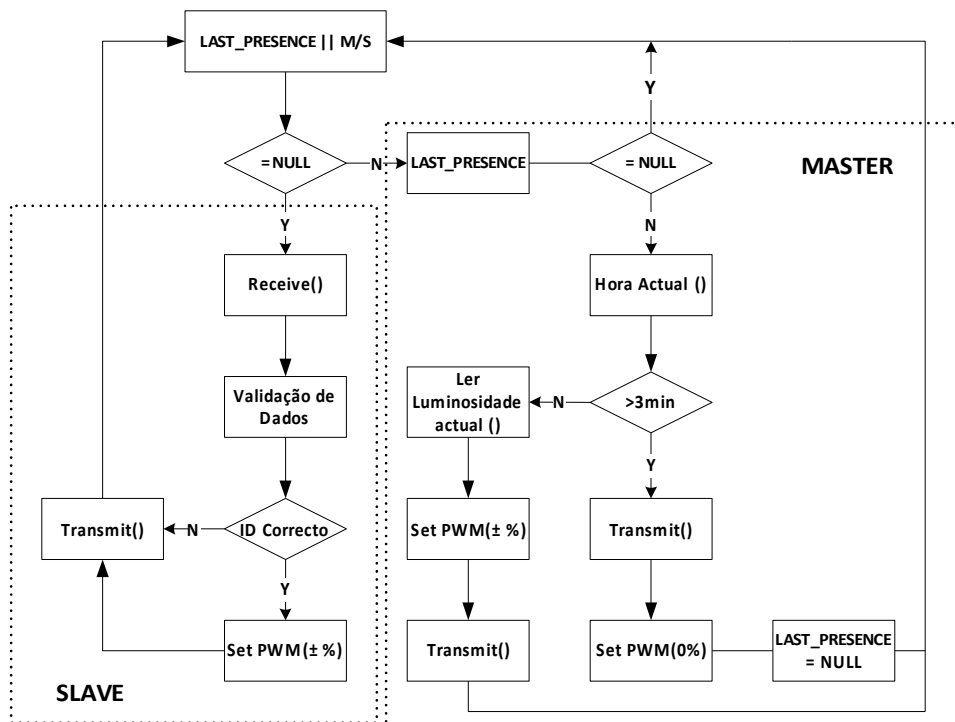


Figura 4.13: Rotina do programa principal.

Da mesma forma, o *Master* nunca chega a entrar no código correspondente ao *Slave*, devido ao tipo de dispositivo definido pela variável *M/S* e por *LAST\_PRESENCE*. Se *LAST\_PRESENCE* for diferente de *NULL*, o programa adapta-se à luminosidade através da leitura da luz ambiente e ajusta, se necessário, através do PWM. De seguida, transmite a ocorrência do novo evento. No caso de não ser detectado presença nos três minutos seguintes, o *Master* entra no modo de *stand-by*, transmite a mudança de estado, desliga as luminárias e faz *reset* a *LAST\_PRESENCE*.

### 4.3 Bloco de Sensores

O requisito mínimo para funcionamento correcto do sistema proposto obriga a que haja, pelo menos, um *Master* munido de dois tipos de sensores: luminosidade e presença. O sensor de luminosidade utilizado foi o SFH5711 da OSRAM, que disponibiliza um sinal analógico proporcional à luminosidade no meio. A leitura da luminosidade actual é facilmente conseguida através do código apresentado na Figura 4.14, cuja fórmula foi retirada do *datasheet* do fabricante. A leitura analógica é executada através do comando *analogRead(light\_pin)*, enquanto *map* e *pow* são comandos disponíveis na linguagem de programação do Arduino.

```
prsr_read = pow(10, map(analogRead(light_pin), 0, 675, 0, 3300) / (float) 680);
```

Figura 4.14: Cálculo da luminosidade ambiente.

No caso da detecção de movimento, foi escolhido o PIR 555-28027 da PARALLAX, pois já tem incluída uma saída digital, que muda de estado quando

detectar presença. O código apresentado na Figura 4.15 desliga o detector de presença nos 15 segundos seguintes após a última actualização, de forma a evitar excesso de processamento.

```

void loop()          // run over and over
{
    GAP_TIME = millis() - LAST_PRESENCE;
    // turn ON presence interrupt after 15 seconds
    if ((GAP_TIME >= 15000) & (LAST_PRESENCE != NULL))
        attachInterrupt(INT_0, PRESENCE, RISING);
    .....
}

void PRESENCE()
{
    LAST_PRESENCE = millis(); // last access
    .....
    detachInterrupt(INT_0); // turn off PRESENCE interrupt
}

```

Figura 4.15: Rotina de interrupção do sensor de movimento.

#### 4.4 Emissor VLC

O Emissor VLC é um transdutor opto-electrónico, que transmite informação através de ondas de luz visível e usa o ar como meio de propagação. A função deste dispositivo consiste em aproveitar as necessidades de iluminação para também comunicar, tendo HB-LEDs como fontes de iluminação. Os sistemas VLC tornaram-se uma tecnologia viável na comunicação sem fios, devido aos desenvolvimentos tecnológicos recentes em tecnologia LED.

Para além disso, o sistema deve ser projectado de forma a haver possibilidade de aumentar os níveis de iluminação quando as lâmpadas perdem eficácia, devido à acumulação de horas de funcionamento. Através do uso de luminárias mais potentes, é possível compensar a degradação das luminárias aumentando parcialmente, e ao longo do tempo os níveis de corrente, sem perda de conforto visual. Assim, para além de se obterem níveis de luminosidade adequados, também resulta em tempos de vida mais longos.

Os blocos principais do emissor VLC proposto estão representados na Figura 4.16. O *LED Array* é o responsável pela iluminação e deve ser dimensionado de modo a permitir um conforto visual aos utilizadores, segundo as normas vigentes para iluminação em interiores.

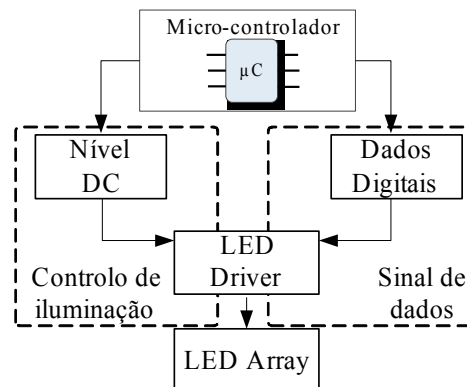


Figura 4.16: Diagrama de blocos do emissor VLC.

O LED *Driver* deve estar preparado para suportar o aumento de corrente de polarização, de modo a compensar a quebra de luminosidade por degradação dos LEDs ou a avaria permanente de um deles. Tem conectado dois blocos distintos, responsáveis pelo controlo de iluminação e pelo sinal de dados, respectivamente. A corrente é controlada por um transistor bipolar e uma resistência, dimensionados de acordo com os requisitos do LED *Array*.

De acordo com a Figura 4.16, o braço esquerdo gera um nível DC por intermédio de um filtro passa-baixo (FPB), de que resulta a iluminação necessária e suficiente. Do lado direito, deriva o sinal de dados previamente codificado em código Manchester originado pelo microprocessador, que permite gerar uma corrente que é adicionada à corrente do braço esquerdo. Através de uma resistência maior, a corrente total do *driver* mantém-se em intervalos controlados, que provoca variações na luminosidade imperceptíveis aos olhos humanos, mas visíveis pelos receptores ópticos.

#### 4.4.1 Luminárias

O elemento responsável pela iluminação ambiente é o LED *Array*. Nesta altura, deve ser salientado que os circuitos desenvolvidos foram construídos para uma escala bastante inferior à real e, conseqüentemente, ignoram as normas de iluminação. Sem um estudo fotométrico aprofundado relativo às necessidades de iluminação, qualquer luminária pode ser ineficiente, causando desconforto visual e até danos físicos. Como a luminotecnica está fora do âmbito deste trabalho e dos objectivos a atingir, este elemento é apenas projectado de modo a que seja possível a comunicação e iluminação simultâneas.

O LED escolhido para esta função foi o *LCW JNSH.PC - Duris E3 Power Champ* da OSRAM. Das características descritas no *datasheet*, as mais relevantes e importantes para o dimensionamento do *driver* são:  $I_F @test$  é 20mA, sendo que a  $I_{Fmax}$  é 30mA e  $V_F @test$  é de 3.05V. Outras características relevantes, que também afectam o comportamento e a distância máxima à qual o receptor pode estar colocado, são a intensidade luminosa *@test* de 7.4lm e CCT de 5000K. Assim, foi esboçado um LED *Array*, segundo uma configuração mista apresentada na Figura 4.17 .

#### 4.4.2 Nível DC

Este bloco é o responsável pela iluminação que pode ser controlada através da imposição de uma tensão constante aos terminais do *driver* de modo a que se obtenha corrente constante no LED *Array*. A forma mais simples de o conseguir é através de um filtro passa-baixo, cujo circuito é apresentado na Figura 4.18.

Para que o resultado obtido seja uma tensão constante é necessário que a frequência de corte seja, no mínimo, menor que metade da frequência do sinal PWM.

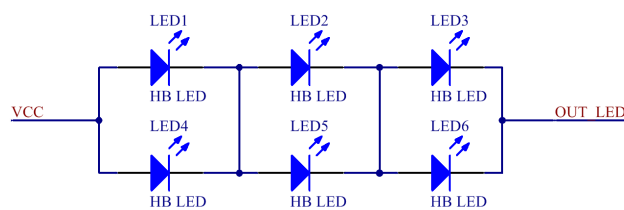


Figura 4.17: Array de LEDs 3x2.

Assim, através da equação (4.1) é possível calcular os valores de  $R_1$  e  $C_1$  que satisfazem a frequência de corte desejada.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (4.1)$$

Por conseguinte, de modo a obter um valor DC estável, com pouca variação, de um sinal PWM de 250kHz, a frequência de corte do filtro definida foi 2.4kHz. Os valores calculados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores dos elementos utilizados na DAC.

$f_c$ [kHz]	$R_1$ [k $\Omega$ ]	$C_1$ [nF]
2.4	10	6.8

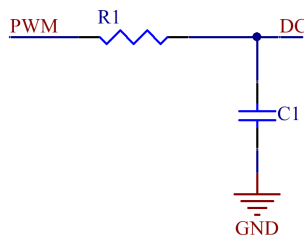


Figura 4.18: Filtro Passa-Baixo.

O passo seguinte foi simular o circuito através do PSpice, cujo resultado se encontra exposto na Figura 4.19. A frequência do sinal do PWM é de 250kHz, com um *duty-cycle* de 60%, 50% e 25% a que correspondem 3V, 2.5V e 1V, respectivamente.

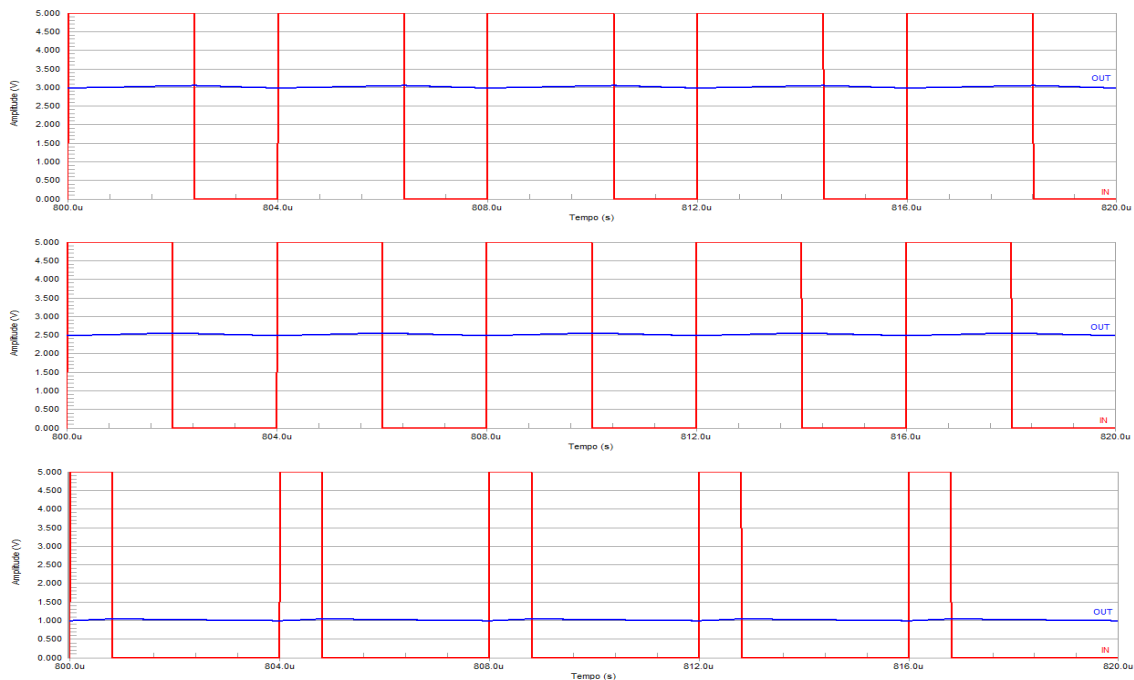


Figura 4.19: Simulação do sinal PWM mais filtro.



### 4.4.3 Emissor de Dados

A função deste circuito, apresentado na Figura 4.20, é gerar um sinal de dados com a mesma amplitude, independentemente do nível DC necessário à iluminação.

Como o sinal de dados  $V_s$ , proveniente do microcontrolador, varia entre 0 e  $V_{CC}$  (+5V) e este circuito obriga a que  $V_s$  não possa variar entre 0 e  $V_{CC}$ , é necessário inserir um divisor resistivo formado por  $R_2$  e  $R_1$ . O sinal resultante deve ter uma excursão de sinal de algumas dezenas de mV.

Os transístores  $Q_1$  e  $Q_3$  formam um par diferencial cujas tensões de *bias* são distintas o que provoca um aparente alargamento do pulso em  $V_t$ , devido à saturação dos transístores não ocorrer nos mesmos valores de tensão. Assim, foi necessário inserir electrónica adicional de modo a somar ambos os sinais o de forma a obter  $V_s$  com nível DC igual a  $V_{BQ3}$ . Como U2D está numa configuração não-inversora foi essencial ajustar  $R_5$  de modo a obter o efeito pretendido. A tensão na base do transístor  $Q_1$  é dada assim, pela expressão 4.2.

$$V_{BQ1} = V_s \frac{R_2}{R_2 + R_1} + V_{CC} \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \quad (4.2)$$

A corrente que atravessa  $Q_2$ , é imposta por um espelho de corrente e definida através da expressão 4.3, onde  $V_{DC}$  é o sinal resultante do circuito da subsecção anterior.

$$I_{R_7} \approx I_{CQ_2} = \frac{V_{DC} - V_{BEQ_4}}{R_7} \quad (4.3)$$

Por fim, a expressão do sinal  $V_t$ , definida pela expressão 4.4, resulta que o ganho é dependente de  $R_L$ , sendo necessário posterior ajustamento.

$$V_t = \frac{g_m R_L}{2} V_s = \frac{1}{2} \frac{I_{CQ_2}}{V_T / q} R_L V_s \quad (4.4)$$

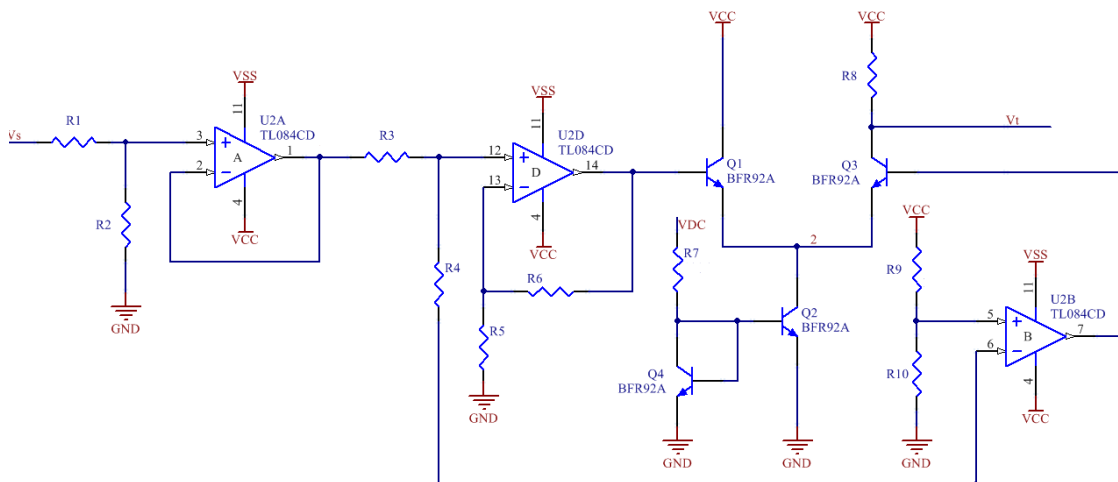


Figura 4.20: Circuito Emissor de dados.

Tabela 4.2: Valores dos elementos utilizados no Emissor de dados.

$V_{CC}$ [V]	$V_{SS}$ [V]	$R_1$ [k $\Omega$ ]	$R_2, R_3, R_4, R_6, R_9, R_{10}$ [k $\Omega$ ]	$R_5$ [k $\Omega$ ]	$R_7$ [ $\Omega$ ]	$R_8$ [k $\Omega$ ]
5	-5	9.1	1	1.2	910	6.2

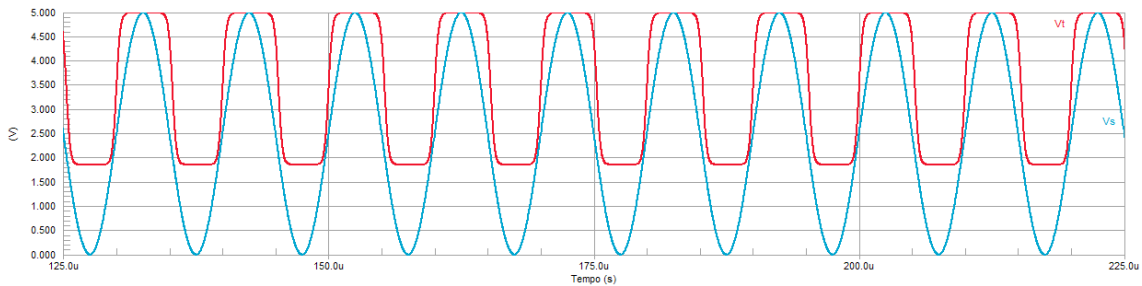


Figura 4.21: Segmento de dados.

