

Nuno Miguel Vaz Seca

Universidade Portucalense Infante D. Henrique

Departamento de Inovação, Ciência e Tecnologia

Dissertação de Mestrado em Especialização de Sistemas de Informação



Sistemas de Informação aplicados a Sistemas de
Iluminação Pública

**Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Doutor Fernando Moreira**

Fevereiro de 2013

Anexo 1 - **DECLARAÇÃO**

Nome: _____

Nº. do BI/CC: _____ Tel/Telem.: _____ e-mail: _____

Curso de Doutoramento/Mestrado em _____

Ano de conclusão: ____/____/____

Título da tese / dissertação

Orientador (es):

Declaro, para os devidos efeitos, que concedo, gratuitamente, à Universidade Portucalense Infante D. Henrique, para além da livre utilização do título e do resumo por mim disponibilizados, autorização, para esta arquivar nos respetivos ficheiros e tornar acessível aos interessados, nomeadamente através do seu repositório institucional, o trabalho supra-identificado, nas condições abaixo indicadas:

[Assinalar as opções aplicáveis em 1 e 2]

1. Tipo de Divulgação:

- Total.
 Parcial.

2. Âmbito de Divulgação:

- Mundial (Internet aberta)
 Intranet da Universidade Portucalense.
 Internet, apenas a partir de 1 ano 2 anos 3 anos – até lá, apenas Intranet da UPT

Advertência: O direito de autor da obra pertence ao criador intelectual, pelo que a subscrição desta declaração não implica a renúncia de propriedade dos respetivos direitos de autor ou o direito de a usar em trabalhos futuros, os quais são pertença do subscritor desta declaração.

Assinatura: _____

Porto, ____/____/____

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao orientador da dissertação, Professor Doutor Fernando Moreira, pelo acompanhamento prestado ao longo da execução deste trabalho.

Agradeço também às pessoas que na Schréder Iluminação SA patrocinaram este trabalho. Agradeço em particular ao Dr. Eduardo Costa, ao Eng. Miguel Mattos e Eng.^a Maria Antónia Véstia.

Agradeço também a paciência e motivação que a Sofia me deu e ainda que possa parecer estranho, agradeço à nossa futura filhota, Maria Leonor, pela motivação que já consegue transmitir.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais. Mais do que pelo apoio prestado nesta ocasião, agradeço-lhe e devo-lhes tudo, desde sempre.

Resumo

A Gestão eficiente da iluminação pública é cada vez mais pertinente. Fruto da necessidade de redução e contenção de custos, a tentação tem levado a que diversas entidades optem pelo “apagamento” dos equipamentos de iluminação. Um vez que este procedimento hipoteca a segurança dos transeuntes e porque há sistemas que permitem a redução de custos com recurso a redução de fluxo, será apresentada uma proposta que evidencia que a telegestão como ferramenta para a gestão eficiente das redes públicas de iluminação pode ser levada a um patamar superior em que a simplificação operacional de toda a infraestrutura pode passar pela integração das diversas plataformas heterogêneas que se destinam a essa prática. Para além disso acredita-se que a solução proposta, recorrendo a sistemas de informação com apoio em redes neuronais, pode ser aplicada a este domínio e que se traduzirá em benefícios quantificáveis e assinaláveis.

Palavras-chave

Telegestão, gestão eficiente de iluminação pública, PLC, ZigBee, Inteligência Artificial.

Abstract

Efficiency of public lighting management is getting relevant. Due to costs reduction “obligation” some entities have been falling in the temptation of power off street lighting. Once that this procedure puts in risk people, goods and vehicles' security and considering that there are many lighting flux reduction solutions on the market it will be proposed a prototype to allow to manage public lighting and to achieve a higher lever in which operational simplification can be done by heterogeneous platforms' integration that used to be managed separately. Besides that, it's believed that proposed approach, recurring to information systems' supported on neural networks, can be used on this particular domain contributing to benefit public lighting systems in a remarkable way concerning profitability and operationality.

Keywords

Telemanagement, Efficient Management of Public Lighting, PLC, ZigBee, Artificial Intelligence

Índice

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

1 Introdução	16
1.1 Enquadramento	16
1.2 Motivação	17
1.3 Objetivos	17
1.4 Estrutura da dissertação	18
2 Enquadramento Teórico	19
2.1 Princípios das Redes sem fios	20
2.1.1 Tecnologias <i>wireless</i>	22
2.1.2 Antenas	23
2.1.3 Métodos de deteção de erros	24
2.1.4 Utilização do espectro	24
2.1.5 Modelação de sinal	25
2.2 Wireless Local Area Network (WLAN)	28
2.3 <i>Wireless Metropolitan Area Network</i> (WMAN)	31
2.4 Princípios do ZigBee	35
2.5 Princípios do PLC	36
3 Estado da arte.....	38
3.1 PLC	39
3.1.1 Comunicação <i>Narrowband</i>	42
3.1.2 Comunicação <i>Broadband</i>	44

3.1.3	Caracterização do canal de transmissão usado por PLC.....	44
3.1.4	Compatibilidade eletromagnética em sistemas PLC.....	45
3.1.5	Arquitetura de sistemas PLC	47
3.1.6	Técnicas de Modelação em PLC.....	48
3.1.7	Camada MAC em PLC	51
3.1.8	Gestão de acesso ao meio de transmissão	54
3.1.9	Ortogonalidade.....	58
3.2	ZigBee.....	59
3.2.1	Sensores ZigBee e controlo de rede.....	59
3.2.2	Características da rede ZigBee.....	60
3.2.3	Topologias das redes ZigBee	63
3.2.4	Arquitetura do Protocolo ZigBee.....	64
3.2.5	ZigBee Vs ZigBee PRO	67
3.2.6	Application Layer	70
3.2.7	Segurança em ZigBee	73
3.3	Análise de soluções existentes	75
3.3.1	Sogexi	76
3.3.2	Owlet.....	80
3.3.3	Vossloh-Schwabe.....	83
3.4	Resumo do enquadramento teórico.....	85
4	Modelação da solução proposta.....	91
4.1	Pressupostos.....	94
4.2	Abordagem.....	95
4.3	Vantagens.....	107
5	Conclusão e Perspetivas Futuras.....	109
5.1	Conclusões	109
5.2	Perspetivas futuras	112
6	Referências Bibliográficas.....	113

Apêndice A – 1-10V	117
Apêndice B - DALI.....	118
Apêndice C – DMX	120
Apêndice D – Tipificação de equipamentos de iluminação pública.....	122
Anexo A – LonWorks Protocol	123

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

Termos	Significado
AES-128	Advanced Encryption Standard-128 bits
AM	Amplitude Modulation
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
APS	Application Support Sublayer
APSDE-SAP	Application Support Sub-Layer Data Entity-Service Access Point
APSME-SAP	Application Support Sub-Layer Management Entity-Service Access Point
ARQ	Automatic Repeat Request
ASCII	Standard Code for Information Interchange
ASK	• Amplitude-shift Keying
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BCC	Block check character
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
CBC	Cipher Block Chaining
CCK	complementary code keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CPS	Common Part Sublayer
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Convergence Sublayer
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DAB	Digital Audio Broadcast

DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DBPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying
DES	Data Encryption Standard
DMX	Digital MultipleXed
DQPSK	Differential Quadrature Phase-Shift Keying
DS-CDMA	Direct Sequence - Carrier sense multiple access
DSL	Digital subscriber line
DSSS	direct-sequence spread spectrum
EHF	Extremely High Frequency
ELF	Extra Low Frequency
EMC	electromagnetic compatibility
EME	electromagnetic environment
EMI	electromagnetic interference
SEM	Electromagnetic Susceptibility
FAE	Field Application Engineer
FCC	Federal Communication Commission
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFD	Full Functional Device
FHSS	Frequency-hopping spread spectrum
FM	Frequency Modulation
FS-CDMA	Frequency Sequence - Carrier sense multiple access
FSK	Frequency-shift keying
GPRS	General packet radio service
GSM	Global System for Mobile Communications
HART	Highway Addressable Remote Transducer
HF	High Frequency
HR-DSSS	High Rate Direct Sequence Spread Spectrum

IA	Inteligência Artificial
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISA	Industrial Standard for Automation
ITU	International Telegraph Union
KPSK	Quadrature phase-shift keying
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
LF	Low Frequency
LLC	Logical Link Controller
MAC	Medium Access Control
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MC	Multi carrier
MCM	MultiCarrier Modulation
MF	Medium Frequency
MIC	Message Integrity Control
MIMO	Multiple-input and multiple-output
MWA	Mobile Wireless Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiple access
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PDU	Protocol Data Units
PLC	Power Line Communication
PMP	point-to-multipoint
PSK	Federal Communication Commission
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequência
RFD	Reduced Function Device
SHF	Super High Frequency
SS	Security Sublayer
SS	Service Station
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
TCU	Tegis Central Unit
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TH	Time hopping
TH-CDMA	Time hopping - Carrier sense multiple access
TIC	Técnicas de Informação e Comunicação
UHF	Ultra High Frequency
ULF	Ultra Low Frequency
URL	Uniform Resource Locator
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wide Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Area Network
WRAN	Wireless Regional Area Network
ZDO	ZigBee Device Object
ZDP	ZigBee Device Profile

Índice de Figuras

Figura 1 - Perspetiva de divisão de espectro eletromagnético	25
Figura 2 – Fluxograma CSMA/CA	31
Figura 4 – Topologia de rede MAN "Point MultiPoint"	32
Figura 5 – Topologia de rede MAN com recurso a <i>Mesh Networking</i>	33
Figura 6 – Comunicação PLC	40
Figura 7 – Tipos de compatibilidade eletromagnética	46
Figura 8 – Modelo representativo de EMC	46
Figura 9 – Camadas de rede PLC	47
Figura 10 – Esquematização do funcionamento do <i>Interleaving</i>	49
Figura 12 - Ambiente da camada MAC em PLC	53
Figura 13 – Estrutura da camada MAC	54
Figura 14 – Esquema OFDMA/TDMA (R. van Nee, 2000)	57
Figura 15 – Perspetiva gráfica comparativa de FDMA, TDMA e CDMA	57
Figura 16 – Arquitetura de um nó ZigBee	61
Figura 17 - Topologias ZigBee	64
Figura 18 – Arquitetura do Protocolo ZigBee (Organization, 2008)	65
Figura 19 – Pormenor da Camada Aplicacional da Arquitetura do Protocolo ZigBee (Organization, 2008)	70
Figura 20 – Modelo Criptográfico	74
Figura 21 – Unidade Central de Controlo (Sogexi)	76
Figura 22 – TDX. (Sogexi)	77
Figura 23 – Esquematização de implementação (Sogexi)	78
Figura 24 – Canais de comunicação do sistema Sogexy (Sogexi)	79
Figura 25 – Arquitetura do Sistema Owlet. (Owlet)	80
Figura 26 – Fluxograma de alternância de estados (Ata Elahi, 2009)	82
Figura 27 – Intelligent Luminaire Controller (Vossloh-Schwabe)	84
Figura 28 – Intelligent Pole Controller (Vossloh-Schwabe)	84
Ilustração 29 – Intelligent Light Controller (Vossloh-Schwabe)	85

Figura 30 – Estratégias competitivas genéricas de Michael Porter.....	91
Figura 31 – Análise SWOT da maturidade dos sistemas de Telegestão de Iluminação Pública (“Realidade Schröder vs. Concorrência”).....	93
Figura 32 – Arquitetura do sistema proposto.....	97
Figura 33 – Esquema tradicional de disposição de pontos de luz na via pública.....	98
Figura 34 – Disposição de pontos de luz com endereçamento para telegestão.....	99
Figura 35 – Aplicação do modelo neuronal a sistemas de iluminação pública.....	100
Figura 36 – Tipificação de rede neuronal.....	101
Figura 37 – Sobreposição de cobertura geográfica de luminárias.....	102
Figura 38 – Orgânica dos Sistemas de Gestão de Iluminação Telegeridos.....	103
Figura 39 – Esboço do Modelo de Dados.....	104
Figura 40 – Modelação em camadas do Modelo de Telegestão Integrada.....	104
Figura 41 – Fluxograma Operacional do Sistema de Telegestão Integrado.....	105
Figura 42 – Fluxograma Funcional do Sistema de Telegestão Integrado.....	106
Figura 43 - Perspetiva do sistema integrador de sistemas de iluminação telegeridos.....	108
Figura 44 - Dali aplicado a Building Management Systems.....	119
Figura 45 - Sistema Dali (sistema stand-alone).....	119
Figura 46 - Sistema Dali (Subsistema stand-alone).....	119
Figura 47 - Calculador de endereçamenno DIP Switch.....	121
Figura 48 - Componentes de Sistema de Iluminação Pública.....	122