O passo seguinte foi simular o circuito através do PSpice, utilizando para tal os valores da Tabela 4.2, de que resultou a forma de onda exposta na Figura 4.21. O sinal de entrada  $V_s$  consiste numa onda sinusoidal com amplitude e *offset* de 2.5V. O circuito foi simulado para vários valores de  $V_t$ , tendo-se obtido, em qualquer um dos casos testados, a mesma forma de onda visível na figura.

#### 4.4.4 Driver VLC

A função deste módulo consiste em impor valores de corrente que permitam controlar a luminosidade da luminária, ao mesmo tempo que permite a comunicação.

Baseado no circuito conceptual da Figura 2.12, o circuito da Figura 4.22 expõe o circuito projectado, onde *OUT\_LED* corresponde à luminária da Figura 4.17, *DC* diz respeito ao nível DC representado na Figura 4.18 e  $V_t$  definido pela emissão de dados da Figura 4.20.

A característica mais importante deste circuito reside nos valores que as resistências  $R_1$  e  $R_2$  podem ter, de modo a que seja obtida a luminosidade pretendida enquanto é feita a transmissão de dados. Tendo em conta que o braço dominante é o correspondente ao nível DC (U1B e Q2),  $R_1$  deve ter um valor mais baixo para que a corrente que a percorre seja maior que em  $R_2$ .

De modo a determinar a influência das resistências nos LEDs, foi fixado um valor de  $R_1$  de 10 $\Omega$  e procedeu-se à simulação em PSpice do controlador VLC. O sinal está pré-codificado em código Manchester e o nível DC é de 2V. A variação da corrente

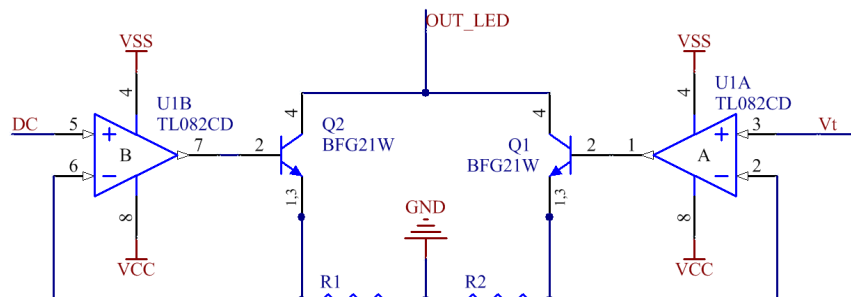


Figura 4.22: Controlador VLC.

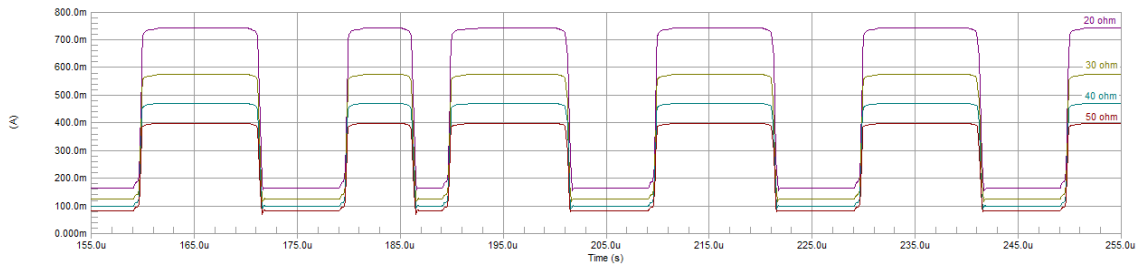


Figura 4.23: Corrente de *drive* em *OUT\_LED* em função de  $R_2$ .

em *OUT\_LED* em função de  $R_2$  é apresentada na Figura 4.23.

Da análise da figura, podem-se tirar duas conclusões: a primeira, e mais óbvia, é que a excursão do sinal *OUT\_LED* é tanto maior quanto menor for  $R_2$ ; a segunda, não tão aparente, é que, se o nível DC for demasiado baixo, a corrente dominante passa a ser definida pelo braço direito. Uma forma de evitar a basculação da corrente dominante entre braços é aumentar  $R_1$ , sem que  $R_2$  perca a proporcionalidade relativa a  $R_1$ , no entanto, esta solução aumenta o consumo de energia, devido à potência dissipada pela resistência de *drive*. A outra solução é forçar o nível DC a um mínimo.

Até esta altura, foi apenas apresentada a equação que permite calcular o valor das resistências de *drive* (eq. 2.1). O cálculo das resistências depende de dois valores: o  $V_{BE}$  dos transístores ( $\sim 1$  V, segundo o *datasheet*) e a  $I_{LED@test}$  ( $2 \times 20$  mA), pois a luminária é um *array* de  $3 \times 2$ . O primeiro permite identificar a tensão máxima no emissor dos transístores ( $\sim 4$  V), enquanto o segundo permite determinar a corrente em cada braço, ou seja:  $I_{LED} = I_{R1} + I_{R2}$ . Como  $I_{R1}$  é o braço dominante, impõe-se uma corrente máxima de 30 mA enquanto  $I_{R2}$  fica limitada a 10 mA (razão 3/1).

$$R_1 = \frac{V_{DC} - V_{BE}}{I_{R1}} = 133 \Omega \quad R_2 = \frac{V_{DC} - V_{BE}}{I_{R2}} = 400 \Omega$$

Como a série E24 não inclui os valores exactos das resistências calculadas, foi necessário ajustamento, tendo-se usado  $R_1 = 130 \Omega$  e  $R_2 = 390 \Omega$ . Estes valores permitem uma corrente máxima a rondar os 41 mA, um valor marginalmente superior ao pretendido, mas que não põe em risco a luminária. No caso de não se pretender ultrapassar a corrente de polarização, o nível DC pode ser controlado através da programação por *software* do *duty-cycle* máximo do microcontrolador evitando-se assim o funcionamento dos LEDs acima de  $I_F@test$ .

De seguida procedeu-se à simulação em PSpice do circuito, tendo sido utilizado para tal, o mesmo sinal de dados da Figura 4.23. Como não estava disponível o modelo de simulação do LED escolhido, foi utilizado um modelo de diodo normal. Como tal, as correntes da Figura 4.24 expõem o resultado da simulação para as tensões 1V, 2V e 4V.

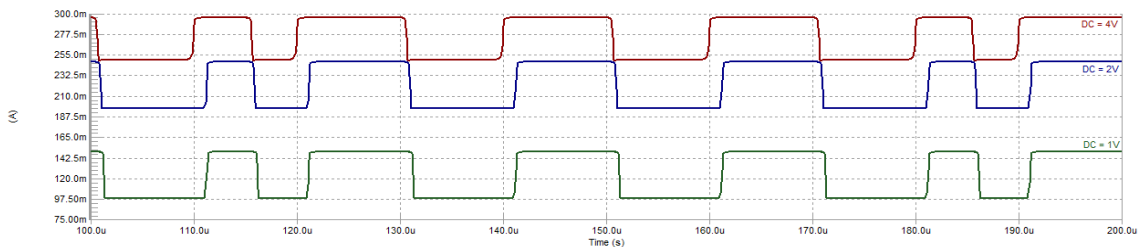


Figura 4.24: Sinais DC e de dados combinado.

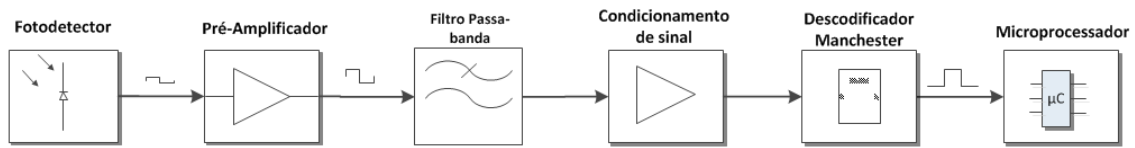


Figura 4.25: Diagrama de blocos do Receptor VLC.

## 4.5 Receptor VLC

O receptor VLC consiste em um fotodiodo que recebe informação, previamente codificada no espectro da luz visível, e converte num sinal eléctrico, capaz de ser processado. O projecto deste módulo é crucial para o bom funcionamento do sistema visto como um todo, pois dele depende a correcta aquisição dos dados previamente transmitidos. Entre os factores mais preocupantes, encontram-se os sinais de baixa amplitude devido, atenuação dos sinais e interferência devido à luz ambiente.

Os blocos principais de um receptor VLC estão representados na Figura 4.25. O receptor óptico usa um fotodiodo inversamente polarizado, de modo a converter o sinal de luz visível num sinal eléctrico. Desta maneira, o sinal resultante do fotodiodo é uma corrente de pequena excursão proporcional à luz colectada. Como este sinal não tem uma grande amplitude e é sujeito a várias fontes de ruído, são necessários vários blocos de amplificação e filtragem. De salientar que, antes do sinal ser aplicado ao pré-amplificador e ao filtro passa-banda, é feita filtragem de DC, de modo a não saturar os andares de amplificação.

De seguida, surge o pré-amplificador, cuja função é converter a corrente do fotodiodo numa voltagem e amplificá-lo. A função do filtro passa-banda é reduzir as componentes das altas e baixas frequências. O último estado de amplificação, é baseado num detector de média e comparador permitindo assim a limitação da excursão máxima de sinal. Nesta fase, o sinal é quase digital, já que são esperados tempos de descida e de subida do sinal de entrada muito inferiores, quando comparados com o tempo em que a tensão mínima e máxima se mantêm constantes.

De seguida, é efectuada a operação inversa da realizada no emissor, ou seja, descodificar o sinal Manchester, resultando num sinal NRZ que, por sua vez, é enviado para a unidade de controlo que trata os dados recebidos.

### 4.5.1 Fotodetector

O fotodetector é o bloco responsável pela conversão do sinal de luz visível num sinal eléctrico, cuja representação se encontra na Figura 4.26. O elemento mais importante é um fotodiodo, que não é mais que uma junção semicondutora que foi optimizada para detecção e conversão de potência óptica em corrente eléctrica. Os fotodiodos podem operar no modo fotovoltaico, assim denominado devido ao comportamento similar ao das células solares que, quando iluminadas, geram uma voltagem aos seus terminais. Neste modo de operação, directamente polarizados, existe uma dependência linear de luz incidente. No entanto, o alcance dinâmico e a velocidade

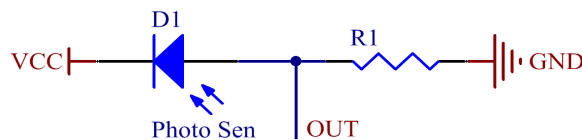


Figura 4.26: Fotodetector.

são muito limitados. Por esse motivo, usualmente, fotodíodos neste modo de operação, não são empregues em aplicações que envolvem comunicação.

No modo fotocondutivo, o dispositivo encontra-se inversamente polarizado. Assim, quando incidir luz, uma corrente eléctrica flui através do fotodíodo. Esta corrente tem uma dependência linear de algumas ordens de magnitude relativamente à intensidade de luz incidente. Um fotodíodo PIN consegue detectar sinais ópticos de alguns nW, até umas dezenas de mW. Apesar de uma voltagem inversa elevada não influenciar a foto corrente induzida, reduz a capacidade da junção do dispositivo, resultando assim numa maior largura de banda [16].

No modo de operação mais comum, e também usado neste trabalho, o díodo é polarizado inversamente e, na ausência de luz, a corrente é residual (denominada corrente negra). Os fotodíodos são usados extensivamente em aplicações que dependem da detecção de luz, pois são baseados, entre outros, em díodos PIN, cuja principal característica é o aumento da eficiência, devido ao aumento da espessura da zona de depleção, resultando na redução da capacidade do díodo. Assim, este tipo de díodo, quando associado a um amplificador de alta velocidade, pode atingir uma largura de banda elevada e ruído reduzido, usando apenas uma pequena voltagem de polarização [16].

A corrente negra é a corrente que flui através do fotodíodo no modo fotocondutivo, quando não existe luz incidente. Representa uma fonte importante de ruído e deve ser minimizada, o mais possível, em sistemas de fibra óptica [16]. No entanto, em comunicações no espaço livre os níveis de luz da iluminação do sinal e luminosidade presentes no espaço sobrepõem-se ao efeito da corrente negra.

A escolha de fotodíodos que se adequam à comunicação por luz visível é baseada na tese de Mestrado de Nuno Lourenço [28], mais especificamente, na secção IV.ii. Nessa secção, é referido que os elementos VTH2091 da EG&G Vactec e o BPW34S da OSRAM são duas soluções equilibradas, com a primeira a ter uma maior área activa, enquanto a segunda tem uma menor capacidade de junção. Neste trabalho, a escolha recaiu sobre a última alternativa, pois, para além da menor capacidade de junção indicativa de transições mais rápidas de sinal, também tem uma melhor resposta no espectro de luz visível, comparativamente ao VTH2091.

#### 4.5.1.2 Modelo do fotodíodo PIN

A Figura 4.27 representa o modelo eléctrico equivalente de um fotodíodo [15], pois nenhuma das empresas fornece modelos SPICE ou equivalentes de qualquer um dos fotodíodos propostos. Para a maior parte dos díodos  $R_s$  é da ordem das dezenas de ohms, e  $R_{sh}$  da ordem dos  $M\Omega$ , o que os torna irrelevantes, portanto, consideram-se  $R_s=0$  e  $R_{sh}=\infty$ . A corrente do díodo é tão pequena que pode ser ignorada. Por tal, o modelo

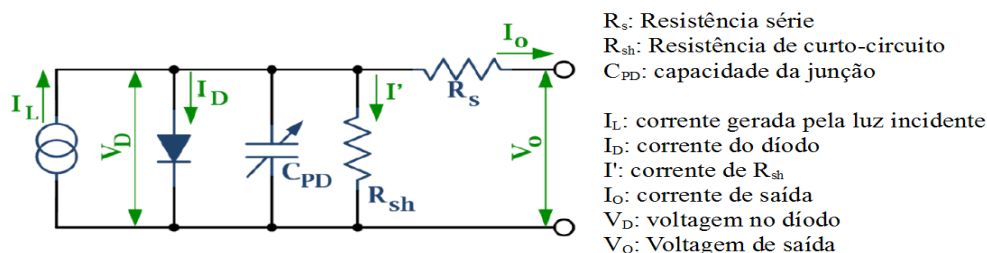


Figura 4.27: Modelo eléctrico equivalente do fotodíodo [28].

simplificado é uma fonte de corrente em série com  $C_{PD}$ .

De modo a completar o modelo SPICE, resta incluir as características do  $C_{PD}$ , recorrendo ao *datasheet* do fabricante. A capacidade de junção à tensão inversa de  $V_{CC}$  estima-se que seja  $C_{PD} = 22\text{pF} @ V_R=5\text{V}$ .

#### 4.5.2 Pré-Amplificador

O amplificador de entrada é de importância crítica no que diz respeito à aquisição do sinal detectado pelo fotodetector, pois está muito dependente do *Gain-bandwidth Product* (produto ganho largura de banda - GBW) do circuito de entrada [28]. De modo a maximizar a detecção do sinal óptico são necessárias áreas fotosensíveis de que resultam capacidades intrínsecas, aumentando assim a constante de tempo. Existem duas formas de diminuir esta constante de tempo: adquirir um fotodetector com menor capacidade de junção ( $C_{PD}$ ) intrínseca ou reduzir a impedância de entrada do amplificador. Por conseguinte, a maneira mais simples de executar essa tarefa é através do uso de um amplificador operacional numa configuração de transimpedância (ou transresistência), representado na Figura 4.28. O objectivo deste pré-amplificador, é assim, transformar a corrente proveniente do fotodíodo e convertê-lo em tensão.

No caso dos amplificadores operacionais, projectados para ter um único pólo na resposta em frequência, o GBW é independente do ganho onde este é medido. Por conseguinte, o GBW é definido como a largura de banda do amplificador com ganho unitário. Consultando o *datasheet* do fabricante do LMH6724MA, verifica-se que este tem um GBW de 370MHz, o que é mais que suficiente para, com a ajuda de uma malha de realimentação, obter ganhos consideráveis.

A malha de realimentação, constituída por  $R_1$  e  $C_2$ , é responsável pelo ganho e estabilidade do amplificador. Na gama das médias frequências, o ganho vai ter, aproximadamente, o valor de  $R_1$ .

De modo, a obter estabilidade no circuito,  $C_2$  toma um valor da ordem dos pF. Procedeu-se à simulação do circuito, cujos resultados são apresentados na Figura 4.29. Nesta figura, estão representadas a resposta em frequência e a fase do circuito da Figura 4.28, para valores de  $C_2$  distintos e com  $R_1=10\text{k}\Omega$ . O condensador  $C_1=22\text{nF}$  tem como função filtrar a componente DC.

Da análise do gráfico, Figura 4.29, pode-se concluir que o ganho de 80dB coincide com o valor de  $R_1$ . Relativamente a  $C_2$ , verifica-se que à medida que este aumenta, a largura de banda diminui. Tendo em conta que o nível de entrada se parecerá com uma onda quadrada, o amplificador necessita de mais largura de banda (estima-se

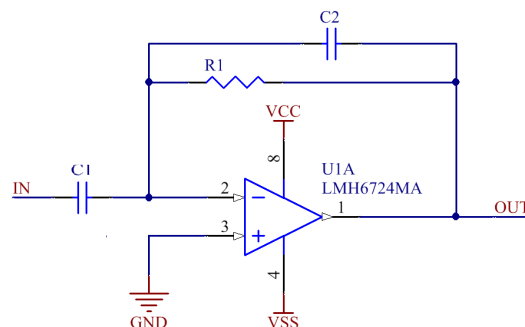


Figura 4.28: Amplificador de Transimpedância.