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Esquematização do modelo OSI (adaptado da referência (Rose, 1990)).....	21
Tabela 2 – Paralelo entre Modelo OSI e IEEE802	22
Tabela 3 – Variação de fase e respectivas representações binárias	26
Tabela 4 – Variações binárias para modelação 8-QAM	27
Tabela 5 – Camada Física e de Ligação de Dados do Standard 802.11	28
Tabela 6 – Canais e Frequências da norma 802.11b.....	30
Tabela 7 – Pormenor da arquitetura do Protocolo WMAN	34
Tabela 8 – Características de IEEE 802.16, IEEE 802.16a e IEEE 802.16e	34
Tabela 9 – Bandas PLC definidas pelo CENELEC	43
Tabela 10 – Comparação das características de DSSS e FHSS.....	51
Tabela 11 – Comparação de características entre WiFi, Bluetooth e ZigBee.	61
Tabela 12 – Bandas de Frequências operadas na camada física.....	65
Tabela 13 – Comparação as funcionalidades das várias especificações ZigBee.	69
Tabela 14 – Tabela comparativa de tecnologias que recorrem a radiofrequência	83
Tabela 15 – Check List para seleção de tecnologia a implementar	86
Tabela 16 – Comparação das soluções comerciais.	87
Tabela 17 - Projeção de redução de custos (comparação com soluções tradicionais).....	110
Tabela 18 – Detalhe de análise SWOT	111
Tabela 19 - Tipificação de Luminárias para Iluminação Pública	122

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Tradicionalmente, a iluminação (particularmente a Iluminação Pública) sempre esteve ligada à área elétrica. Contudo, paradoxalmente, ou não, as tecnologias e os sistemas de informação têm vindo a ganhar preponderância também neste campo. Fruto das necessidades que têm vindo a ser consideradas, a Iluminação Pública afasta-se a passos largos do simples e tradicional acender (que ocorre ao início da noite) e do natural apagão (verificado às primeiras horas do raiar do dia). Atualmente, talvez também fruto da entrada das TIC (Tecnologias de Informação e Comunicação) em tantas áreas às quais não era nuclear, estas são vistas como capazes de acrescentar valor significativo a um domínio ao qual era, por tradição, alheia. Efetivamente, em particular nos dias que correm em que o mundo atravessa uma crise mais ou menos generalizada e em que a escassez de liquidez financeira é transversal a mercados internacionais, ao país em que vivemos, às empresas em que trabalhamos e provavelmente até em nossa casa ou na casa de pessoas que nos são próximas, é do senso comum que a gestão otimizada de recursos pode fazer a diferença entre o sucesso e o insucesso. É à luz desta realidade que cada vez é mais premente poupar e racionalizar os recursos que temos, particularmente quando são escassos (Graves & Ticleanu, 2011). E, não tenhamos dúvida, tanto o dinheiro como a energia são bens potencialmente escassos e merecem ser geridos com o maior zelo. O trabalho apresentado versa sobre dois vetores cuja interseção, senão mesmo sobreposição, aporta valor: a questão da iluminação eficiente e a poupança energética. É neste âmbito, muito para além da economia conseguida com recurso à iluminação LED (Future, 2012), que os SI (nomeadamente com uma aproximação tecnológica sustentada pela IA (Norvig, 2003) e pelo desenvolvimento de uma plataforma de gestão integradora de soluções heterogéneas), conseguem aportar valor significativo.

1.2 Motivação

Apesar da minha formação de base ser ao nível da Informática, foi-me apresentado pela empresa em que trabalho, no início de 2011, o desafio de assumir responsabilidade sobre uma nova área: a Telegestão de Sistemas de Iluminação.

Entendeu o Eng.º Miguel Mattos – diretor geral da Schröder Iluminação SA - propor-me o desafio de assumir o cargo de *Field Application Engineer*, considerando que poderia aportar valor a estes projetos em virtude da minha experiência em Sistemas de Informação. Nessa mesma altura, frequentava o Mestrado em Especialização em Sistemas de Informação da Universidade Portucalense Infante D. Henrique, no Porto e julguei este novo desafio oportuno, tanto a nível profissional como académico.

Foi precisamente esta mudança de paradigma, de uma perspetiva elétrica pura para uma perspetiva “informatizada”, de gestão da iluminação pública que me fascinou e que me conduziu à realização do presente trabalho.

1.3 Objetivos

É no contexto de gestão eficiente e de procura de máxima eficácia que as TIC assumem cada vez maior preponderância no que respeita à iluminação pública. O objetivo do presente trabalho é detalhar algumas das soluções de telegestão existentes no mercado (que já de si aportam valor significativo à iluminação pública), no que respeita, por exemplo, à eficiência energética e a forma como as TIC contribuem para que tal seja possível. Contudo, há ainda espaço para melhorar. O presente trabalho tem precisamente essa orientação: a definição de um modelo teórico, que visa a identificação e supressão de fragilidades, e que permita aportar valor significativo às soluções de telegestão através da dotação dos sistemas de Iluminação Pública utilizando Inteligência Artificial. Desta forma, recorrendo a redes neuronais e à inerente capacidade de previsão de comportamentos, conseguir-se-á otimizar os fluxos de

iluminação, maximizar a poupança energética, reduzir os impactos ambientais e otimizar a alarmística funcional dos sistemas de iluminação pública.

1.4 Estrutura da dissertação

Começar-se-á por abordar o tema dando conta do enquadramento teórico que suporta as redes de comunicação usadas nestes sistemas. De seguida, é dedicado um capítulo à análise do estado da arte, onde se mostra a realidade vivida tendo o cuidado de a confrontar com as mais-valias que estes sistemas proporcionam e a forma como o seu funcionamento é sustentado. No que respeita à forma como funcionam os sistemas de telegestão de iluminação pública, recorrendo a metodologias adequadas, será aprofundada a temática com o estudo sobre algumas das soluções existentes. É também dedicado um capítulo ao resumo do enquadramento teórico onde são abordadas as temáticas anteriores de forma sucinta e objetiva, facilitando assim ao leitor a compreensão rápida dos capítulos anteriores. O trabalho termina com a conclusão e com as perspetivas futuras mas, não sem antes, dedicar um capítulo à idealização de um modelo para uma solução de integração de sistemas de telegestão de iluminação heterogéneos capaz de os dotar de Inteligência Artificial.

2 Enquadramento Teórico

Tal como em qualquer trabalho do género, o primeiro passo para escrever um documento capaz, passa pela realização de um enquadramento teórico. Assim, neste capítulo são apresentados os princípios teóricos que sustentam e alicerçam as tecnologias abordadas ao longo do presente documento. As temáticas abordadas dão uma perspetiva das alternativas tecnológicas que têm socorrido e suportado as soluções de gestão eficiente de iluminação quando aplicadas ao domínio da iluminação pública (Box, 2010).

Inicia-se o capítulo com a abordagem aos princípios elementares subjacentes às redes de comunicação sem fios (Walke, 1999), (Ata Elahi, 2009), (Ferreira, Lampe, Newbury, & Swart, 2010), onde é focada a forma como estão arquitetadas e os seus princípios de funcionamento. Passando pelo enquadramento das mesmas nas normas IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), o paralelismo com o Modelo OSI (Rose, 1990) e pelas formas possíveis de utilizar o espectro disponível para o efeito.

De seguida, é realizado o enquadramento teórico dos princípios inerentes às tecnologias que serão abordadas no presente documento (Ferreira, Lampe, Newbury, & Swart, 2010), (Hrasnica, Haidine, & Lehnert, 2004), (Organization, 2008). Serão estudadas duas: uma tecnologia que permite implementar soluções de gestão eficiente de redes de iluminação pública com recurso a redes sem fios (recorrendo ao protocolo ZigBee); a segunda, que com recurso a redes cabladas é usada para transporte de energia, recorre ao protocolo PLC (IEC, 2001) com o mesmo desígnio. No presente trabalho, tendo como desígnio a poupança de energia e a eficiência energética, é apresentada uma solução que, recorrendo a redes neuronais e a Inteligência Artificial (Koch & Segev, 2012), pretende lançar as bases para a construção de uma solução viável tanto do ponto de vista técnico como comercial.

O presente trabalho reúne informação de diversas fontes que depois de analisada e explanada, visa fundamentar o valor acrescentado que os SI podem aportar, concretamente, à iluminação pública.

2.1 Princípios das Redes sem fios

As redes sem fios (*wireless*, como usualmente são designadas) existem há mais de um século. Na realidade, esta forma de comunicação, que recorre a comunicações por rádio frequência ou infravermelhos existe desde o final do século XIX. (The Nobel Foundation)

No ano de 1888, Heinrich Hertz fez a descoberta das ondas eletromagnéticas e usou-as para a realização de comunicação com recurso a transmissão sem fios. Na mesma altura, demonstrou a existência de radiações eletromagnéticas, criando para o efeito, equipamentos emissores e recetores de ondas de rádio.

No seguimento destas descobertas, e fruto da necessidade de normalização, o IEEE procedeu à padronização das redes de comunicação para a camada 1 e 2 (camada física e de ligação de dados) do modelo OSI (Rose, 1990). Assim, ficou definida a seguinte nomenclatura:

- 802.1 - Gestão de rede;
- 802.2 - LLC (Logical Link Control);
- 802.3 - Ethernet 802.4 - Token Bus;
- 802.5 - Token Ring;
- 802.6 - Redes Metropolitanas;
- 802.7 - MANs de Banda Larga;
- 802.8 - Fibra Óptica;
- 802.9 - Integração de Redes Locais;
- 802.10 - Segurança em Redes Locais;
- 802.11 – Redes Locais sem fios;
- ¹802.15 - Wireless Personal Area Network (Bluetooth);
- 802.16 - Broadband Wireless Access(Wimax);
- 802.20 - Mobile Wireless Access(Mobile-fi);
- 802.22 - Wireless Regional Area Network (WRAN).

¹ No presente documento, serão abordadas as redes *wireless*, tendo o cuidado de aprofundar a tecnologia ZigBee e contrapondo as suas características às da tecnologia PLC.

Consequência da evolução das tecnologias envolventes e inerentes às redes sem fios, estas têm vindo a assumir cada vez mais preponderância e vindo a ser usadas nos mais variados domínios de aplicação. Fruto da vasta aplicação que é possível, têm vindo a ser desenvolvidos diversos *standards* de onde se destacam os seguintes:

- SP100.11 – Wireless Systems for Automation, desenvolvido pela ISA (*Industrial Standard for Automation*);
- Wireless HART – *Highway Addressable Remote Transducer*, desenvolvido pela HART;
- ZigBee – Desenvolvido pela ZigBee Alliance.

Fruto da necessidade de harmonizar a compatibilidade operativa entre equipamentos distintos, foi definido o modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) que estabeleceu as sete camadas *standard* para a interoperabilidade, conforme descrito na tabela 1.

Tabela 1 – Esquematisação do modelo OSI (adaptado da referência (Rose, 1990))

	Data unit	Layer	Function
Applicational Layer	Data	7. Application	Network process to application
		6. Presentation	Data representation, encryption and decryption, convert machine dependent data to machine independent data
		5. Session	Interhost communication, managing sessions between applications
	Segments	4. Transport	End-to-end connections, reliability and flow control
Network Layer	Packet/Datagram	3. Network	Path determination and logical addressing
	Frame	2. Data link	Physical addressing
	Bit	1. Physical	Media, signal and binary transmission

Em Fevereiro de 1980 (Rose, 1990), o IEEE definiu um modelo mais pormenorizado com base no modelo OSI. Desta forma, surgiu o modelo IEEE 802, cuja esquematização está na tabela 2. O pormenor acrescido respeita à divisão da camada original de ligação de dados em duas camadas mais específicas:

- **LLC (*Logical Link Control*)**
Define o formato das *frames* e é independente da tipologia de rede, do meio de transmissão e da MAC;
- **MAC (*Media Access Control*)**
Define o método que um equipamento usa para aceder à rede².

Tabela 2 – Paralelo entre Modelo OSI e IEEE802

MODELO OSI	Modelo IEEE802
Camada 4 - 7	Camada 4 - 7
Camada de Rede	Camada de Rede
Camada Ligação de Dados	Logical Link Control
	Media Access Control ³
Camada Física	Camada Física

2.1.1 Tecnologias *wireless*

De entre as várias tecnologias possíveis para comunicação *wireless*, destacam-se pelo uso comum, as comunicações por infravermelhos e por radiofrequência. A comunicação por infravermelhos

² Numa rede Ethernet é usado CSMA/CD; numa rede Token Ring ou Token Bus é usado um token de controlo; numa rede Wireless é usado CSMA/CA

³ Camada respeitante à normalização 802.xx

é mais adequada a uso doméstico, uma vez que, pelas suas características necessita que haja campo aberto entre o emissor e o recetor. A comunicação por radiofrequência pode ser de um de dois tipos:

- Banda estreita (*narrowband*)
A informação é transmitida numa frequência determinada (tal como acontece nas emissões AM e FM de rádio);
- *Spread-Spectrum*
A informação é transmitida num intervalo de frequências.