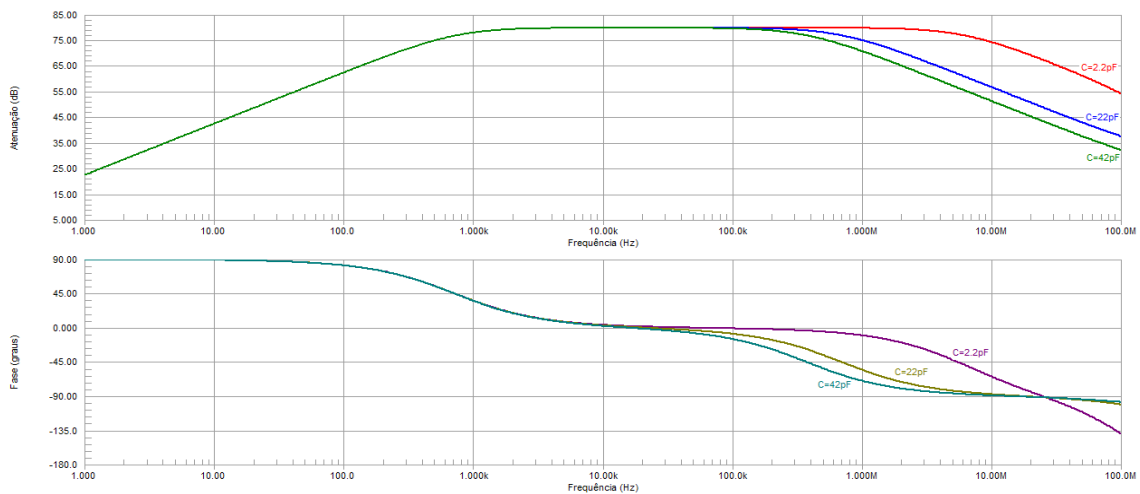


Figura 4.29: Resposta em fase e frequência ( $V_{OUT}/I_{IN}$ ).

$\sim 10x$  superior) que a frequência de transmissão, de modo a não influenciar as transições entre *bits*. Assim, tendo em conta o que foi dito anteriormente,  $C_2$  deve ter um valor compreendido entre 2.2 e 22 pF.

### 4.5.3 Andar de Filtragem

Este bloco consiste num filtro passa-banda que se obtém dispondo em cascata um filtro passa-alto e um filtro passa-baixo. Ambos os filtros foram projectados com a ajuda do programa da *Texas Instruments Filter Pro*<sup>TM</sup> v3.1.0.23446 [20] que oferece muitas opções no que diz respeito ao tipo de filtro, tipo de circuito, parâmetros comuns e escolha dos valores dos componentes discretos, consoante a série utilizada (neste, caso E24 para as resistências e E12 para os condensadores).

#### 4.4.3.1 Filtro Passa-Alto (FPA)

O filtro passa-alto foi introduzido de modo a eliminar as componentes de baixa frequência, tais como os 50Hz da rede eléctrica nacional, 100Hz e as primeiras harmónicas (200Hz, 300Hz, etc.), resultantes do *flickering* das lâmpadas fluorescentes [32].

De modo a obter uma resposta plana na banda de passagem, foi implementado um filtro de 3ª ordem com ganho unitário, numa configuração Sallen-Key. Este circuito foi projectado de modo a ter a frequência de corte de 1kHz ( $f_L$ ) e de forma a não afectar a largura de banda do receptor óptico. O circuito resultante, descrito na Figura 4.30, os

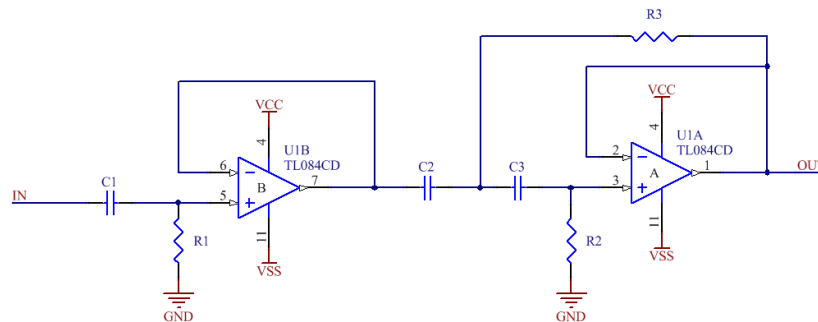


Figura 4.30: Filtro Passa-alto de 3ª ordem.

Tabela 4.3: Valores dos elementos utilizados no Filtro Passa-alto.

$V_{CC}$ [V]	$V_{SS}$ [V]	$C_1$ [nF]	$C_2, C_3$ [nF]	$R_1, R_2$ [k $\Omega$ ]	$R_3$ [k $\Omega$ ]
5	-5	10	18	16	3,9

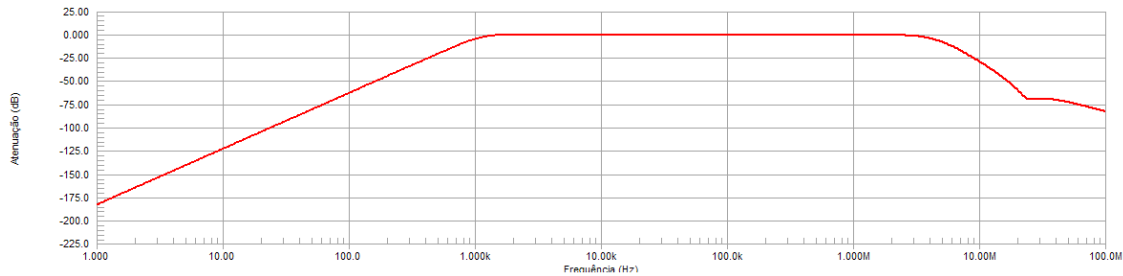


Figura 4.31: Resposta em frequência do filtro passa-alto ( $V_{OUT}/V_{IN}$ ).

valores dos componentes utilizados para simulação, da Tabela 4.3, e o amplificador operacional da TEXAS TL084 foram simulados usando o PSpice.

O resultado da simulação é exposto na Figura 4.31, sob a forma da resposta de frequência ( $V_{OUT}/V_{IN}$ ).

#### 4.5.3.2 Filtro Passa-Baixo (FPB)

O filtro passa-alto foi introduzido de modo a eliminar as componentes de alta frequência presentes nas simulações iniciais efectuadas. Tal como no filtro passa-alto, foi implementado um filtro Butterworth com ganho unitário numa configuração Sallen-Key. As únicas diferenças residem na frequência de corte 2.5MHz ( $f_H$ ) e na ordem do filtro, que neste caso é de 2ª ordem. O circuito resultante, descrito na Figura 4.32, os valores dos componentes utilizados para simulação da Tabela 4.4 e o amplificador operacional da TEXAS TL084 foram simulados usando o PSpice. O resultado da simulação é exposto na Figura 4.33, sob a forma da resposta de frequência ( $V_{OUT}/V_{IN}$ ).

Tabela 4.4: Valores dos elementos utilizados no Filtro Passa-baixo.

$V_{CC}$ [V]	$V_{SS}$ [V]	$C_4$ [pF]	$C_5$ [pF]	$R_4$ [k $\Omega$ ]	$R_5$ [k $\Omega$ ]
5	-5	10	22	3	5,6

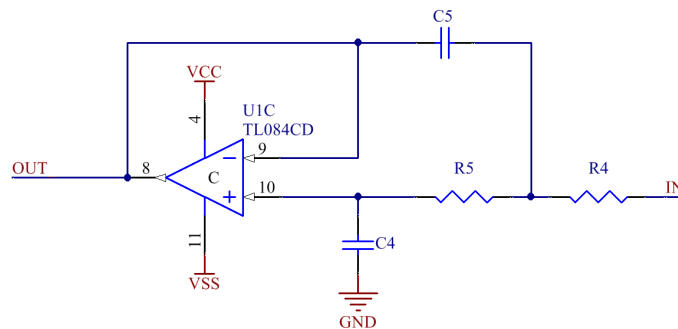


Figura 4.32: Filtro Passa-baixo de 2ª ordem.



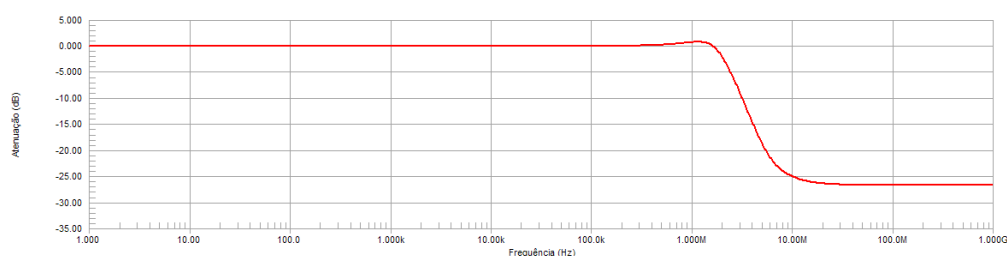


Figura 4.33: Resposta em frequência do filtro Passa-baixo ( $V_{OUT}/V_{IN}$ ).

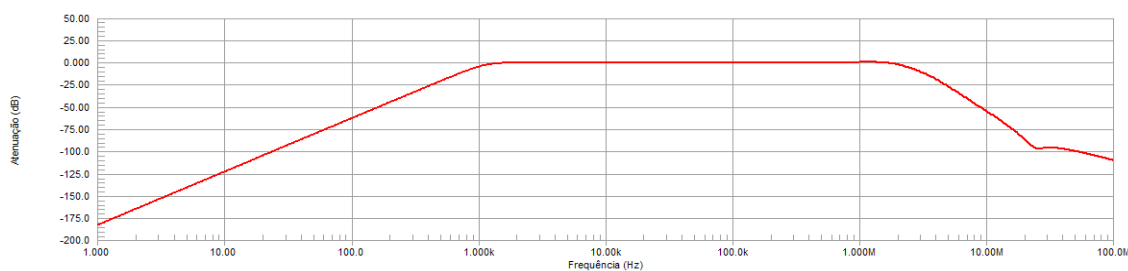


Figura 4.34: Resposta em frequência do filtro Passa-Banda ( $V_{OUT}/V_{IN}$ ).

#### 4.5.3.3 Filtro Passa-Banda

O filtro passa-banda é constituído pelo FPB a preceder o FPA. A resposta em frequência dos filtros é apresentada na Figura 4.34.

A combinação dos dois filtros resulta numa frequência de corte inferior ( $f_L$ ) de 1.1kHz e uma frequência de corte superior ( $f_H$ ) de 2.125MHz. Na banda de passagem, o ganho é unitário e sem oscilações aparentes. Fora da banda de passagem, a atenuação mínima é de 60dB/década.

#### 4.5.4 Condicionamento de sinal

A função deste andar consiste em obter o nível médio do sinal, independentemente do sinal de saída do TIA. Assim, através de uma simples comparação, a saída do amplificador fica saturada perto de  $V_{CC}$  e  $V_{EE}$ .

Assim, foi projectado o circuito da Figura 4.35 que consiste em dois detectores de pico, positivo e negativo. O circuito calcula o valor médio através da soma dos sinais resultantes da rectificação positiva e negativa do sinal de entrada  $IN$ . Os condensadores inseridos no circuito permitem a obtenção de um valor médio com poucas oscilações.

De modo a proceder à simulação do circuito por intermédio do PSpice, foram

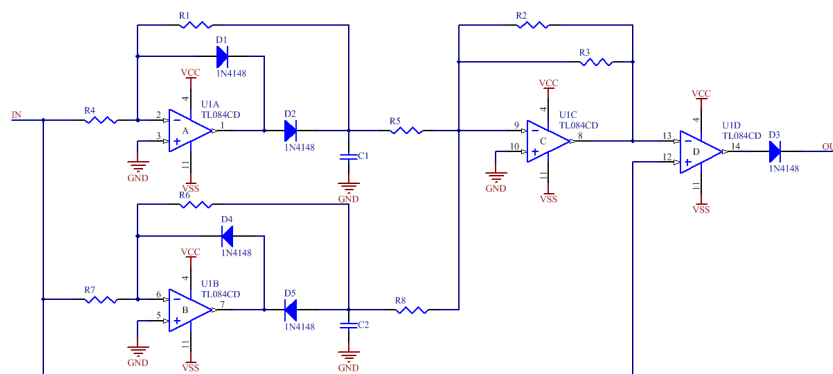


Figura 4.35: Circuito de condicionamento de sinal.

Tabela 4.5: Valores dos elementos utilizados no condicionamento de sinal.

$V_{CC}$ [V]	$V_{SS}$ [V]	$C_1, C_2$ [ $\mu$ F]	$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_6, R_7, R_8$ [k $\Omega$ ]
5	-5	47	1

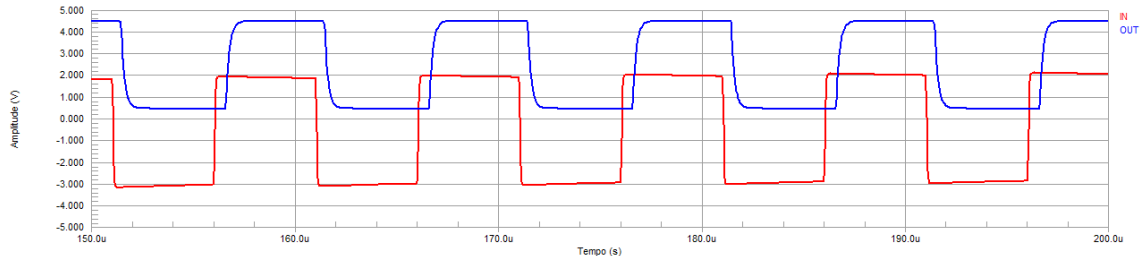


Figura 4.36: Forma de onda do condicionamento de sinal.

calculados valores para todos os elementos, cujo sumário se encontra na Tabela 4.5. O passo seguinte consiste na simulação do circuito, cujo resultado se encontra na Figura 4.36 onde *IN* e *OUT* referem-se ao sinal de entrada e saída do circuito, respectivamente.

Tal como todos os microcontroladores, o Arduino UNO consegue ler sinais digitais nas suas entradas, desde que a voltagem para cada um dos estados possíveis atinja o valor mínimo ou máximo, no caso de serem *HIGH* ou *LOW*, respectivamente. Através da consulta do *datasheet* verificou-se que estes valores devem ter o valor mínimo de  $\sim 3V$  no caso de *HIGH*, e valor máximo de  $1.5V$  no caso de *LOW*. Assim, foi adicionando à saída um diodo (D3), cuja função é limitar os valores dos sinais a níveis identificáveis pelo microcontrolador, de modo a que, posteriormente, este possa processar os sinais.

#### 4.5.5 Descodificador

O sinal de entrada deste bloco corresponde ao sinal de saída do circuito de condicionamento de sinal que é um sinal digital, isto é, cujos valores de tensão máximo e mínimo se situam perto dos valores correspondentes a '0' lógico (0V) e '1' lógico (5V).

A influência de cada *bit* é aleatória, contudo a duração de cada *bit* é fixa, de onde se pode concluir que a taxa de transmissão é fixa. Esta última característica é resultante da codificação Manchester, que transforma um *bit* NRZ, '0' ou '1' em dois *bits*, '01' e '10' respectivamente, com um *duty-cycle* fixo de 50%.

A Figura 4.37 tem representado o diagrama de blocos conceptual do decodificador constituído por três blocos: sincronização de dados, um bloco de decodificação e uma *Phased-locked loop* (PLL).

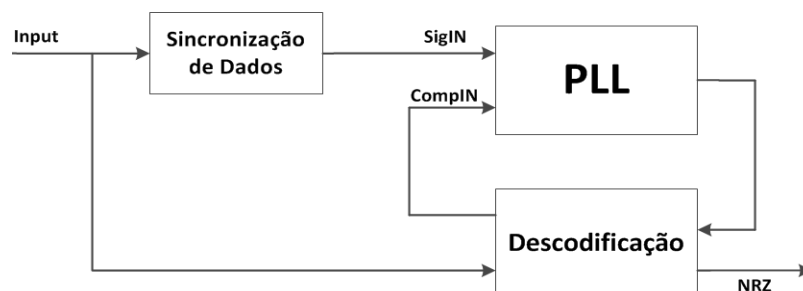


Figura 4.37: Diagrama de blocos do decodificador.

A sincronização de dados é efectuada através da detecção da frequência do sinal de entrada, no entanto, é necessário um sinal de relógio síncrono com a mesma taxa de transmissão do sinal de entrada. Ou seja, o sinal de relógio tem que ser derivado do sinal de entrada. A frequência do sinal é determinada pelas transições positiva ou negativa do sinal, todavia, independentemente da direcção, ambas são necessárias para recuperação do relógio.

O bloco de descodificação consiste num diagrama de estados que, através da PLL, permite a descodificação do sinal de entrada de forma a se obter na saída um sinal NRZ.

#### 4.5.5.1 PLL

Uma PLL consiste em um sistema de controlo que gera um sinal de saída, cuja fase está relacionada com um sinal de entrada de referência. É um circuito electrónico que se baseia num oscilador de frequência variável (*Voltage Controlled Oscillator* - VCO) e detector de fase (Comparador), tal como se verifica na Figura 4.38. Este circuito compara a fase do sinal de entrada com a fase do sinal derivado da saída do oscilador e ajusta a frequência do respectivo oscilador, de modo a que ambas as fases estejam sincronizadas. O sinal do detector de fase é usado para controlar o oscilador numa malha de realimentação.

Quando não é aplicado qualquer sinal à PLL,  $V_e(t)$  à saída do comparador de fase é zero, logo  $V_d(t)$  do filtro passa-baixo também é zero, o que resulta no VCO a operar a uma frequência central ( $f_0$ ). Quando é aplicado um sinal de entrada  $V_s(t)$  à PLL, o comparador de fase compara a fase e a frequência do sinal de entrada com a frequência do VCO e gera uma tensão de erro  $V_e(t)$  proporcional à diferença entre o sinal de entrada e o VCO. A tensão de erro é filtrada e aplicada à unidade de controlo do VCO.  $V_d(t)$  varia numa direcção em que reduz a diferença de frequência entre o VCO e a frequência do sinal de entrada. Quando a frequência do sinal de entrada está suficientemente perto da frequência do VCO, a natureza da malha fechada da PLL força o VCO a sincronizar com o sinal de entrada, excepto por uma diferença de fase finita. Assim, a frequência de bloqueio ( $2f_L$ ) é definida como a extensão de frequências do sinal de entrada nas quais a PLL se mantém bloqueada se estiver inicialmente sincronizada. A frequência de captura ( $2f_C$ ) é definida como a extensão de frequências do sinal de entrada, nas quais a PLL bloqueia a frequência se, inicialmente, estiver não sincronizada.

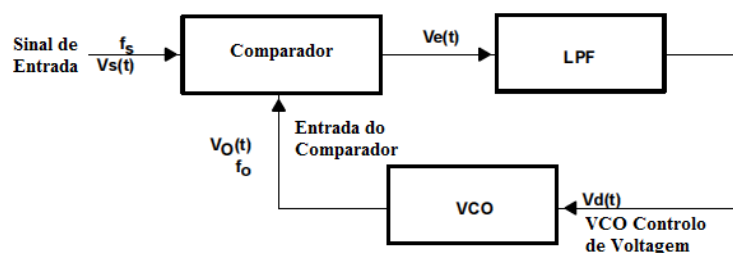


Figura 4.38: Diagrama de Blocos de uma PLL.

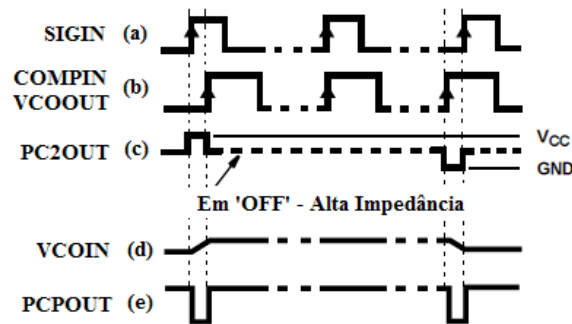


Figura 4.39: Formas de onda típicas da PLL usando o comparador de fase II, bloqueado a  $f_0$ .

Na Figura 4.39 estão representadas as formas típicas de um comparador de fase presente nas PLL da família 4046 que se pretende usar. Apesar dos *chips* recentes terem disponíveis três tipos de comparadores de fase denominados  $PC_x$  (*Phase Comparator* onde  $x=1, 2$  ou  $3$ ), o comparador II é aquele que se adequa melhor à detecção de fase e frequência.

Este comparador actua apenas nas transições positivas dos sinais de entrada do sinal e comparador, Figura 4.39a e Figura 4.39b; por conseguinte, os *duty-cycles* das entradas do sinal de entrada (*SIGIN*) e entradas do comparador (*COMPIN*) não são importantes neste tipo de comparador.

Na extremidade do comparador de fase II, está situado um bloco constituído por dois transístores p-MOS e n-MOS, que funcionam como uma saída de *tri-state* (Figura 4.39c) que, quando activados, colam a tensão de saída a  $V_{CC}$  ou a  $V_{SS}$ , respectivamente. Se a frequência de *SIGIN* for maior que a frequência de *COMPIN*, o p-MOS é mantido em funcionamento. Se a frequência de *SIGIN* for maior que a frequência de *COMPIN*, o n-MOS é ligado continuamente. Se ambos os sinais de entrada têm a mesma frequência, mas *SIGIN* se atrasa relativamente ao sinal de *COMPIN*, o n-MOS é ligado e assim mantido durante o tempo correspondente à diferença de fase; se *SIGIN* estiver adiantado, então o p-MOS fica ligado e é mantido assim durante o tempo que haja diferença de fase.

Consequentemente, a tensão no condensador do filtro passa-baixo de 1ª ordem conectado a este comparador de fase é ajustado até que ambos os sinais de entrada *SIGIN* e *COMPIN* sejam iguais em fase e frequência (Figura 4.39d). Neste ponto de operação estável, ambos os transístores p-MOS e n-MOS permanecem desligados e a saída do comparador de fase torna-se num circuito aberto, o que faz com que a voltagem do condensador do filtro passa-baixo seja constante. Para além disso, o sinal *VCOIN* encontra-se a nível alto, indicando que ambos os sinais estão sincronizados *SIGIN* e *COMPIN* (Figura 4.39d). Assim, para o comparador de fase II, não existe diferença de fase entre o *SIGIN* e *COMPIN* ao longo do alcance de frequência do VCO. Por outro lado, a dissipação de potência do filtro passa-baixo é reduzida quando este tipo de comparador de fase é usado, pois tanto o n-MOS como o p-MOS estão desligados a maior parte do período do sinal de entrada. Deve ser salientado também que o alcance de bloqueio, por parte deste tipo de comparador de fase, é igual ao alcance de captura, independentemente do filtro passa-baixo. Caso não haja qualquer sinal presente, o VCO ajusta-se para a frequência mais baixa do comparador de fase II.

***Em conclusão...***

O objectivo principal deste capítulo é caracterizar e projectar um sistema de gestão do nível de iluminação em ambientes interiores. Nesse sentido, a arquitectura, apresentada na primeira subsecção, consistiu em conceber directivas que permitissem criar o comportamento expectável a nível de *software*. Foi definido assim, o procedimento do sistema responsável pela gestão em termos de energia e, principalmente, iluminação.

Os circuitos apresentados nas sub-secções posteriores, assim como as simulações expostas nesses mesmos pontos, permitem encarar com optimismo a funcionalidade do sistema concebido. Existem, no entanto, circuitos cujo funcionamento é fulcral para o bom desempenho do sistema: o *driver* VLC e o amplificador de transimpedância. No primeiro caso, um cálculo correcto das resistências de *drive*, que permita a intermitência de luminosidade, sem pôr em risco a iluminação e o próprio circuito, é vital. No segundo caso, a forma de onda apresentada à saída do amplificador de transimpedância pode confirmar a validade dos circuitos projectados ou resultar em ajustamentos.

## CAPÍTULO V

### 5 Apresentação de resultados

O capítulo actual pretende apresentar e caracterizar os protótipos construídos, baseados nos circuitos simulados do capítulo 4. O sistema pode incluir algumas alterações relativamente aos circuitos projectados no capítulo que serão abordadas nas próprias secções onde ocorreram.

Numa primeira fase, são verificados os procedimentos e funcionalidades da gestão de dados com a inclusão de excertos de código desenvolvidos. De seguida, foram efectuados testes numa instalação fictícia, através de uma escala dimensional mais reduzida. Este *set-up* permitiu verificar os resultados relativos ao emissor e receptor VLC, tendo incluído imagens dos protótipos construídos, com actualização dos valores dos elementos caso tenham sofrido actualização. São também incluídas, as formas de onda visualizadas no osciloscópio com os respectivos comentários associados.

O capítulo ficaria incompleto sem uma perspectiva financeira dos módulos desenvolvidos. Assim sendo, é feita uma ponte entre as tipologias definidas no capítulo 3, de modo a comparar o custo entre os sistemas estudados e desenvolvido.

## 5.1 Gestão de dados

Esta secção prevê a apresentação de resultados do *software* desenvolvido. Nesse sentido, é necessário explicar com mais pormenor a função de biblioteca utilizada. Com a descrição dessas livrarias em mente, fica mais fácil perceber a manipulação de dados, funcionalidades e a forma como os dados locais e a iluminação é gerida. Ao longo da secção estão incluídos várias imagens que explicam o sucesso do *software* produzido.

### 5.1.1 Bibliotecas

Neste ponto é elaborada uma descrição das bibliotecas e das funções utilizadas na concepção do programa. Para além das funções aqui referidas, as bibliotecas têm disponíveis outras que não foram utilizadas e, portanto, são omitidas.

#### 5.1.1.1 *digitalWriteFast.h*

Consiste num cabeçalho complexo que traduz os comandos *digitalWrite*, *pinMode* e *digitalRead* nos respectivos comandos PORT, mas com tempos de execução muito inferiores, o que é especialmente útil na fase de *debugging*, nomeadamente, no uso de interrupções. A biblioteca de origem para leitura/escrita de portos demora mais de 50 ciclos de relógio a ser executada, enquanto a versão melhorada demora apenas 2 ciclos de relógio. A melhoria é especialmente visível quando o número do pino é conhecido durante o tempo de compilação.

*pinModeFast(pin, INPUT/OUTPUT):*

especifica o pino *pin* como entrada (*INPUT*) ou saída (*OUTPUT*).

*digitalWriteFast(pin, HIGH/LOW):*

escreve no pino digital *pin* *HIGH* ('1') ou *LOW* ('0').

*digitalReadFast(pin):*

lê o estado do pino *pin*.

#### 5.1.1.2 *SoftwareSerial.h*

Desenvolvida de forma a permitir comunicação série noutros pinos digitais para além do 0 e 1, usando *software* para replicar essa funcionalidade. Pode ser configurada de modo a ter múltiplas portas série a comunicar aos *baud rate standard*.

*mySerial.Begin(baud):*

define e inicializa e a *baud rate* da comunicação série.

*SoftwareSerial(Rx, Tx):*

configura os pinos de recepção (*Rx*) e transmissão (*Tx*).

*mySerial.available():*

verifica se existem caracteres disponíveis no *buffer* de recepção.

*mySerial.read():*

retorna um caractere que foi recebido no pino *Rx* do porto série.

*mySerial.println(string):*

escreve a *string* no pino transmissor do porto série, seguido de CR e LF.

### 5.1.1.3 *TimerOne.h*

Esta biblioteca é um conjunto de rotinas que configura o *timer 1* de 16 bits presente no ATmega168/328. Através de comandos específicos consegue-se definir o período do PWM (ou frequência) e inclui outras características, tais como manuseamento de interrupções e *timer overflow*, entre outras.

*Timer1.initialize(period):*

esta função deve ser a primeira a ser invocada. O período do *timer* é especificado através de *period* em  $\mu\text{s}$ . Por defeito é 1  $\mu\text{s}$ .

*Timer1.pwm(pin, duty-cycle):*

gera uma forma de onda do tipo PWM no pino *pin*, com o *duty-cycle* especificado. O *duty-cycle* deve ter um valor a variar entre 0 e 1023.

*Timer1.setPwmDuty(pin, duty-cycle):*

atalho rápido para actualizar um novo *duty-cycle* se este já tiver sido especificado através da função referida anteriormente.

### 5.1.2 Manipulação de dados

O requisito mínimo para comunicação e adaptação às condições actuais do ambiente exige dois tipos de dados, ambos de 8 bits: o *header* (ou identificador) e o *duty-cycle*.

De modo a manipular mais facilmente os dados referentes ao *header* foram criadas duas estruturas semelhantes *Tx\_FRAME* e *Rx\_FRAME*, referentes ao identificador na transmissão e recepção, respectivamente. Cada um dos campos constituintes já foi referenciado em 4.2.3, no entanto, de modo a tornar mais claro, encontram-se também sob a forma de comentário na Figura 5.1.

```
struct{
    unsigned char M_S_ID      :1;    // Original Sender 0- Slave / 1- Master
    unsigned char SN         :1;    // Actual Sender 0- Slave / 1- Master
    unsigned char MSG        :3;    // Message number 0..7
    unsigned char ID         :3;    // Class ID
}Tx_FRAME, Rx_FRAME;
```

Figura 5.1: Estruturas de transmissão e recepção do campo *header*.

O segundo *byte* diz respeito ao valor do *duty-cycle* e é definido no programa principal através da variável inteira *DuCy* (variável entre 0...1023), a que vai corresponder directamente o *tx\_data[1]* (no caso da transmissão) ou o *rx\_data[1]* (no caso da recepção). A manipulação do *duty-cycle* é, em ambos os casos, evidenciada na Figura 5.2.

```
// Transmissão
tx_data[1] = (unsigned char)((DuCy/102)<<4 + (DuCy%102));

// Recepção
DuCy = (unsigned int)((rx_data[1]>>4) & 0x0F) * 102 + (rx_data[1] & 0x0F);
```

Figura 5.2: Estruturas de transmissão e recepção do campo *DuCy*.

Através de testes efectuados no microcontrolador, verifica-se que *tx\_data[1]* não deve ser representado por 0x00 sob pena do controlador perder a sincronização. Por esta



razão, e aliado à fraca luminosidade resultante de um *duty-cycle* baixo, foi estipulado um *duty-cycle* mínimo de ~22% (0x22).

### 5.1.3 Funcionalidades

O programa desenvolvido permite que haja grande adaptabilidade consoante os periféricos ligados à unidade de controlo, assim como outras características que permitem uma melhor optimização do sistema. Algumas destas funcionalidades já foram referidas no capítulo anterior: desligar as luminárias após 3 minutos de falta de detecção de presença e actualização do PWM mediante a luminosidade ambiente presente, ambos referidos em 4.2.4, e desactivação da interrupção de presença nos 30 segundos seguintes à ultima actualização, descrito em 4.3. Outras, no entanto, são evidenciadas de seguida tendo por base a transformação de um módulo *Master* em *Slave* ou *Slave* em *Master* e interacção entre ambos os módulos.

A conversão de módulos em tempo real é uma funcionalidade que permite a introdução ou retirada de blocos de sensores com algum período de adaptação por parte da unidade de controlo. Ou seja, cada módulo poder-se-á comportar como um dispositivo *plug-and-play* desde que os sensores sejam aplicados nos pinos correctos.

Nas Figura 5.3 e Figura 5.4 estão representadas as linhas de código que convertem os dois tipos de módulos. A conversão do módulo *Slave* em *Master* resulta da detecção de presença (só presente no *Master*) e consiste na actualização da estrutura *Tx\_FRAME* que é especificado dentro da ISR. A conversão *Master* em *Slave* consiste na conjugação de dois factores: não haver detecção de presença (*LAST\_PRESENCE* = *NULL*) nos últimos 5 minutos e o módulo ser um *Master*. Tal como no caso da detecção de presença, o intervalo de tempo é ajustável e pode tomar qualquer valor desde que este seja superior a este último. Neste caso, é feito o *reset* a todos os campos de *Tx\_FRAME* de que resulta a assimilação do comportamento de um módulo *Slave*.

```
void PRESENCE()
{
    LAST_PRESENCE = millis();           // last access
    M_S = 3;                            //only master has presence sensor
    Tx_FRAME.M_S_ID = 1;                // Master = 1 ; Slave =0
    Tx_FRAME.SN = 1;                    // Master = 1 ; Slave =0
    Tx_FRAME.ID = 0x04 | Tx_FRAME.ID;  // 0x04 = (M_S_ID << 2)
    tx_data[0] = (Tx_FRAME.M_S_ID <<7) + (Tx_FRAME.SN <<6) + Tx_FRAME.ID;
    ....
}
```

Figura 5.3: Conversão de um módulo *Slave* em *Master*.

```
if ((LAST_PRESENCE == NULL) & (GAP_TIME > 300000) & (Tx_FRAME.M_S == 1)){
    M_S = 0;                            // only master has presence sensor
    Tx_FRAME.M_S_ID = 0;                // Master = 1 ; Slave =0
    Tx_FRAME.SN = 0;                    // Master = 1 ; Slave =0
    Tx_FRAME.ID = 0xFB & Tx_FRAME.ID;  // 0x04 = (M_S_ID << 2)
    tx_data[0] = (Tx_FRAME.M_S_ID <<7) + (Tx_FRAME.SN <<6) + Tx_FRAME.ID;
}
```

Figura 5.4: Conversão de um módulo *Master* em *Slave*.

A comunicação entre módulos é um requisito que esteve presente desde o início deste projecto. Neste sistema em particular, o programa é idêntico em ambos os módulos podendo diferir apenas no *CLASS ID* pelas razões mencionadas em 4.2.3. Nesse sentido, em ambos os casos, deve haver uma forma de determinar o momento específico em que não existe detecção

Tabela 5.1: Erros de transmissão.

rx_data[0]					rx_data[1]		
M_S	Sn	MSG	ID(2)	Error	(.. & 0xF0) >>4	.. & 0x0F	Error
0	X	X	X	Sim	=0	=0	Não
1	0	X	0	Não	>0 & <=10	>0 & <10	Não
1	0	X	1	Sim	<=10	>= 10	Sim
1	1	X	0	Sim	> 10	< 10	Sim
1	1	X	1	Não	> 10	>= 10	Sim

de presença e o módulo passa a *stand-by* impondo *duty-cycle* nulo ( $DuCy = 0$ ). As linhas de código representadas na Figura 5.5 definem o modo de entrada em *stand-by* e estão inseridas apenas no código referente ao *Master*.

```

if (GAP_TIME >= 180000){                // LAST_PRESENCE > 3 min
    tx_data[1] = 0x10;
    mySerial.println(tx_data); // send data to serial port
    delayMicroseconds(200);
    DuCy = 0;                          //set duty-cycle NULL
    Timer1.setPwmDuty(PWM_pin,DuCy);
    LAST_PRESENCE = NULL;
}

```

Figura 5.5: Entrada em modo *stand-by*.

Como existe a possibilidade de haver erros de transmissão, o programa está organizado de modo a ignorar os dados resultantes de tramas inválidas. A Tabela 5.1 apresenta todos os valores possíveis que indiciam erros de transmissão, excluindo os do campo *MSG*. Este campo em particular, também é testado, de modo a detectar mensagens consecutivas com o mesmo valor de *MSG*. Tal como no caso das tramas inválidas, os dados que o contêm também são ignorados e não são retransmitidos. Por fim, a variável *ID* diz apenas respeito ao *bit* mais significativo, daí estar assinalado como *ID(2)*. No caso do *duty-cycle*, *rx\_data[1]* é dividido em dois pares de 4 bits cada, tal como definido na Figura 5.2.

#### 5.1.4 Resultados práticos

Esta subsecção pretende apresentar resultados práticos relativos ao programa desenvolvido, cujo código se encontra em anexo no final do documento. Como existem vários testes que necessitam diferentes abordagens, foi necessário produzir programas de teste, assim como introduzir mudanças no *hardware*, de modo a permitir a obtenção dos dados desejados. Assim, todas as mudanças ao código serão mencionadas na altura do teste e devem ser encaradas como temporárias.

De modo a realizar os vários testes foi utilizada a configuração representada na Figura 5.6, onde estão expostos todos os pinos e ligações relevantes. O programa Realterm: Serial Capture Program v2.0.0.70 vai ser a ferramenta preferencial de monitorização e *debugging*. O programa Matlab R2012a vai ser especialmente importante no tratamento dos ficheiros de captura.

Para além de se pretender determinar a *baud rate* à qual o sistema funciona, o objectivo passa também por determinar tempos de envio entre tramas que permitem correcta recepção de dados, diferença de tempo entre o envio de uma trama e recepção, tempo de processamento do emissor e receptor e, por fim, caracterização de erros.

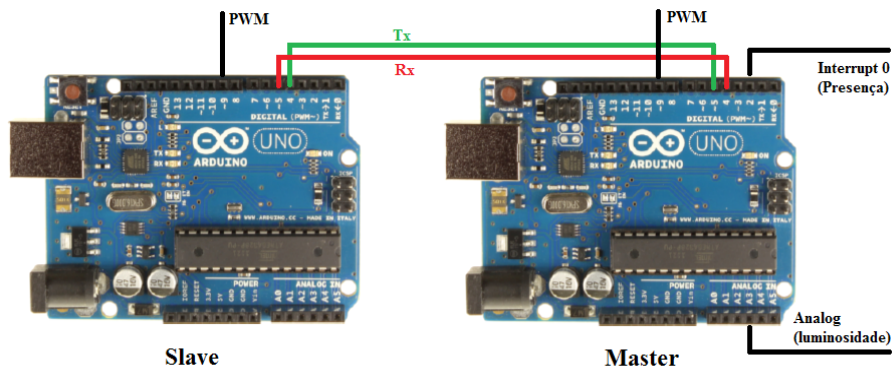


Figura 5.6: Configuração de teste de *hardware*.