A grande vantagem em recorrer a *spread-spectrum* é a possibilidade de usar diversas frequências e assim evitar os distúrbios que podem acontecer no uso de uma frequência isolada (como ruído). Além desta característica, os sinais em *spread-spectrum* são mais difíceis de interceptar, o que os torna mais seguros.

2.1.2 Antenas

As Antenas são indissociáveis de qualquer mecanismo de comunicação *wireless*. A antena é na génese um condutor usado para irradiar e receber ondas eletromagnéticas que se caracterizam por dois aspetos:

- Direccionalidade
Respeita à direção em que os sinais de radiofrequência são emitidos. Podem ser emitidos de forma omnidireccional (emissão feita em 360° à volta da antena) ou de forma direccional, numa determinada orientação;
- Ganho
O ganho de uma antena é medido em dBi⁴.

⁴ “dB” respeita a decibel e “i” a isotrópico. Uma antena isotrópica é uma antena “ideal” capaz de emitir sinal em todas as direções de forma igual.

2.1.3 Métodos de detecção de erros

Quando é enviada informação para um recetor, esta pode chegar corrompida, em virtude da existência de fatores perturbadores. Assim, o recetor tem que, primeiramente avaliar a integridade da mensagem recebida. As fontes de perturbação mais comuns são:

- Ruído de impulso;
- Atenuação;
- Ruído térmico e ruído “branco”;
- Interferências rádio.

Para detetar os erros pode recorrer-se às seguintes técnicas:

- Validação de Paridade;
- BCC (*Block check character*);
- CRC (*Cyclic Redundancy Check*).

2.1.4 Utilização do espectro

O espectro de frequências disponíveis não é, naturalmente, ilimitado. A limitação a que está sujeito resulta da necessidade de impor limites de frequência que tornem possível a coexistência de várias comunicações, com finalidades distintas e para evitar que haja colisão entre as frequências usadas. Desta forma evita-se a perturbação entre as comunicações que partilham uma determinada banda do espectro, usando para o efeito frequências distintas.

O espectro eletromagnético para radiofrequência é dividido da seguinte forma:

- EHF - (*Extremely High Frequency*): 30-300 GHz
- SHF - (*Super High Frequency*): 3–30 GHz
- UHF - (*Ultra High Frequency*): 0.3–3 GHz
- VHF - (*Very High Frequency*): 30-300 MHz

- HF - (*High Frequency*): 3-30 MHz
- MF - (*Medium Frequency*): 0.3-3 MHz
- LF - (*Low Frequency*): 30-300 kHz
- VLF - (*Very Low Frequency*): 3–30 kHz
- ELF- (*Extra Low Frequency*): 3-3000 Hz
- ULF - (*Ultra Low Frequency*): até 3 Hz

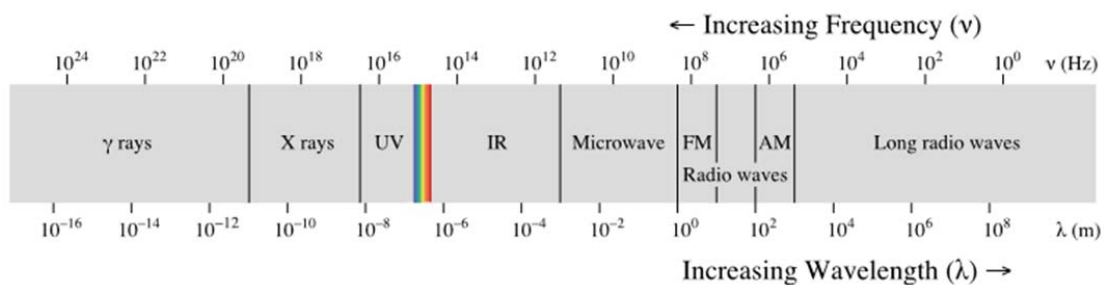


Figura 1 - Perspetiva de divisão de espectro eletromagnético (E. Stroem, 2002)

Esta divisão, conforme apresentada na figura 1 (Walke, 1999), resulta da norma ditada pela ITU (*International Telegraph Union*) em 1920. Atualmente, em Portugal é competência da ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações) zelar pela utilização do espectro⁵.

2.1.5 Modelação de sinal

A modelação do sinal é crucial e compete à camada física do modelo OSI a tradução do sinal digital em sinal analógico, capaz de ser transmitido. Neste processo, pode recorrer-se a diversas técnicas, entre as quais se destacam as seguintes:

- ***Amplitude-shift Keying (ASK)***

⁵ Nos Estados Unidos da América, a regulação das telecomunicações e radiodifusão está a cargo da FCC (Federal Communication Commission).

Este método recorre a mudanças de amplitude para representar “0” e “1”. Cada ciclo representa 1 bit;

- ***Frequency-shift keying (FSK)***

Método que aplica uma variação de frequência para representar “0” ou “1”. A não variação de frequência é sinónimo de “0”, enquanto o “1” é representada por uma variação da frequência original;

- ***Phase-shift keying (PSK)***

Com recurso a esta técnica de modelação recorre-se à fase do sinal para representar a informação binária. Nesta modelação, cada ciclo pode representar 2 bits, tal como descrito na tabela 3:

- ***Binary phase-shift keying (BPSK)***

O sinal sofre um desfasamento de 180° que simboliza “1”. Se não houver desfasamento, é representado “0”;

- ***Quadrature phase-shift keying (QPSK)***⁶

Cada sinal é desfasado por incrementos de 90° que se traduzem nos valores binários descritos na tabela 3.

Tabela 3 – Variação de fase e respetivas representações binárias

Variação da Fase	Valor Binário
0°	00
90°	01
180°	10
270°	11

- ***Quadrature Amplitude Modulation (QAM)***

Técnica de modelação que combina PSK e ASK. A combinação de quatro fases e duas amplitudes permite gerar 8 sinais diferentes, conforme apresentado na tabela 4.