### 5.1.4.1 Caracterização temporal

De modo a perceber quanto tempo é despendido na transmissão de dados foi efectuado um teste que consiste em escrever, imediatamente antes do comando de transmissão, o valor *HIGH* numa das saídas digitais disponíveis (pino 8) e escrever *LOW* quando acabasse. Com a ajuda do osciloscópio, foram colocadas duas pontas de prova, uma no pino *Tx* (Ch1) e a outra no pino 8 (Ch2). O resultado está expresso na Figura 5.7, onde também está incluído o tempo de escrita ( $T_{wr}$  -  $18\mu s$ ) do pino 8. Pode-se concluir então, que o tempo de transmissão é  $738\mu s - T_{wr} * 2$ , ou seja,  $702\mu s$ .

Uma característica importante consiste em perceber o período de tempo que o receptor (*Slave*) processa e retransmite os dados. Em ambas as imagens da Figura 5.8 estão expostos dois sinais: o primeiro (Ch1) refere-se ao sinal transmitido pelo *Master*, enquanto o segundo (Ch2) refere-se ao tempo que o *Slave* demora desde que recebe uma trama até que a retransmite. Na imagem do lado esquerdo, é perceptível que o *Slave* (Ch2) não tem tempo suficiente para processar a informação e reenviar os dados, ou seja, deveria ter um tempo de transmissão constante, próximo dos  $738\mu s$ , mas em vez disso é variável. Apesar do tempo de leitura de um porto ser muito menor que a escrita, é essencial a introdução de um atraso na transmissão, de modo a que o receptor *Slave* obtenha sincronização. Através dos elementos disponíveis na imagem da direita é possível calcular o tempo de processamento, ou seja, é a diferença entre  $770\mu s$ , visível na Figura 5.7, e  $738\mu s$  que resulta em  $32\mu s$ .

Após a execução destes testes, que já incluem a totalidade do programa desenvolvido, é notório que a introdução de atrasos na transmissão é peça fundamental

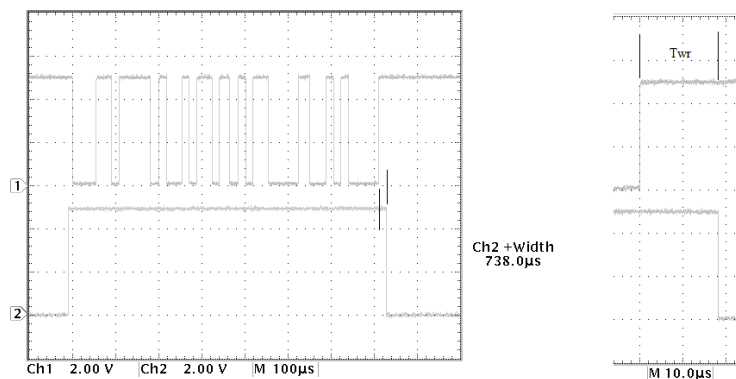


Figura 5.7: Tempo de transmissão de uma trama completa.

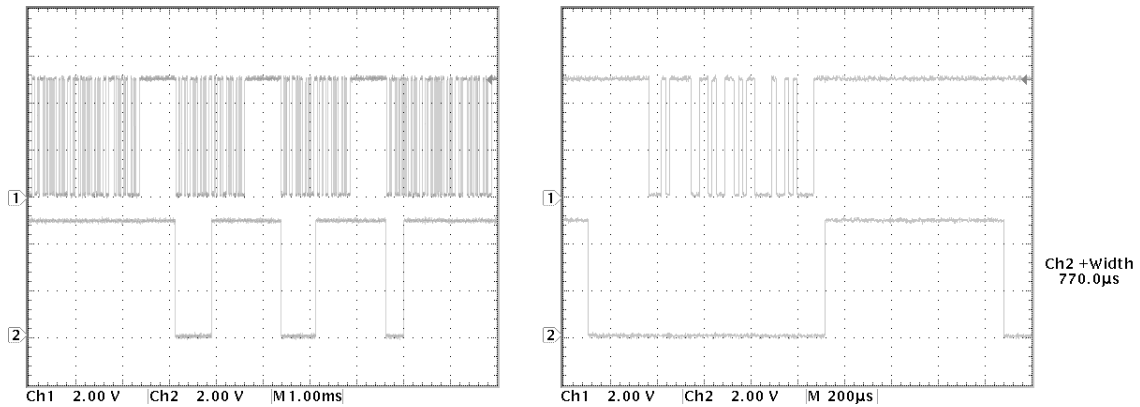


Figura 5.8: Transmissão vs tempo de processamento e retransmissão.

de modo a ocorrer a correcta recepção dos dados. Aparentemente, na Figura 5.8, do lado direito, é apresentada a imagem de uma sequência correcta de retransmissão com um atraso de 200µs na transmissão. Contudo, só através de testes adicionais efectuados em 5.1.4.3, pode ser determinado um valor mais exacto do número de erros.

#### 5.1.4.2 Comunicação série

A biblioteca responsável pela comunicação série suporta todos os *baud rates standards*. Assim, o teste consistiu assim, no envio de um `tx_data[1]` constante (0x11), enquanto o campo `header` desempenhava a função normal, ou seja, por cada trama a enviar o campo `MSG` é incrementado e actualizado. O receptor, por seu lado, aguarda que a variável `rx_process`, definida na Figura 4.11 (p.60), seja sinalizada, de modo a escrever no monitor série. Os dados transmitidos pelo *Master* são apresentados no lado esquerdo da Figura 5.9, com os respectivos campos `Tx_FRAME` sinalizados, enquanto do lado direito encontram-se as linhas de código que imprimem os resultados no terminal do receptor.

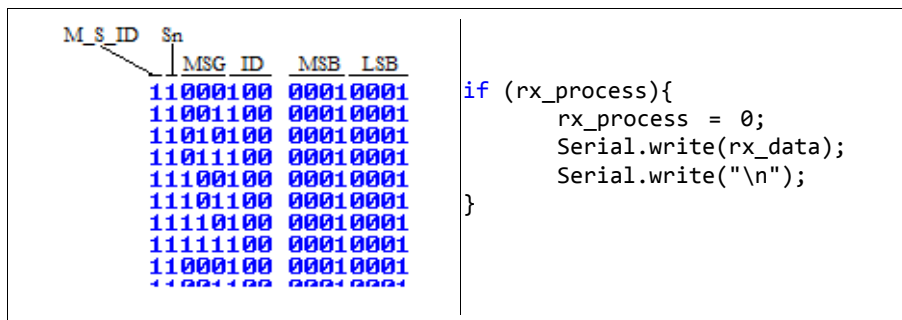


Figura 5.9: Transmissão de trama fixa e linhas de código no receptor.

Aparentemente, os resultados obtidos permitem a comunicação de dados a 57600bps com alguns erros, que pode ser fruto de um atraso na transmissão insuficiente. No caso de 115200bps, era notória a quantidade de erros na trama e como consequência não é vista como opção.

### 5.1.4.3 Monitorização de erros

O teste seguinte consiste em verificar a quantidade de tramas, válidas ou não, em termos percentuais, que são recebidas à taxa de transmissão de 57600bps. Na Figura 5.10, é apresentado um excerto dos dados recebidos, com um *delay* de 200 $\mu$ s, assim como, a tabela de características do Realterm usadas na captura. Este teste, consiste assim, em verificar a relação existente entre a percentagem de tramas recebidas vs atraso de transmissão, de modo a poder ser estipulado o atraso mínimo, a partir do qual o módulo *Slave* pode retransmitir.

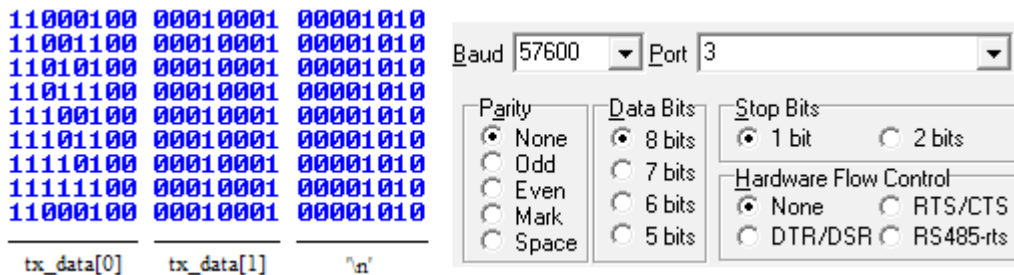


Figura 5.10: Recepção de dados a 57600 baud rate.

Foi executado assim, um teste que consistiu no envio de dois milhões de tramas aleatórias, mas válidas, com *delays* distintos impostos pelo *Master*, e verificar o número de tramas recebidas com sucesso pelo *Slave*.

Nesse sentido, e de modo a sincronizar os momentos de início e fim de transmissão, foi utilizada a interrupção *INT 1* (pino 3), cuja única função é sinalizar o fim da transmissão. Seguidamente, foi impresso no terminal a percentagem do número total de tramas recebidas, assim como a percentagem de tramas válidas. Os resultados obtidos são assim expostos, sob a forma de gráfico na Figura 5.11, onde %TR e %TV se referem, respectivamente, à percentagem de tramas recebidas e percentagem de tramas válidas.

Através da análise do gráfico, verifica-se que um atraso entre 100 e 150 $\mu$ s é suficiente de modo a obter uma transmissão correcta e consistente. Um atraso maior possibilita maior tempo de processamento de ambos os módulos sem perda de eficiência, portanto, no programa principal o atraso inserido passou a ser de 300 $\mu$ s, de que resulta a possibilidade de transmissão a cada ~1ms.

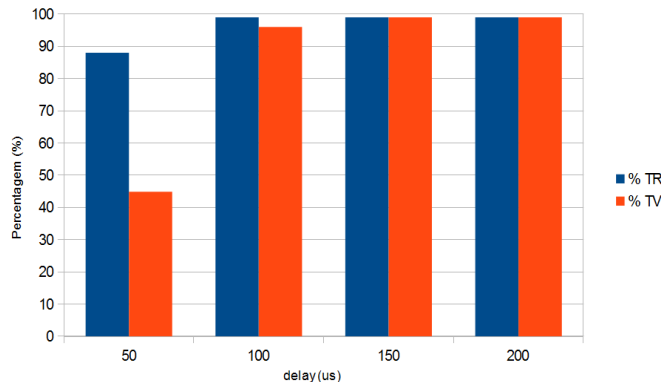


Figura 5.11: Monitorização de erros.

Tabela 5.2: Configuração dos bits de teste das mudanças de estado.

<b>bit 0</b>	//deteccção de presença '1' se presença foi detectada nos últimos 30 segundos '0' ausência de detecccção nos últimos 30 segundos
<b>bit 1</b>	//desligar luminárias após 3 min de ausência de detecccção '1' se luminárias estiverem ON '0' se as luminárias estiverem desligadas
<b>bit 2</b>	//conversão do módulo <i>Slave</i> em <i>Master</i> '1' <i>Slave</i> → <i>Master</i> '0' não ocorreu actualização
<b>bit 3</b>	//conversão do módulo <i>Master</i> em <i>Slave</i> '1' <i>Master</i> → <i>Slave</i> '0' não ocorreu actualização
<b>bit 4</b>	//Tipo de módulo '1' <i>Master</i> '0' <i>Slave</i>

"11/14/2012 1:24:19 PM" E0 .....	→ Inicia o funcionamento como um módulo <i>Slave</i> , sem presença detectada e com luminárias desligadas.
"11/14/2012 1:24:26 PM" F7	→ Detecta presença e desliga respectiva interrupção, passagem de <i>Slave</i> > <i>Master</i> , módulo é agora um <i>Master</i> , luminárias ligadas.
"11/14/2012 1:24:26 PM" F3 .....	→ <i>Reset</i> da <i>flag</i> de Passagem de <i>Slave</i> > <i>Master</i> .
"11/14/2012 1:24:56 PM" F2 .....	→ <i>Reset</i> da <i>flag</i> de detecccção de presença, interrupção de presença reactivada.
"11/14/2012 1:27:26 PM" F0 .....	→ As luminárias desligam-se após 3min de ausência de presença.
"11/14/2012 1:29:26 PM" E8	→ Após 5min sem presença o <i>Master</i> > <i>Slave</i> , módulo é agora um <i>Slave</i> .
"11/14/2012 1:29:26 PM" E0	→ <i>Reset</i> da <i>flag</i> de Passagem de <i>Master</i> > <i>Slave</i> .

Figura 5.12: Sequência de eventos possíveis de um módulo.

#### 5.1.4.4 Funcionalidades

De modo a verificar as funcionalidades do sistema foi adicionado ao programa principal outro *byte* (*tx\_data[2]*) que vai representar as mudanças de estado do módulo. Assim, *tx\_data[2]* é constituído por oito *bits*, sendo que os três *bits* mais significativos são '1's e os restantes cinco *bits* são configuráveis e cuja descrição é efectuada na Tabela 5.2.

Procedeu-se, de seguida, à execução do teste, sendo que os dados obtidos foram salvos num ficheiro específico de captura através do programa Realterm. Na Figura 5.12 é exposto um excerto das tramas mais relevantes detectadas, com *timestamp* incluída, assim como a descrição do evento ocorrido. Os resultados obtidos na simulação verificam a maior parte das funcionalidades descritas em 5.1.3.

Na Figura 5.13, é exposta a imagem referente a um evento particular, ou seja, à situação em que o *Master* manda os *Slaves* desligarem as suas luminárias por falta de presença nos últimos 3 minutos. Os dois primeiros *bytes* correspondem aos campos

	Sn	ID				
i)	11000100	01011010	00001101	00001010	←	
	11001100	00010000	00001101	00001010		
	11010100	01011001	00001101	00001010		
ii)	10000000	01011010	00001101	00001010	←	
	10001000	00010000	00001101	00001010		
	10010000	01011001	00001101	00001010		

Figura 5.13: Comando de desligar luminárias.

referidos Figura 5.9 (*header e duty-cycle*) enquanto os seguintes se referem ao CR e LF. Os dados transmitidos pelo *Master* (Figura 5.13i) são então retransmitidos pelo *Slave*, alterando apenas, o campo *Sn* e *ID*, (Figura 5.13ii).

Neste ponto, por fim, a última funcionalidade que carece de demonstração, é referente à actualização do PWM que vai ser demonstrada nos pontos 5.2.2 e 5.2.3.

## 5.2 Emissor VLC

Nesta subsecção é feita a verificação prática dos circuitos propostos na secção 4.4. No caso de haver necessidade de adaptação de alguns circuitos por não terem sido obtidos resultados satisfatórios são apresentadas alternativas.

### 5.2.1 Luminárias

Tal como foi referido em 4.4.1, a luminária consiste num *array* de LEDs, 3x2, segundo uma configuração mista. A Figura 5.14 apresenta a fotografia do elemento, onde são visíveis os sinais de entrada ( $V_{CC}$  ou  $V_{LED}$ ) saída da luminária ( $GND$  ou  $OUT_{LED}$ ). O  $V_{LED}$  corresponde a um valor a rondar os +12V, pois a tensão de polarização conjunta perfaz ~9.15V.

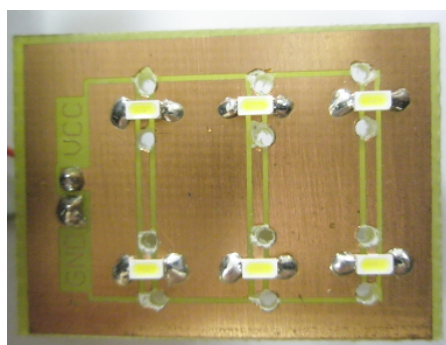


Figura 5.14: Protótipo do *Array* de LEDs 3x2.

### 5.2.2 Nível DC

Os valores da resistência e do condensador apresentados em 4.4.2 atingiram o objectivo pretendido, isto é, à saída do circuito o sinal toma um valor DC constante.

Na Figura 5.15, são apresentadas duas formas de onda com *duty-cycle* de 75% e

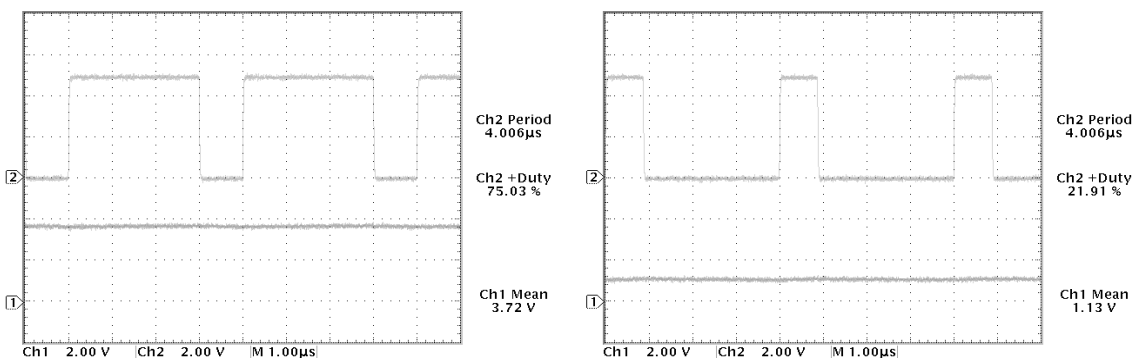


Figura 5.15: *Duty-cycle* vs nível DC.

~22%, onde o canal 2 e o canal 1 são, respectivamente, o sinal de entrada e de saída do circuito. Na image da esquerda, é possível verificar que um *duty-cycle* de 75% corresponde a um valor teórico de ~3.75V. O valor mínimo de *duty-cycle* de 22% é apresentado na imagem da direita que resulta num valor DC ligeiramente superior ao  $V_{BE}$  do transístor (~1V).

### 5.2.3 Emissor de dados

De forma a visualizar a adaptação do circuito emissor de dados ao nível DC, foi conectado um potenciómetro à entrada digital 3 (A3) do Arduino, com o intuito de variar a tensão entre 0 e +5V. Assim, o procedimento do programa consiste em ler o sinal analógico, convertê-lo em digital, mapear entre 0 e 1023 e, por fim, impor o *duty-cycle* do PWM. Os dados representados na Figura 5.16, correspondem aos dados (Ch1) e nível DC (Ch2) para DC mínimo (1,07V) e DC máximo (4,88V), respectivamente. As medidas do canal 1 correspondem à amplitude do sinal (*Ch1 Ampl*) e valor máximo estável (*Ch1 High*).

Os elementos calculados em 4.4.3, que estão dispostos na Tabela 4.2, provaram ser correctos e os resultados práticos confirmam-no, ou seja, a amplitude do sinal de saída é a mesma independentemente do valor DC aplicado.

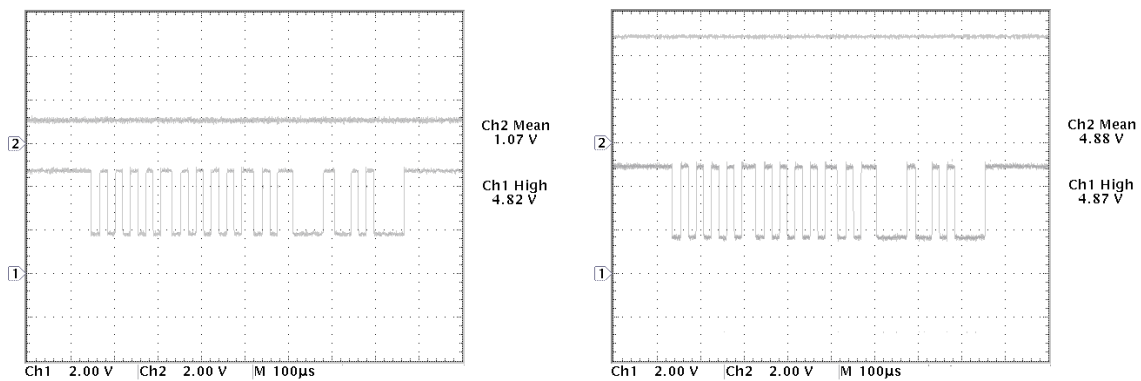


Figura 5.16: Emissão de dados para nível DC máximo e mínimo.

### 5.2.4 Driver VLC

A Figura 5.17 tem representado o protótipo do *driver* VLC produzido, onde também estão visíveis os sinais relevantes.

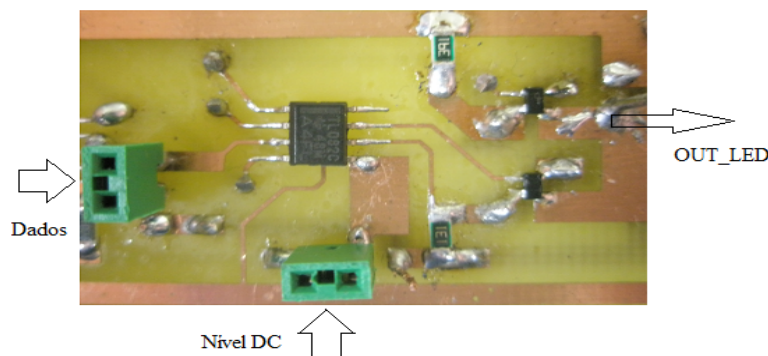


Figura 5.17: Protótipo do circuito *driver* VLC.



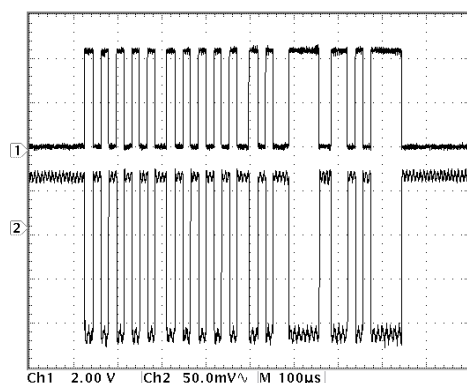


Figura 5.18: Sinais de dados com inversor e tensão de colector do *driver* VLC.

Ao ser analisado o sinal do emissor de dados à saída do microcontrolador verifica-se que, quando este não está a comunicar, o sinal de saída encontra-se no estado *HIGH*. Outra característica a ter em conta deriva do facto do receptor necessitar do sinal invertido de modo a *UART* que detecte o *start bit* no início de trama. A solução para ambas as situações, consiste em inverter o sinal de dados à saída do microcontrolador, obtendo-se assim, níveis médios de luminosidade e consumo de energia inferiores, sem incorrer numa transmissão de dados incorrecta.

No caso de ser mais importante a luminosidade que a manutenção pode-se calcular  $R_1$  e  $R_2$  para 40mA e 20mA, respectivamente, com inversão do sinal ( $I_{LED} = I_{R1} + I_{R2} \leq 2 \cdot I_{Fmax} = 60mA$ ). Como se supõe que a luminária vai estar mais tempo a iluminar do que comunicar sacrifica-se algum tempo de vida em prol de níveis de luminosidade mais alta. Este procedimento foi previamente discutido no ponto 2.3.4.

Na Figura 5.18 estão representados os sinais do emissor de dados já com inversor (Ch1) e tensão de colector (Ch2 – *OUT\_LED* da Figura 5.17) que verificam a funcionalidade do circuito.

## 5.3 Receptor VLC

### 5.3.1 Pré-amplificador

O protótipo do circuito é apresentado na Figura 5.19, onde também está incluída a colocação dos terminais do fotodiodo e o sinal de saída (*OUT*).

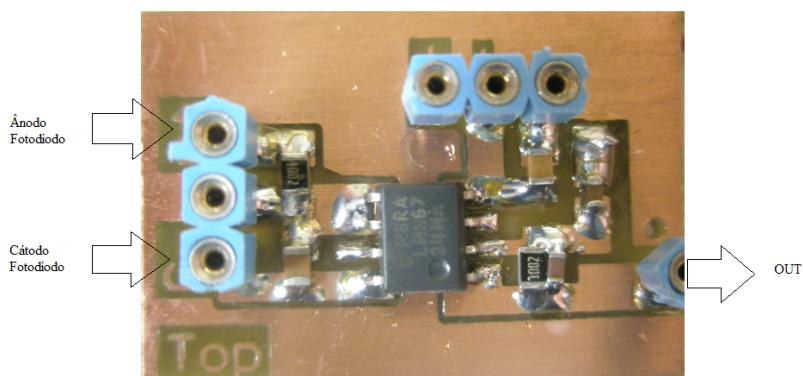


Figura 5.19: Protótipo do amplificador de Transimpedância.

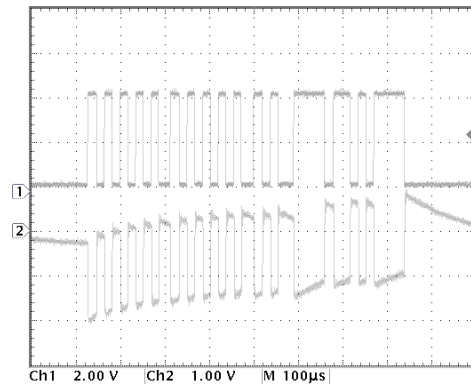


Figura 5.20: Sinal do sinal transmitido e à saída do pré-amplificador.

De seguida, o circuito foi testado com a luminária em funcionamento, ou seja, a iluminar e comunicar simultaneamente. O circuito de teste consiste no emissor, previamente testado em 5.2, a transmitir dados através de VLC, a uma distância de alguns cm de distância.

Existem três factores fulcrais que influenciam directamente o desempenho do circuito: ambiente circundante, distância da luminária ao fotodíodo e a intensidade de luz da luminária. O ambiente do teste consistiu num ambiente sujeito a quaisquer fontes de luz (natural ou artificial) presentes, o que, logo à partida introduzia muito ruído no sinal recebido. A distância da luminária ao fotodíodo está relacionada com a intensidade da própria, ou seja, quanto maior a intensidade de luz, maior a distância à qual ela é visível e detectável.

Tendo em conta que a luminosidade que o *array* de LEDs apresentava não era grande, mas suficiente a alguns cm de distância, houve necessidade de efectuar os testes com a luminária até um máximo de distância de 10cm.

Os valores calculados no ponto 4.5.2 revelaram-se insuficientes, ou seja, o sinal à saída do amplificador apresentava valores com amplitude da ordem dos 500mV pico a pico. De modo a resolver parte destes problemas, foi aumentada a capacidade do condensador de filtragem DC ( $C_1$ ) para 100nF, assim como, o ganho do amplificador para 75000, através da substituição de  $R_1$  (10k $\Omega$ ) por 75k $\Omega$ . O resultado é exposto na Figura 5.20, onde Ch1 é o sinal transmitido pelo microcontrolador invertido e o Ch2 é o sinal à saída do amplificador de transimpedância. A amplitude da forma de onda resultante, aumentou sensivelmente para o dobro, mas a componente DC persistia. Houve assim necessidade, de modificar os andares posteriores, de modo a obter sinais lineares e simétricos que permitissem a recepção correcta por parte do receptor.

### 5.3.2 Andar de filtragem

O protótipo do circuito projectado está exposto na Figura 5.21. No entanto, o andar de filtragem, cujos valores foram calculados no capítulo 4, mais exactamente em 4.5.3.2, tem as frequências de corte demasiado distantes. Na realidade, só a  $f_H$  deve ser ajustada e, por esse motivo, só foi necessário executar mudanças no filtro passa-baixo de modo a que a frequência de corte passe a ser de 600kHz (10x superior à taxa de transmissão). Assim, os valores actualizados da Tabela 4.5 são agora expostos na Tabela 5.3.

De seguida, procedeu-se à obtenção da resposta em frequência do circuito, cujo gráfico é apresentado na Figura 5.22. Na imagem, verifica-se que  $f_L = 850\text{Hz}$  e  $f_H = 680\text{kHz}$  que estão dentro das frequências de corte necessárias ao correcto funcionamento do sistema.

Tabela 5.3: Valores dos elementos utilizados no Filtro Passa-baixo.

$V_{CC}$ [V]	$V_{SS}$ [V]	$C_4$ [pF]	$C_5$ [pF]	$R_4$ [k $\Omega$ ]	$R_5$ [k $\Omega$ ]
5	-5	100	220	22	1.2

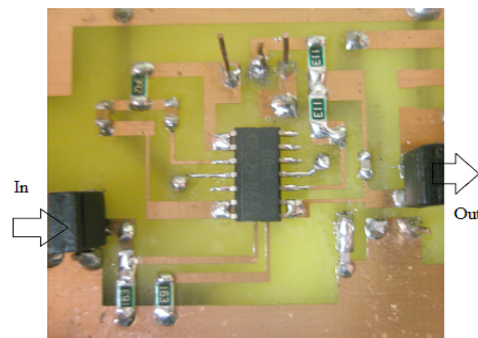


Figura 5.21: Protótipo do filtro passa-banda.

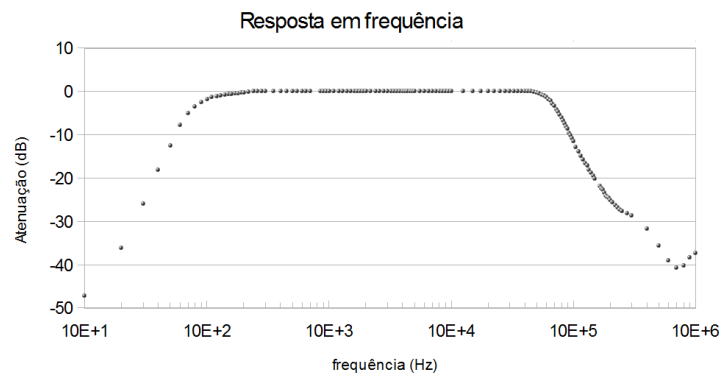


Figura 5.22: Resposta em frequência do andar de filtragem.

### 5.3.3 Condicionamento de sinal

O protótipo do circuito baseado no capítulo 4 é apresentado na Figura 5.23, onde são visíveis os pontos de entrada e saída do sinal.

As formas de onda obtidas estão expostas na Figura 5.24. Em ambas as imagens, Ch1 é o sinal de entrada deste circuito. Na imagem da direita, Ch2 é o sinal resultante da média do sinal de entrada, enquanto do lado esquerdo, encontra-se a tensão à saída do comparador. Pode-se verificar que a tensão média varia muito pouco acompanhando a variação da tensão na saída do TIA. Do lado direito, encontra-se o sinal de saída do comparador, perfeitamente sincronizado com o sinal de saída do TIA.

### 5.4 Custo do sistema

A caracterização do sistema não fica completa sem efectuar uma análise financeira dos elementos utilizados na concepção dos módulos *Master* e *Slave* e compará-los com os valores dos sistemas T3, T4 e escritórios calculados no Capítulo 3.

De forma a permitir uma visualização mais abrangente dos componentes

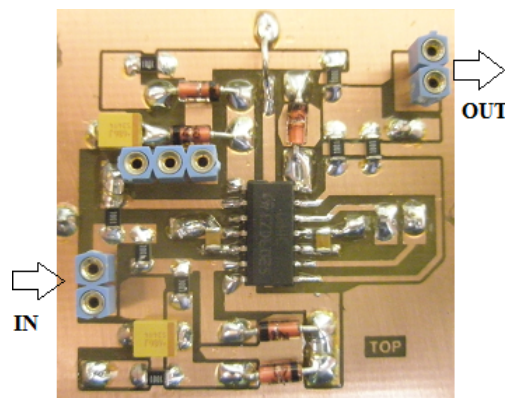


Figura 5.23: Protótipo do circuito de condicionamento de sinal.

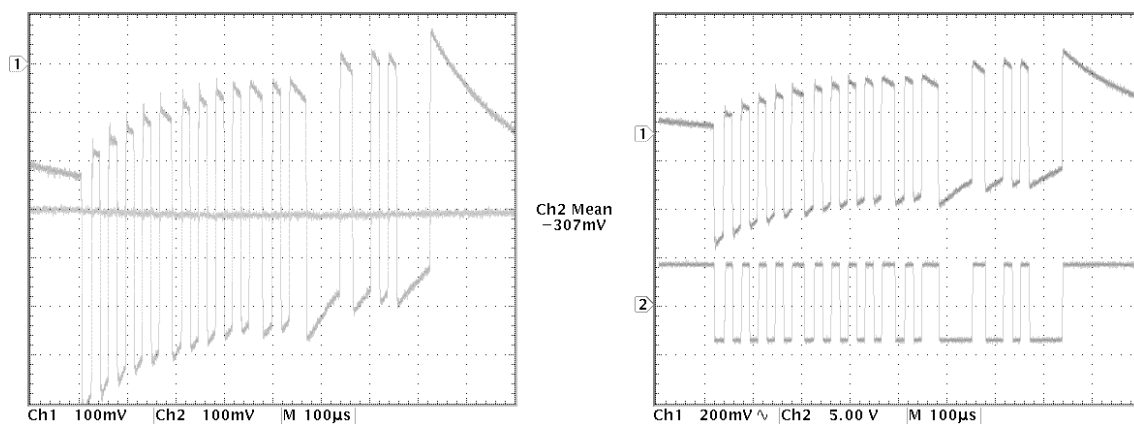


Figura 5.24: Sinal de saída do TIA e tensão média.

Tabela 5.4: Cálculo do custo de cada módulo.

	Componentes	Fabricante	Descrição	Distribuidor	Custo 100 unid c/IVA (€)	Master		Slave	
						Qtd:	Preço	Qtd:	Preço
SL SP	555-28027	Parallax	Sensor	Parallax	2,09	1	2,09	0	0
SL SP	SFH5711	OSRAM	Sensor	Farnell	1,41	1	1,41	0	0
Emissor	TL082CD	Texas Instruments	Amp Op	Farnell	0,21	3	0,63	3	0,63
	BFG21W	NXP	Transistor	Farnell	0,69	2	1,38	2	1,38
	BFR92A	NXP	Transistor	Farnell	0,18	3	0,54	3	0,54
Receptor	BPW34S	OSRAM	Fotodiodo	Farnell	0,69	4	2,76	4	2,76
	LMH6723MF	Texas Instruments	Amp Op	Farnell	1,42	1	1,42	1	1,42
	TL084CD	Texas Instruments	Amp Op	Farnell	0,32	2	0,64	2	0,64
	1N4148	NTE Electronics	Diodo rectificador	Farnell	0,01	5	0,06	5	0,06
uC	Arduino UNO	Arduino	Microcontrolador	Farnell	23,46	1	23,46	1	23,46
RLT	UA7805CKCS	Texas Instruments	Regulador tensão	Farnell	0,44	1	0,44	1	0,44
	UA7905CKCSE3	Texas Instruments	Regulador tensão	Farnell	0,26	1	0,26	1	0,26
DIS	Resistências	Welwyn	SMD 250mW ±1%	Farnell	0,06	41	2,58	41	2,58
	Condensadores	Welwyn	SMD 250mW ±1%	Farnell	0,19	27	5,13	27	5,13
<b>Custo modular</b>							<b>42,79</b>	<b>39,30</b>	

electrónicos utilizados, foi construída a Tabela 5.4 onde são expostos todos os elementos discretos utilizados na concepção de cada módulo. Na vertical, a tabela está dividida em sete partes distintas: SL (sensor de luminosidade), SP (sensor de presença), Emissor e Receptor, uC (microcontrolador), RLT (regulador linear de tensão) e, na última parte, DIS (resistências e condensadores de vários valores). Na horizontal são apresentados as referências dos componentes, respectivos fabricantes, descrição do elemento, empresa distribuidora, e o custo devido à aquisição de 100 elementos. Fora desta tabela encontram-se conectores, regulador de tensão que está dependente dos LEDs e devem ser projectados em conjunto, os próprios LEDs, PCB e os dissipadores de potência no *driver*. Estes últimos estão dependentes da corrente de polarização dos LEDs estipulada.

Convém lembrar que o transistor usado, o BFG21W, tem capacidade de *drive* muito acima do necessário. Permite correntes até 500mA e é capaz de dissipar até 600mW de potência, permitindo assim a adaptação a luminárias que radiem mais luminosidade. Esta solução, no entanto, está dependente da utilização de outras resistências de *drive* que dissipem mais do que 250mW. No caso das fontes de alimentação, são utilizados reguladores lineares de tensão, como por exemplo, o UA7805CKCS (+5V, 1.5A) e o UA7905CKCSE3 (-5V, 1.5A), ambos da *Texas Instruments*, que permitem a adaptação do adaptador AC-DC, de modo a fornecer as tensões necessárias ao funcionamento de todos os circuitos prototipados.