⁶ Há também uma variante deste método que aplica um desfasamento de 45° e que permite a representação de 3 bits

Tabela 4 – Variações binárias para modelação 8-QAM

Variação da Fase	Valor Binário	Amplitude
0º	000	A1
0º	001	A2
90º	010	A1
90º	011	A2
180º	100	A1
180º	101	A2
270º	110	A1
270º	111	A2

2.2 Wireless Local Area Network (WLAN)

As redes *wireless*⁷ podem recorrer a infravermelhos ou a radiofrequência como meio de transmissão de sinal. Segundo o IEEE 802.11, os *standards* para comunicação sem fios no que respeita à camada de Ligação de Dados e à camada Física são os descritos na tabela 5:

Tabela 5 – Camada Física e de Ligação de Dados do Standard 802.11

Logical Link Control					Data Link Layer
Medium Access Control					
IEEE 802.11	IEEE 802.11b	IEEE 802.11a	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n	Physical Layer
DSSS ⁸ e FHSS ⁹	HR-DSSS ¹⁰	OFDM ¹¹	OFDM	OFDM MIMO ¹²	
1 e 2 Mbps	1, 2, 5.5 e 11 Mbps	6, 12, 18, 24, 36, 45, 54 Mbps	6, 12, 18, 24, 36, 45, 54 Mbps	600 Mbps	

⁷ Designadas na nomenclatura IEEE por 802.11

⁸ DSSS – Com recurso a esta técnica, antes da transmissão, cada um dos bits é subdividido em vários bits (ao resultado desta divisão chama-se chip). O chip é gerado aplicado a função lógica XOR de forma pseudoaleatória. O resultado é depois modelado e transmitido através da camada física. A DSSS permite dois tipos de modelação: DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying) – Usada para data rates de 1 Mbps; DQPSK (Differential Quadrature Phase-Shift Keying) – Usada para data rates de 2 Mbps.

⁹ FHSS – O princípio de funcionamento de FHSS é conseguido com base na divisão igualitária do espectro em 79 canais de comunicação com 1 MHz.

¹⁰ HR-DSSS – Recorre a uma faixa de frequências alargadas para como forma de reduzir a potencia do sinal emitido requerendo assim, uma largura de banda elevada

¹¹ OFDM – A modelação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é uma modelação particular de MCM (*MultiCarrier Modulation*) que se caracteriza por portadoras (*carriers*) densamente espaçadas e por espectros sobrepostos. Esta modelação quando comparada com BPSK ou QPSK, transmite símbolos com duração temporal elevada mas em banda estreita. Detalhes da tecnologia de modelação podem ser consultados em (Cimini, 1985) e (Rodrigues, 2002).

¹² MIMO – Recorre a antenas múltiplas no emissor e recetor para melhorar o desempenho da comunicação.

A Camada Física tem as seguintes características:

- Modelação e codificação da informação inerente ao envio e receção;
- Permitir diversos débitos associados à velocidade de transmissão;
- Avaliar a disponibilidade do canal para a transmissão de informação.

Para além das características enunciadas assume as seguintes particularidades:

- **IEEE 802.11** – Desenhada para permitir comunicações entre 1 e 2 Mbps. Suporta como tipo de transmissão de dados tanto FHSS como DSSS;
- **IEEE 802.11b** – É uma extensão da camada física da norma 802.11 de forma a permitir débitos de 5,5 e 11 Mbps. Para que estas velocidades sejam possíveis, recorre a uma codificação complementar designada por CCK. Adicionalmente, este *standard*, define 11 canais de comunicação separados entre si por uma frequência de 5 MHz¹³, tal como descrito na tabela 6;
- **IEEE 802.11g** – Opera na frequência de 2,4GHz usando DSSS e OFDM para a transmissão de informação;
- **IEEE 802.11n** – Recorre a múltiplos *inputs* e *outputs* (MIMO) para receber e transmitir informação. Para aumentar os débitos, recorre-se a múltiplas antenas para transmitir e receber informação.

¹³ Cada canal tem uma frequência de 16MHz, o que provoca a sobreposição de frequências em canais adjacentes. Contudo, a norma garante a não existência de *overlapping* para os canais 1, 6 e 11.

Tabela 6 – Canais e Frequências da norma 802.11b

Número do Canal	Frequência Central (MHz)
1	2412
2	2417
3	2422
4	2427
5	2432
6	2437
7	2442
8	2447
9	2452
10	2457
11	2462

No que respeita à camada MAC (*Media Access Control*) consideram-se as seguintes características.

- Suporte de múltiplas camadas físicas;
- Garante o controlo de acessos;
- Fragmentação e encriptação das *frames*;
- *Roaming*.

Quanto ao método de acesso, tanto em redes WLAN (Walke, 1999) como ZigBee (Ata Elahi, 2009), é o CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). O processo de transmissão consiste no procedimento descrito na figura 2.

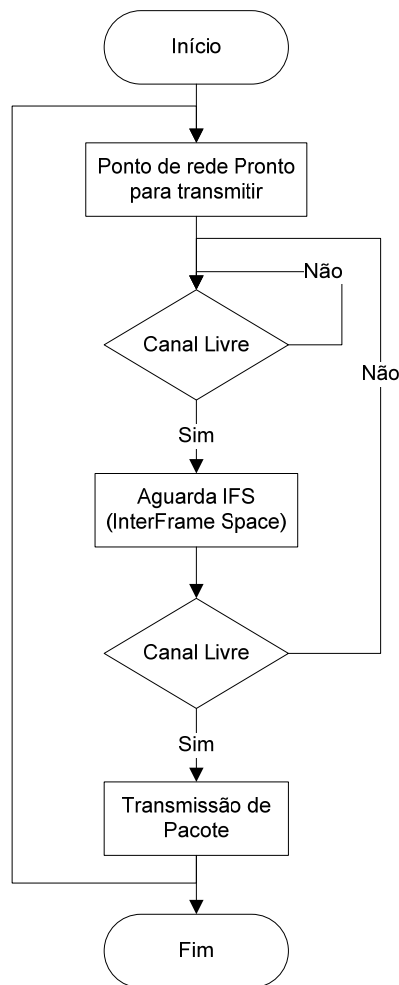


Figura 2 – Fluxograma CSMA/CA

2.3 Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)

As redes WMAN, também conhecidas como BWA (*Broadband Wireless Access*) e ilustradas na figura 4, são um *standard* definido pela norma IEEE 802.16 para poder ser dada resposta às necessidades identificadas no âmbito de comunicação entre edifícios distintos, tais como hospitais, aeroportos, *campus* universitários, polícia e outras autoridades de proteção civil. Sendo uma alternativa sem fios dispensam naturalmente as infraestruturas tradicionais cabladas como canal de comunicação.

Este fator faz com que a instalação deste tipo de redes possa ser mais barata, quando comparada com redes suportadas por cabos.