O passo seguinte consistiu em calcular o custo do sistema para as tipologias T3, T4 e Escritórios definidos no capítulo 3, mais exactamente em 3.3.3 (T3), 3.3.4 (T4) e 3.3.5 (Escritórios). No sistema desenvolvido, as luminárias são parte integrante dos módulos, portanto, a cada foco de luz vai corresponder um dos módulos. Relembrando também, o que foi escrito na arquitectura do sistema (4.1), todas as divisões têm obrigatoriamente que incluir um *Master*, logo, cada divisão que contenha apenas um foco de luz vai ter associado um módulo *Master*. Nas restantes divisões que tiverem mais que um foco de luz serão colocados um *Master* e os restantes elementos *Slaves*. Na

Tabela 5.5: Sumário do custo do sistema para T3, T4 e Escritórios.

	custo unitário (€)	T3		T4		Escritórios	
		Qtd	Preço	Qtd	Preço	Qtd	Preço
Focos de Luz	--	16	--	18	--	10	--
Master	42,79	12	513,48	13	556,27	8	342,32
Slave	39,30	4	157,2	5	196,5	2	78,60
<b>Custo Total</b>			<b>670,68 €</b>		<b>752,77 €</b>		<b>420,92 €</b>

Tabela 5.5 encontra-se discriminado o número total de *Masters* e *Slaves*, assim como o custo total do sistema, para as tipologias definidas.

### 5.5.1 Sumário de Resultados

A Tabela 5.6 contém o sumário do custo do sistema para todas as soluções empresariais apresentadas. O custo dos sistemas, ESYLUX e LEGRAND, já foi calculado anteriormente na Tabela 3.28 (p.52), sendo que, em ambos os casos os preços não incluem IVA. No caso do sistema proposto, o orçamento 1 refere-se ao custo por módulo, referente à aquisição de 100 unidades.

Tabela 5.6: Sumário dos orçamentos dos sistemas para as diferentes tipologias.

		T3	T4	Escritórios
ESYLUX	Solução 1	4.127,80 €	4.906,30 €	2.611,50 €
	Solução 2	4.565,80 €	5.447,80 €	2.849,20 €
LEGRAND	Solução 1	3.504,01 €	4.248,71 €	2.153,29 €
	Solução 2	2.963,71 €	3.953,08 €	1.924,04 €
Sistema proposto	Orçamento	670,68 €	752,77 €	420,92 €

### *Em Conclusão...*

O programa desenvolvido tem uma grande adaptabilidade a espaços distintos ou situações pontuais. Todos os tempos, seja de transição entre tipos de módulo ou espera até nova presença, são facilmente configuráveis através da imposição de uma variável.

A baixa taxa de erros de transmissão está altamente dependente do atraso definido no *Master* que não deve ser inferior a 150µs. A imposição de um valor mais elevado não é relevante em termos de eficácia já que a duração da adaptação ao ambiente local de ~1ms é imperceptível aos utilizadores. Outro factor relevante que deve ser salientado está relacionado com a transmissão e retransmissão: os atrasos em ambas as situações devem ser ponderados de forma a que não haja sobreposição de sinais transmitidos por ambos os módulos.

O conjunto de elementos formado pelo regulador de tensão, luminárias e VLC é fulcral no desenvolvimento deste sistema e no emissor VLC em particular. Tanto a emissão de dados como o nível DC, são facilmente adaptáveis às tensões em que o transístor está *ON*, logo, o maior problema vai ser projectar os três circuitos referidos anteriormente.

No receptor VLC, os circuitos de pré-amplificação e andar de filtragem projectados, atingiram os objectivos pretendidos, com pequenos ajustes no caso da filtragem. O mesmo não aconteceu relativamente ao descodificador que foi descartado devido à incapacidade do Arduino transmitir sinais com duração de pulso constante.

Os custos associados a cada módulo e consequente aplicação em sistemas de iluminação inteligentes revelou um preço extremamente competitivo em qualquer das tipologias. A diferença de preço entre as opções registadas é enorme, 5-6 vezes menor utilizando os módulos do sistema proposto comparativamente aos restantes, mas estes valores não incluem custos de produção, caixas, PCB, fichas e demais acessórios. Uma das principais razões da falta de aquisição deste tipo de sistemas, o preço, passa a ser menos importante já que os valores calculados abrem portas outro tipo de classes para além das alta e média-alta.

## CAPÍTULO VI

### 6 Conclusões

A tecnologia VLC integra todas as características necessárias para deixar de ser uma tecnologia restringida apenas à investigação e se tornar, num futuro próximo, a tecnologia preferencial em diversas aplicações, desde iluminação a comunicações sem fios. Com as necessidades energéticas mundiais a aumentarem a cada ano que passa, esta tecnologia permite o aproveitamento energético intrínseco devido ao facto de a comunicação e iluminação ocorrerem simultaneamente, sendo que a comunicação é efectuada através de canais seguros. No entanto, necessita de maior visibilidade e sensibilização a nível comercial, de modo a que surjam maiores investimentos e assim se consigam produzir sistemas mais eficazes e economicamente mais competitivos.

A tecnologia VLC tem vindo evoluir por força do desenvolvimento tecnológico dos LEDs ocorrido na última década. Os LEDs adaptam-se totalmente ao requisito dos sistemas VLC, pois permitem o controlo de luminosidade através de PWM, assim como transições rápidas entre estados, possibilitando a comunicação. No entanto, devido à falta de entendimento entre fabricantes, ainda não existem *standards* que permitam a uniformização de características eléctricas. Esta situação provoca muita indefinição no acto da escolha da luminária que melhor se enquadra nas aplicações, prova disso é a quantidade e variedade enorme de LEDs disponíveis no mercado. É provável que, num futuro próximo, o acordo entre as partes envolvidas ocorra, mas, enquanto isso não acontecer, a comunicação há-de estar sempre dependente de uma boa concepção do conjunto de elementos: regulador de tensão, luminárias e *driver*.



As primeiras simulações efectuadas na fase de projecto permitiam verificar a validade das opções tomadas, facto que se viria a tornar importante na fase de prototipagem. Nesta última, é muito importante o planeamento a nível de alimentações, de modo a reduzir o ruído, conectividade e simplificação do PCB.

Os primeiros dados obtidos permitem concluir que o sistema funciona de acordo com o projectado, isto é, ilumina e suporta comunicação, ao mesmo tempo que efectua uma gestão de iluminação em tempo real. Os transístores utilizados no *driver* VLC permitem também uma corrente muito maior que a necessária neste projecto, podendo-se assim adaptar a outras luminárias mais exigentes, desde que as resistências de *drive* sejam adaptadas.

O programa de *software* de gestão desenvolvido permite uma gestão de iluminação e de energia, ao mesmo tempo que se adapta às condições locais, reagindo num curto espaço de tempo. Permite também uma grande adaptabilidade a qualquer espaço e/ou situação.

Um factor de grande relevância é a relação qualidade/preço, sendo que, regra geral, o consumidor final não olha tanto para a qualidade. Nesse sentido, a diferença de preço entre o sistema de iluminação desenvolvido e os sistemas de iluminação comerciais estudados é enorme. Ao manter, ou até melhorar, a qualidade do produto a um preço comparativamente tão reduzido, este sistema consegue abrir a porta a outras classes da população outrora vedadas, força dos altos preços praticados pelas empresas que comercializam este tipo de aplicações.

## **6.1 Aplicações comerciais**

O sistema desenvolvido pode ser aplicado em qualquer espaço físico com o objectivo de o iluminar. Permite também a gestão de iluminação e energia, de modo que haja redução de despesas energéticas correntes, mantendo o nível de conforto visual elevado.

Para além de poder funcionar como um sistema de iluminação, ambos os módulos detêm entradas disponíveis que podem ser utilizadas como meios de aquisição de parâmetros, tais como: a temperatura, para controlar remotamente ar condicionado, ou a posição, de forma a controlar a subida e descida de estores. Assim, podia ser implementado um sistema domótico comercial que integre e controle todos estes parâmetros e, até, integrá-lo em sistemas já presentes que usam diferentes tecnologias.

Este trabalho pode ser empregue a todas as aplicações que se baseiam na tecnologia *Machine to Machine* (M2M), já que usa sensores para capturar eventos e comunica-os através da rede. O sistema poderia, assim, ser controlado ou monitorizado remotamente.

## **6.2 Trabalho Futuro**

A implementação de um receptor IR no módulo *Master*, com a ajuda de um controlo remoto, permitiria o ajuste manual dos níveis de luminosidade. Também podia ser enviado um sinal IR pré-formatado com uma chave universal, de forma a actuar directamente num *Slave*, como se este recebesse ordens de um *Master*, fazendo *overdrive* de vários parâmetros configuráveis.

A possibilidade de comunicação com e sem fios permite que haja adaptabilidade

a um grande número de situações. A maior limitação destes sistemas é a impossibilidade de comunicar através de estruturas opacas. Essa opção, no entanto, existe bastando transformar um destes módulos num *router*, colocando-o no interior de uma parede com um emissor e receptor em cada divisão. Logo, através de *software* específico, passa a ser possível a comunicação interdivisões. Este sistema podia evoluir ainda para um módulo central, com a informação do estado de todas as luminárias dispostas no espaço.

O sistema, tal como proposto, apresenta limitações de frequência que não permitem velocidades maiores de transmissão. Um desenvolvimento natural é a substituição do Arduino UNO, por um microcontrolador mais potente que permitiria comunicação mais rápida e até podia evoluir para funcionar como um *router* com taxas de transmissão da ordem dos Mbps.

O desenvolvimento de ferramentas de *software* específicas permite que hajam mais aplicações dos módulos para além das referidas nesta tese. Podem ser desenvolvidos *Slaves* híbridos, isto é, módulos que possam obedecer a mais que um *Master*, e *Masters* dispostos em camadas, obedecendo a uma hierarquia, tal como no protocolo *Ethernet*.



## Bibliografia

- [1] AENCde Normalização e Certificação, A.E. (Ed.) (2008). *UNE-EN 15193*. AENOR.
- [2] AENCde Normalização e Certificação, A.E. (Ed.) (2007). *UNE-EN 15232: Eficiencia energética de los edificios: métodos de cálculo de las mejoras de la eficiencia energética mediante la aplicación de sistemas integrados de gestión técnica de edificios*.
- [3] Amanda Beebe, E.B. (2011). Controlling LEDs. In .
- [4] Azevedo, I., Morgan, M., and Morgan, F. (2009). The Transition to Solid-State Lighting. In *Proceedings of the IEEE* **97**, p. 481 -510.
- [5] Bell, A.G. (1880). Photophone-transmitter. In .
- [6] Bell, A.G., Adams, W., Tyndall, and Preece, W. (1880). Discussion on The photophone and the conversion of radiant energy into sound. In *Telegraph Engineers, Journal of the Society of* **9**, p. 375 -383.
- [7] Bonino, D., Castellina, E., and Corno, F. (2009). Automatic domotic device interoperation. In *Consumer Electronics, IEEE Transactions on* **55**, p. 499 -506.
- [8] Bonino, D., Castellina, E., Corno, F., and Liu, M. (2009). Technology independent interoperation of domotic devices through rules. In *Consumer Electronics, 2009. ISCE '09. IEEE 13th International Symposium on*, p. 971 -975.
- [9] Burnett, J. (1994). Survey of power quality in high-rise air-conditioned buildings. In *Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994. Fifth International Conference on*, p. 163 -168.
- [10] Clarke, J. (1966). An introduction to communications with optical carriers. In *Students' Quarterly Journal* **36**, p. 218 -222.
- [11] Company, M. &. (2011). Lighting the way: Perspectives on the global lighting market. LED Magazine. Available <http://img.ledsmagazine.com/pdf/LightingtheWay.pdf>.
- [12] Feng, W., He, Y., and Shi, F.G. (2010). Packaging and AC powering of LED array. In *Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2010 Proceedings 60th*, p. 512 -514.
- [13] Fraden, J. (2004). *Handbook of Modern Sensors Physics Designs and Applications*. Springer-Verlag New York, Inc..
- [14] Gfeller, F., and Bapst, U. (1979). Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. In *Proceedings of the IEEE* **67**, p. 1474 - 1486.
- [15] Gowar, J. (1993). *Optical communication systems*. Prentice Hall.
- [16] Hamamatsu (2003). Photodiode Technical Information. Available at: [http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode\\_technical\\_information.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode_technical_information.pdf).
- [17] Haruyama, S. (2011). Visible Light Communications: Recent Activities in Japan. Graduate School of System Design and Management. Available at: [http://smartlighting.rpi.edu/resources/PDFs/smartspace2011/Smart\\_Lighting\\_ERC\\_Haruyama\\_2011\\_02\\_08.pdf](http://smartlighting.rpi.edu/resources/PDFs/smartspace2011/Smart_Lighting_ERC_Haruyama_2011_02_08.pdf).
- [18] I.E.A. (2011). Saving Energy in a hurry. Available at: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Saving\\_Electricity-1.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Saving_Electricity-1.pdf).
- [19] I.E.A. (2012). Key World Energy Statistics 2012. Available at: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes-1.pdf>.

- [20] Instruments, T. (2012). Texas Instruments: Filter Pro v3.1.0.23446. Texas Instruments. Available at: <https://focus-webapps.ti.com/general/docs/event/eventresultsaction.tsp?actionId=896>.
- [21] Ito, Y., Haruyama, S., and Nakagawa, M. (2006). Rate-Adaptive Transmission on a Wavelength Dependent Channel for Underwater Wireless Communication using Visible Light LEDs. In *IEICE Tech. Rep.* **105**, p. 127-132. Okinawa.
- [22] Koh, S., Van Driel, W., and Zhang, G. (2011). Degradation of epoxy lens materials in LED systems. In *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2011 12th International Conference on*, p. 1/5 -5/5.
- [23] Komine, T., and Nakagawa, M. (2003). Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication. In *Consumer Electronics, IEEE Transactions on* **49**, p. 71 - 79.
- [24] Komine, T., and Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. In *Consumer Electronics, IEEE Transactions on* **50**, p. 100 - 107.
- [25] Komine, T., and Nakagawa, M. (2004). Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lightings. In *Computers and Communications, 2004. Proceedings. ISCC 2004. Ninth International Symposium on* **1**, p. 258 - 263 Vol.1.
- [26] Kumar N, Lourenco N, S.M.A.R. (2008). Visible Light Communication Systems Conception and VIDAS. Available <http://tr.ietejournals.org/text.asp?2008/25/6/359/45428>.
- [27] Lee, D., and Sung, C.-Z. (2010). RFID based intelligent lighting system development for the convenience store. In *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*, p. 4012 -4017.
- [28] Lourenço, N.R.M. (2009). *Communication Systems Using Visible Light: Emitter/Receiver*. M.Sc. thesis, Universidade de Aveiro.
- [29] Mehta, R., Deshpande, D., Kulkarni, K., Sharma, S., and Divan, D. (2008). LEDs A Competitive Solution for General Lighting Applications. In *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE*, p. 1 -5.
- [30] Miki, M., Asayama, E., and Hiroyasu, T. (2006). Intelligent Lighting System using Visible-Light Communication Technology. In *Cybernetics and Intelligent Systems, 2006 IEEE Conference on*, p. 1 -6.
- [31] Miki, M., Hiroyasu, T., and Imazato, K. (2004). Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. In *Cybernetics and Intelligent Systems, 2004 IEEE Conference on* **1**, p. 520 - 525 vol.1.
- [32] Moreira, A.J.C., Valadas, R.T., and de Oliveira Duarte, A.M. (1997). Optical interference produced by artificial light. In *Wirel. Netw.* **3**, p. 131-140.
- [33] Nakamura, S., Mukai, T., and Senoh, M. (1994). Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn-heterostructure blue-light-emitting diodes. In *Applied Physics Letters* **64**, p. 1687 -1689.
- [34] Nakamura, S., Senoh, M., and Mukai, T. (1993). High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes. In *Applied Physics Letters* **62**, p. 2390 -2392.
- [35] O'Brien, D., Zeng, L., Le-Minh, H., Faulkner, G., Walewski, J., and Randel, S. (2008). Visible light communications: Challenges and possibilities. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, p. 1 -5.
- [36] Okuno, A., Miyawaki, Y., Oyama, N., and Dongxu, W. (2006). Unique White LED Packaging Systems. In *Electronic Materials and Packaging, 2006. EMAP 2006. International Conference on*, p. 1 -5.

- [37] Oldfather, W., and Club, I.G. (1923). *Aeneas Tacticus, Asclepiodotus, Onasander*. Harvard University Press.
- [38] Pacheco, F., Lobashov, M., Pinho, M., and Pratl, G. (2005). A power line communication stack for metering, SCADA and large-scale domotic applications. In *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*, p. 61 - 65.
- [39] Pang, G., Kwan, T., Liu, H., and Chan, C.-H. (2002). LED wireless. In *Industry Applications Magazine, IEEE* **8**, p. 21 -28.
- [40] Perry, T. (2003). Red hot [light emitting diodes]. In *Spectrum, IEEE* **40**, p. 26 - 29.
- [41] Polybius, P., and Paton, W. (2011). *The Histories, with an English Translation by W R Paton In*. BiblioBazaar.
- [42] Selvarajan, A., Shenai, K., and Tripathi, V. (1993). *Optoelectronics: technologies and applications*. SPIE Optical Engineering Press.
- [43] Spiez, M.K. (2008). *Luz Comunicante – Interface Digital: USB – Transceptor Óptico*. M.Sc. thesis, Universidade de Aveiro.
- [44] Sterling, C.H. (2008). *Military Communications: From Ancient Times to the 21st Century*. ABC-CLIO.Inc.
- [45] Walbank, F., and Scott-Kilvert, I. (2003). *The Rise of the Roman Empire*. Penguin Books Limited.
- [46] Zheludev, N. (2007). The life and times of the LED [mdash] a 100-year history. In *Nat Photon* **1-4**, p. 189-92.
- [47] (1997). SPIE Conference on Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications. In .
- [48] (2001). *Wireless World World Research Forum*. <http://www.wireless-world-research.org>.
- [49] (2005). *Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash*. <http://www.atmel.com/Images/8271s.pdf>.
- [50] (2006). *Arduino Forum*. <http://arduino.cc/forum/index.php>.
- [51] (2008). *Visible Light Communications Consortium*. [www.vlcc.net](http://www.vlcc.net).
- [52] OPTICWISE (2011). *Optical Wireless Communications – An Emerging Technology*. <http://opticwise.uop.gr/>.
- [53] (2011). *Research and Development: Multy-year Program Plan*. Available at: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl\\_mypp2011\\_web.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2011_web.pdf).
- [54] (2011). *Green Paper - Lighting the Future*. Available at: [http://www.celma.org/archives/temp/EU\\_Green\\_Paper\\_on\\_Solid\\_State\\_Lighting\\_15122011.pdf](http://www.celma.org/archives/temp/EU_Green_Paper_on_Solid_State_Lighting_15122011.pdf)
- [55] (2012). *Global LED Market Overview and Forecast*. <http://www.globallightingforum.org/>.
- [56] (2012). *Building Technologies Program - Solid-State Lighting technology sheet*. Available: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led-color-characteristics-factsheet.pdf>.



## **Anexos**



- Programa de software

```

#include <TimerOne.h>
#include <digitalWriteFast.h>
#include <SoftwareSerial.h>

#define PWM_pin          9           // pulse width modulation pin
#define light_pin        3           // sensor light
#define INT_0            0           // interrupt 0 - pin 2
#define TX               5           // Tx Pin
#define RX               4           // Rx Pin
#define EN_PRES          15000      // define time in ms between interrupt presenece enables
#define L_PRES           30000      // define rime in ms between presence detection
#define M_to_S           300000     // define time in ms when Master becomes Slave
#define DBTxD            300        // define Delay Between Tx Data

unsigned char M_S = 0;               // type of (Module 1-Master 0-Slave) << 1 | presence
unsigned int min_lux = 500;          // minimum light output
unsigned int prs_read = 0;           // present read
unsigned int prv_read = 0;           // previous read
unsigned int DuCy = 511;             // 0..1023 Duty-cycle

unsigned long LAST_PRESENCE = NULL;  // last presence detection
unsigned long GAP_TIME = NULL;       // difference between last presence and actual time

// header FRAME Fields
struct{
    unsigned char M_S_ID :1;         // Original Sender 0- Slave / 1- Master
    unsigned char SN :1;             // Sender 0- Slave / 1- Master
    unsigned char MSG :3;            // Message number 0..7
    unsigned char ID :3;             // Class ID
}Tx_FRAME, Rx_FRAME;
// End header FRAME Fields

// Emitter
unsigned char header_trama;          // Identification Byte str_data[0]
unsigned char data_trama;            // Data Byte -> DuCy str_data[1]
char tx_data[3] = "\0\0";           // Tx init string

// Receiver
unsigned char sync;                  // get synchronization on receiveir
unsigned char flag = 0;              // used to save byte
char rx_data[3] = "\0\0";           // Rx data string
unsigned char prv_MSG = 0;           // previous message number
unsigned char rx_process = 0;        // not rdy to process data = 0

SoftwareSerial mySerial(RX, TX);

void setup()
{
    Serial.begin(57600);              // Open serial communications and wait for port to open
    mySerial.begin(57600);            // set the data rate for the SoftwareSerial port

    //pin configuration
    pinModeFast(PWM_pin,OUTPUT);      // PWM_pin
    pinModeFast(light_pin,INPUT);     // sensor light pin
    Serial.println("Pin Configuration complete!");

    //Tmer 1 setup
    Timer1.initialize(20);            //Begin using the timer @ 50kHz
    Timer1.pwm(PWM_pin,DuCy);         // duty-cycle 50% no pino 9
    Serial.println("Timer 1 setup complete!");

    // Detector de presenca
    attachInterrupt(INT_0, PRESENCE, RISING); // ISR PRESENCE when positive edge detected
    Serial.println("Presence Detector Interrupt complete!");

    //Transmission Frame init
    Tx_FRAME.M_S_ID = 0;
    Tx_FRAME.SN = 0;
    Tx_FRAME.MSG = 0;
    Tx_FRAME.ID = 0;

    //Reception Frame init
    Rx_FRAME.M_S_ID = 0;
    Rx_FRAME.SN = 0;
    Rx_FRAME.MSG = 0;
    Rx_FRAME.ID = 0;

    Serial.println("Setup complete!");
}

void loop() // run over and over
{
    GAP_TIME = millis() - LAST_PRESENCE;
    // turn ON presence interrupt after 15 seconds (default)
    if ((GAP_TIME >= EN_PRES) & (LAST_PRESENCE != NULL))
        attachInterrupt(INT_0, PRESENCE, RISING);
}

```

```

if (M_S <2){
    //start of slave code
    if (mySerial.available()){
        sync = mySerial.read(); // read char
        if ((sync == 0x0A) | (sync == 0x0D)) flag = 0;
    }
    else {
        rx_data[flag] = sync; // save received char
        if (flag == 1) rx_process = 1;
        flag = !flag;
    }
}
if (rx_process){ // if flag = 1, two chars are received
    rx_process = 0;

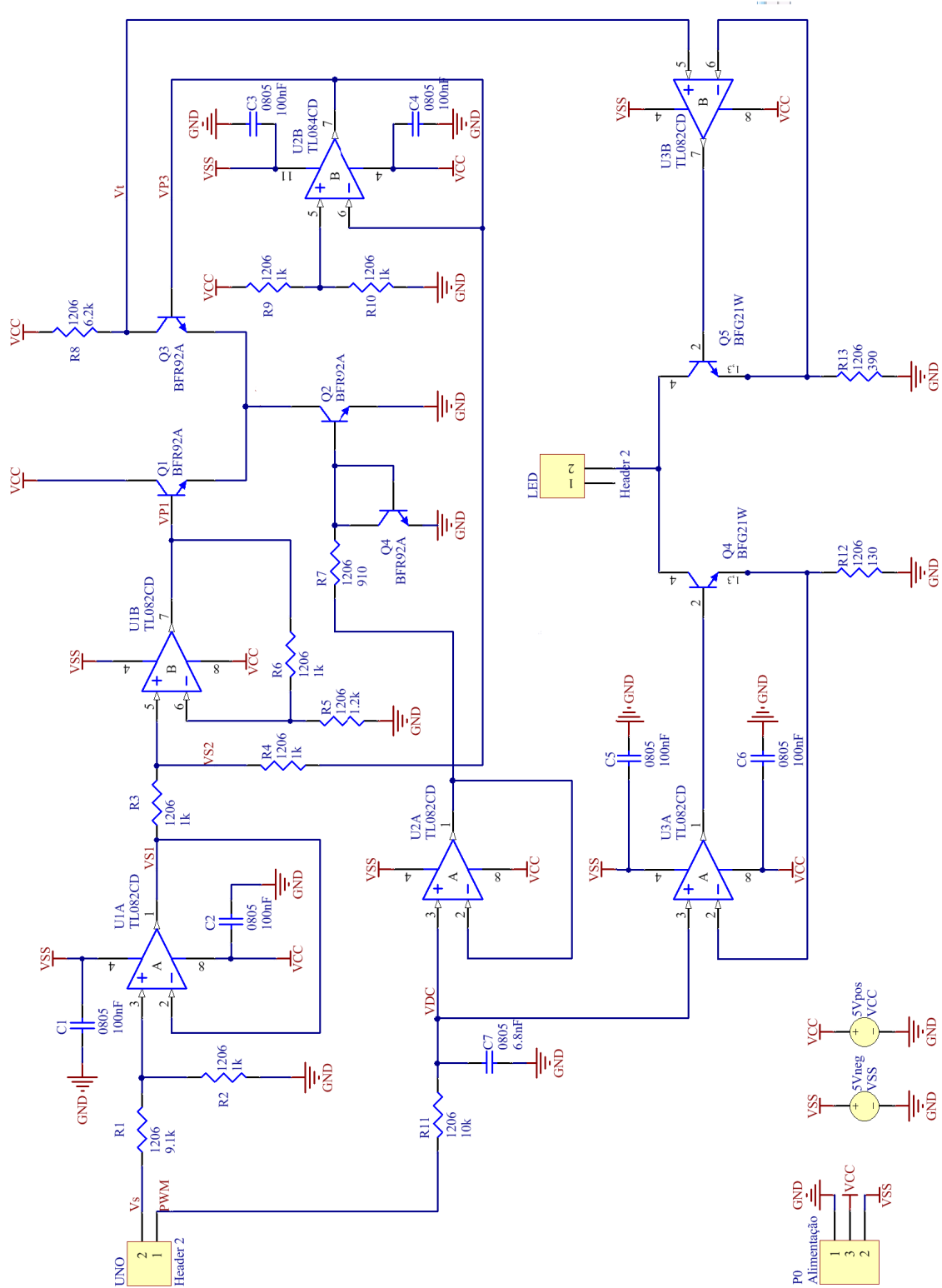
    // save fields in Rx_FRAME structure
    Rx_FRAME.M_S_ID = (rx_data[0] >> 7) & 0x01;
    Rx_FRAME.SN = (rx_data[0] >> 6) & 0x01;
    Rx_FRAME.MSG = (rx_data[0] >> 3) & 0x07;
    Rx_FRAME.ID = rx_data[0] & 0x07;

    if (Rx_FRAME.M_S_ID == 1){ // if M_S_ID = 0 => transmission error -> ignored
        if (Rx_FRAME.MSG != (++prv_MSG % 8)){
            // if ID=1xx & SN=1 -> Master (original transmission) //\ if ID=0xx & SN=0 -> Slave ( re-transmission)
            // else transmission error -> ignored
            if (((Rx_FRAME.ID >= 4) & (Rx_FRAME.SN == 1)) | ((Rx_FRAME.ID < 4) & (Rx_FRAME.SN == 0))){
                if (Rx_FRAME.ID & 0x03 == 0){ // if right CLASS ... 00 (default)
                    if (rx_data[1] <= 0x22) Timer1.setPwmDuty(PWM_pin,0);
                    else{
                        // set new duty-cycle
                        DuCy = (unsigned int) (((rx_data[1]>>4) & 0x0F) * 102 + (rx_data[1] & 0x0F));
                        Timer1.setPwmDuty(PWM_pin,DuCy); // refresh new duty-cycle
                    }
                }
                Rx_FRAME.SN = 0; // set new FRAME field
                Rx_FRAME.ID &= 0x03; // set new FRAME field

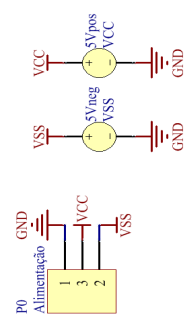
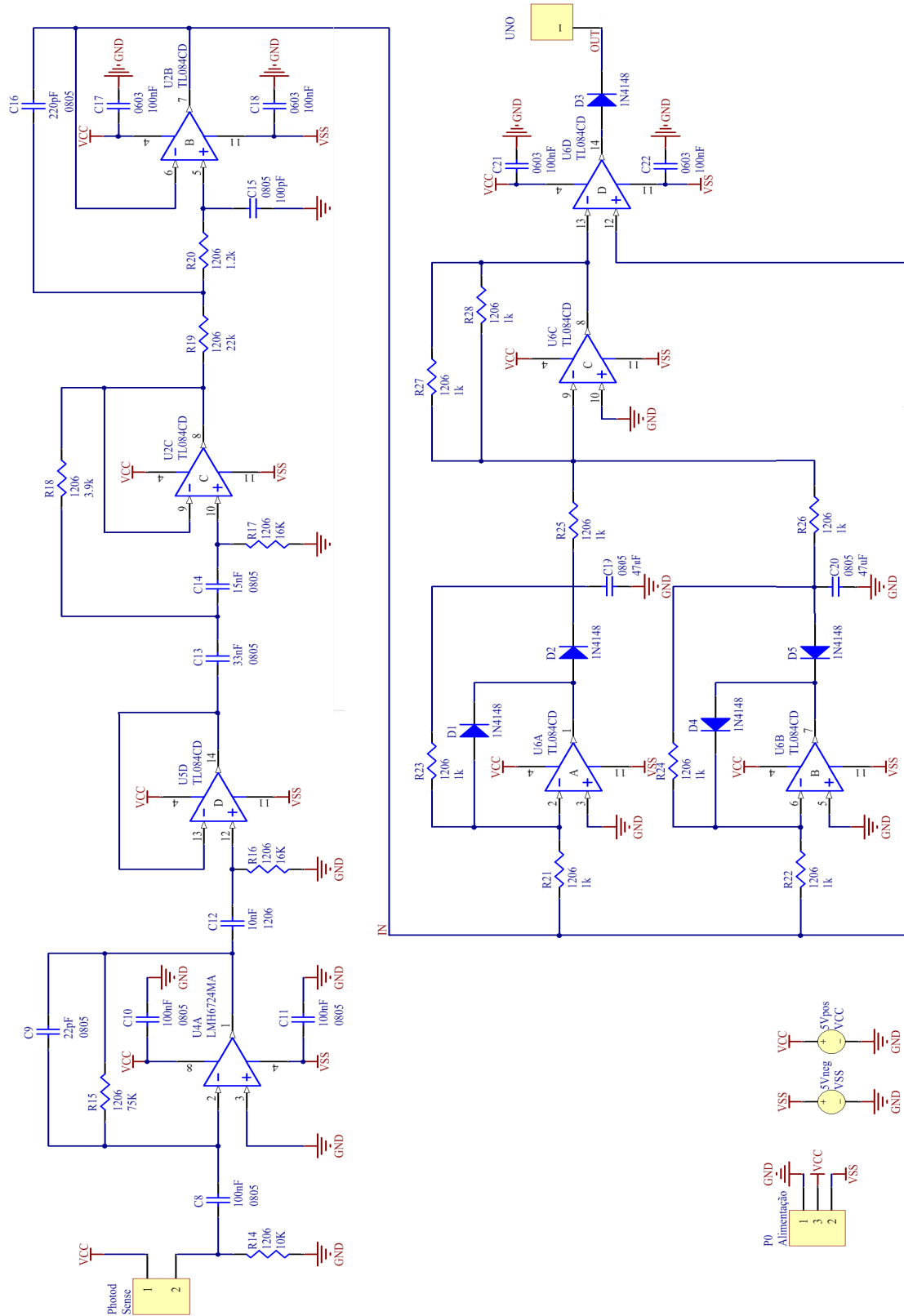
                rx_data[0] = (rx_data[0] & 0xB8) | (Rx_FRAME.SN <<6) | Rx_FRAME.ID; // setup new header
                mySerial.println(rx_data); // send data to serial port
                delayMicroseconds(DBTxD);
            }
        }
        prv_MSG = Rx_FRAME.MSG;
    }
}
} //end of slave code
} // start of master code
else{
    if ((LAST_PRESENCE == NULL) & (GAP_TIME > M_to_S) & (Tx_FRAME.M_S_ID == 1)){ // if true Master becomes Slave
        M_S = 0;
        Tx_FRAME.M_S_ID = 0;
        Tx_FRAME.SN = 0;
        Tx_FRAME.ID = 0x0FB & Tx_FRAME.ID;
        tx_data[0] = (Tx_FRAME.M_S_ID <<7) + (Tx_FRAME.SN <<6) + Tx_FRAME.ID;
        tx_data[1] = 0x22;
        mySerial.println(tx_data); // send data to serial port
        delayMicroseconds(DBTxD);
    }
    else{
        tx_data[0] = (tx_data[0] & 0xC7) | ((Tx_FRAME.MSG & 0x7) << 3); // Setup header
        if (GAP_TIME >= L_PRES){ // LAST_PRESENCE > 30 sec (default)
            tx_data[1] = 0x22;
            mySerial.println(tx_data); // send data to serial port
            delayMicroseconds(DBTxD);
            DuCy = 0; //set duty-cycle NULL
            Timer1.setPwmDuty(PWM_pin,DuCy);
            LAST_PRESENCE = NULL;
        }
        else{
            prs_read = pow(10,map(analogRead(light_pin),0,675,0,3300)/(float)680); // read current light from sensor
            if (prs_read >= min_lux) DuCy = prs_read - 10 * (prs_read - min_lux)/100; // set new duty-cycle
            else DuCy = prs_read + 10 * (min_lux - prs_read)/100;
            prv_read = prs_read; // record last light read
            Timer1.setPwmDuty(PWM_pin,DuCy); // set new duty-cycle
            // Setup Data
            if (DuCy < 11) tx_data[1] = 0x22;
            else tx_data[1] = (unsigned char) (((DuCy/102)<<4) + (DuCy % 102));
            mySerial.println(tx_data); // send data to serial port
            delayMicroseconds(DBTxD);
        }
        Tx_FRAME.MSG = ++Tx_FRAME.MSG & 0x07; // increment message number
    }
} // end of Master code
} // end of loop
void PRESENCE()
{
    LAST_PRESENCE = millis(); // last access
    M_S = 3; // only master has presence sensor
    Tx_FRAME.M_S_ID = 1; // Master = 1 ; Slave = 0
    Tx_FRAME.SN = 1; // Master = 1 ; Slave = 0
    Tx_FRAME.ID = 0x04 | Tx_FRAME.ID; // 0x04 = (M_S_ID << 2)
    tx_data[0] = (Tx_FRAME.M_S_ID <<7) + (Tx_FRAME.SN <<6) + Tx_FRAME.ID;
    detachInterrupt(INT_0); // turn off PRESENCE interrupt
}
}

```

• **Circuito do Emissor VLC**



• Circuito do Receptor VLC



- **Sumário da lista de materiais**

<b>Emissor</b>		
<b>Componente</b>		<b>Qtd:</b>
U1, U2,U3	TL082CD	3
Q1,Q2,Q3	BFR92A	3
Q4, Q5	BFG21W	2
R1	9.1k $\Omega$	1
R2, R3, R4, R6, R9, R10	1k $\Omega$	6
R5	1.2k $\Omega$	1
R7	910 $\Omega$	1
R8	6.2k $\Omega$	1
R11	10k $\Omega$	1
R12	130 $\Omega$	1
R13	290 $\Omega$	1
C1, C2, C3, C4, C5, C6	100nF	6
C7	6.8nF	1

<b>Receptor</b>		
<b>Componente</b>		<b>Qtd:</b>
U4	LMH6724MA	1
U5,U6	TL084CD	2
D1, D2, D3, D4, D5	1N4148	5
R14	10k $\Omega$	1
R15	75k $\Omega$	1
R16, R17	16k $\Omega$	2
R18	3.9k $\Omega$	1
R19	22k $\Omega$	1
R20	1.2k $\Omega$	1
R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28	1k $\Omega$	8
C8, C9, C10, C11, C17, C18, C21, C22	100nF	8
C12	10nF	1
C13	33nF	1
C14	15nF	1
C15	100pF	1
C16	220pF	1
C19, C20	47 uF	2

- PCB (Emissor e Receptor em escala real - 6cm x 6.5 cm)