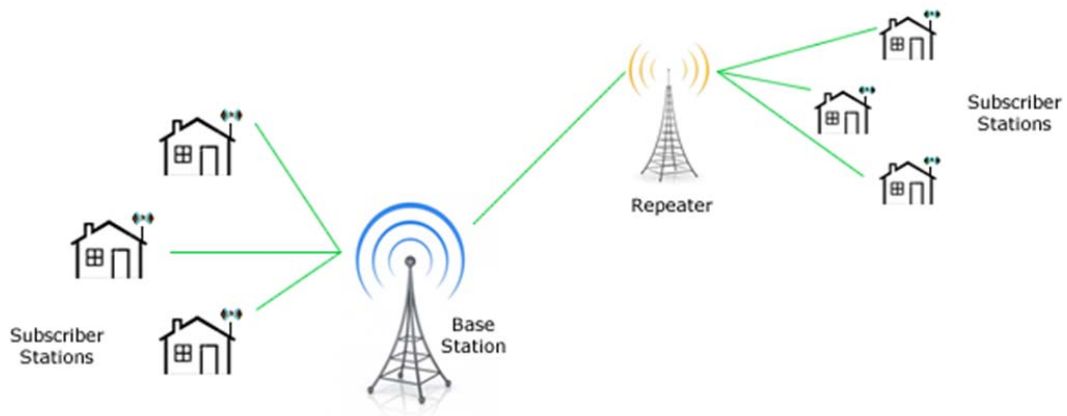


Figura 3 – Topologia de rede MAN "Point MultiPoint"

A topologia descrita na figura 4 é tipicamente a usada em implementações de WMAN (ou BWA). Contudo, há uma variante que pode ser implementada quando não há “linha de vista” entre as *Subscriber Stations*. Nesta variante, descrita pela figura 5, os diversos subscritores utilizam uma rede *ad hoc*¹⁴ entre si, o que lhes permite realizar comunicação sem necessidade dos nós estarem em linha de vista.

¹⁴ Redes *Ad hoc* é uma rede em que todos os terminais funcionam como routers capazes de encaminhar as comunicações dos terminais vizinhos.

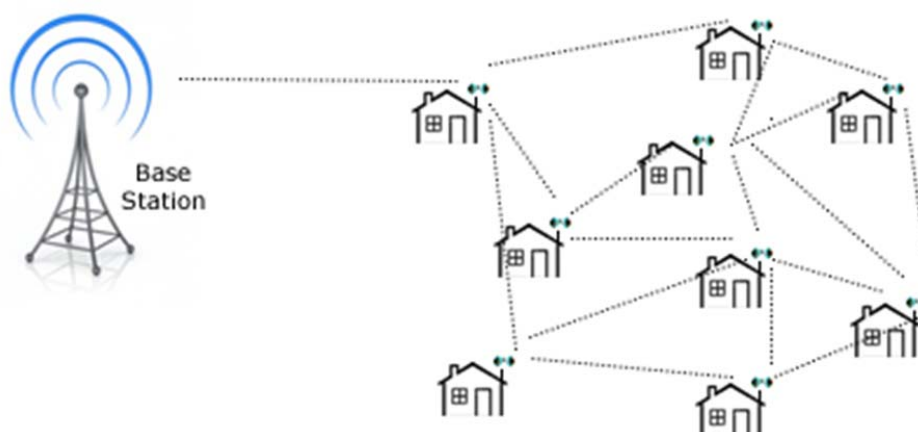


Figura 4 – Topologia de rede MAN com recurso a *Mesh Networking*

A norma 802.16 define os *padrões* da camada física e da camada MAC para as redes WMAN.

Como é apresentado na tabela 8 a camada MAC é suportada por duas camadas. A camada MAC, por sua vez, é dividida em três subcamadas:

- **CS (*Convergence Sublayer*):** Tem como finalidade o transporte de vários tipos de *protocol data units* (PDU) de que são exemplo ATM, IPv4, IPv6 e Ethernet. Esta camada é responsável pela aceitação da informação vinda da camada superior (*Logical Link Control*) e pela conversão para o formato MAC;
- **CPS (*MAC Common Part Sublayer*):** Com recurso a uma transmissão PMP usa uma conexão orientada que permite à *Base Station* usar uma antena de múltiplos sectores para enviar dados de forma não coordenada e de forma simultânea às várias *Subscriber Stations*;
- **SS (*Security Sublayer*):** Tem como finalidade realizar a autenticação entre a BS e às várias SS. Tem também a finalidade de encriptar e desencriptar a informação. Esta subcamada recorre a certificados X.509 para realizar a autenticação e a *Data Encryption Standard* (DES) de 56 bits para realizar a encriptação da informação transmitida na rede.

Tabela 7 – Pormenor da arquitetura do Protocolo WMAN

Sublayer de Convergência (CS)		Camada MAC
Sublayer MAC Comum (CPS)		
Sublayer de Segurança (SS)		
Convergência de transmissão		Camada Física
IEEE 802.16	IEEE 802.16a IEEE 802.16e	

Este *standard* define três especificações para a camada física. São elas: IEEE 802.16. IEEE 802.16a e IEEE 802.16e (comparadas entre si na tabela 9).

Tabela 8 – Características de IEEE 802.16, IEEE 802.16a e IEEE 802.16e

Características	IEEE 802.16	IEEE 802.16a	IEEE 802.16e
Espectro de Frequências	10 – 66 GHz	2 – 11 GHz	2 – 11 GHz (fixo) 2 – 6 GHz (móvel)
Operação	Linha de vista	Sem linha de vista	Sem linha de vista
Bit Rate Máximo	32 – 134 Mbps	1 – 75 Mbps	1 – 75 Mbps
Tipo de Modelação	QPSK 16 QAM 64 QAM Single Carrier	QPSK 16 QAM 64 QAM Single Carrier OFDM (256/2048 subcarriers)	QPSK 16 QAM 64 QAM
Duplexing	TDD / FDD	TDD / FDD	TDD / FDD
Largura banda do Canal	20, 25 e 28 MHz	1.25, 1.75, 3.5, 5, 8.75, 10, 14 e 15 MHz	1.25, 1.75, 3.5, 5, 8.75, 10, 14 e 15 MHz
Método de transmissão	Single Carrier	256 OFDM ou 2048 OFDM	256 OFDM Single Carrier ou OFDM escalável
Topologia	PMP	PMP e Mesh	PMP e Mesh

2.4 Princípios do ZigBee

O ZigBee (Organization, 2008) é uma especificação que permite optar por duas formas de implementação e que tem funcionalidades diferentes: ZigBee e ZigBee PRO.

Enquanto a ZigBee é particularmente indicada para soluções de redes em pequena escala, com centenas de dispositivos, a ZigBee PRO permite a comunicação entre milhares de dispositivos e facilita a gestão dos mesmos. Apesar das ligeiras diferenças, por uma questão de interoperabilidade, podem coexistir sem qualquer restrição.

Entre as características partilhadas e mais importantes, há a destacar as seguintes:

- Operam na frequência de 2.4 GHz (especificação IEEE 802.15.4):
 - No Continente Americano operam com frequência de 915 MHz;
 - No continente Europeu operam com frequência de 868 MHz.
- Recorrem a 16 canais para agilizar a comunicação;
- Todos os dispositivos são caracterizados por baixo consumo energético;
- Incorporam tecnologia que permite a descoberta automática dos nós da rede, mas requiere validação dos nós para que sejam integrados na rede;
- Definição de topologia em estrela na PAN (*Personal Area Network*);
- Diversos mecanismos de transmissão, nomeadamente *broadcast*;
- Mecanismos de segurança com recurso a chaves de segurança;
- Recurso ao *standard* AES-128 para encriptação de comunicação.

Para além das características apresentadas anteriormente, há que referir, e dar ênfase, ao facto desta tecnologia ter os seus alicerces no baixo consumo energético, no pouco volume de informação transmitido e no reduzido custo de implementação. Inicialmente, esta tecnologia foi pensada para poder dar resposta a recolha de dados provenientes de diversos sensores, usado para o efeito sinais de radiofrequência não licenciados.

Assim, pode-se assumir que a ZigBee é tecnologicamente comparável às redes Wi-Fi e *Bluetooth*. Os nós de uma rede ZigBee comportam-se como retransmissores de informação dentro da

malha definida pela rede (*Mesh*) fazendo chegar a informação a cada um dos nós, consoante o caminho disponível para o efeito.

2.5 Princípios do PLC

O PLC (*Power Line Communication*) (Ferreira, Lampe, Newbury, & Swart, 2010) é uma tecnologia que recorre à infraestrutura física das redes elétricas instaladas como meio de comunicação. A grande vantagem desta tecnologia é, naturalmente, o recurso à infraestrutura de redes mais disseminada em todo o mundo: a infraestrutura de rede elétrica. Desta forma, não necessita de obras massivas de edificação para transmitir os sinais necessários à comunicação. O facto de poder usar-se uma infraestrutura já existente (seja de alta, média ou baixa tensão) é altamente vantajoso, uma vez que os custos para disponibilizar o serviço baixam consideravelmente. Em contraponto à facilidade de disseminação do sinal, apresenta uma debilidade quando comparada com redes *wireless*: não é possível aceder ao canal a menos que ele disponha de acesso físico ao cabo elétrico usado para a transmissão.

À semelhança da tecnologia ZigBee, a comunicação por linha de corrente, recorre à camada de ligação de dados do modelo OSI pelo que tem interconectividade com a camada 3 (a de rede) e pode ser associada a uma rede TCP/IP.

Esta tecnologia teve origem nos anos 20 do século XX e foi inicialmente usada pelas empresas de energia elétrica para satisfazer as necessidades de comunicação entre infraestruturas remotas. Contudo, a generalização (relativa) desta tecnologia só acontece por volta do ano de 1996 quando se conseguiu atenuar os problemas de ruído que causavam interferências nas comunicações de dados.

Uma vez que a PLC usa o mesmo canal da energia elétrica convém esclarecer que tal só é possível devido ao uso de frequências não coincidentes. Uma vez que a frequência na corrente elétrica tem valores entre os 50 e os 60 MHz, a frequência usada para a transmissão de dados varia entre 1 e 30 MHz. No que respeita a velocidade de transmissão, existe uma perfeita simetria, uma vez que a velocidade de envio é igual à velocidade de receção. Há também que considerar que a transmissão por PLC pode ser *indoor* ou *outdoor*, consoante se recorre a uma rede elétrica doméstica ou pública.

Como vantagens desta tecnologia temos o facto de qualquer ponto de corrente ser um potencial ponto de rede (mediante a instalação de um equipamento de conectividade). Outra vantagem significativa prende-se com os altos débitos que são possíveis: 200 Mbps numa frequência balizada entre 1,7 e 30 MHz.

3 Estado da arte

No presente capítulo as tecnologias referidas anteriormente, PLC e ZigBee, são aprofundadas com maior rigor. Ainda assim, e porque não é objeto do presente trabalho, o estudo das tecnologias envolvidas não é exaustivo. O que se pretende é abordar os aspetos tecnológicos relevantes e, cuja análise, permite sustentar o modelo integrador de sistemas de iluminação telegeridas que recorrem a diferentes tecnologias que será apresentado no capítulo 4.

A forma como o presente capítulo é conduzido aborda inicialmente os pressupostos que sustentam as tecnologias em análise e termina com a análise de soluções tecnológicas comercializadas por empresas dedicadas a este mercado.

Constata-se que apesar da maturidade que as soluções técnicas e comerciais apresentam, sendo ainda tecnologias relativamente recentes, não estão difundidas de forma massificada. Este binómio de equilíbrio entre a perspetiva técnica e comercial não permite ainda a otimização de alguns aspetos que podem ser vistos como críticos e que fazem com que, curiosamente, mesmo a coexistência de soluções da mesma marca comercial e que recorram à mesma tecnologia não possam conviver em perfeita sintonia.

3.1 PLC

O PLC, como já foi referido, é uma tecnologia que recorre à infraestrutura elétrica existente como canal de comunicação, evitando assim custos elevados no que concerne à criação de instalações dedicadas. Prova disso é o facto de esta tecnologia ser encarada pelos prestadores de serviços de dados como uma alternativa ao que é designado como “*last mile*”. Assim, é uma tecnologia tida como válida para a chegada de comunicações de forma individualizada à casa dos subscritores particulares, evitando assim a criação de infraestruturas dedicadas que façam chegar os serviços contratados a casa de cada um dos clientes finais.

Genericamente, pode-se dividir o PLC em dois grupos. O primeiro, *narrowband*, que permite comunicações a velocidades reduzidas (até 100 kbps) que é usado para aplicações de controlo de automação e para canais de voz¹⁵. O segundo, *broadband*, usado para transferências com velocidades que podem atingir os 2 Mbps e assim permitir o acesso à Internet e serviços de comunicação em paralelo.

Há, contudo, uma grande fragilidade nos sistemas PLC, estes não obedecem a *standards* de rede. Na realidade é suposto que a frequência usada não exceda os 30 MHz. Este aspeto (que não está completamente definido) pode ocasionar aquilo que é definido como "problemas de electrocompatibilidade" (IEC, 2001) e que podem fazer-se sentir pela existência de interferências com outros sistemas de telecomunicações como, por exemplo, serviços de rádio. Desta forma, considera-se que o PLC ainda está numa fase de maturação que será determinante para o seu futuro. O facto de não haver normalização objetiva dificulta a recolha de fontes cuja fidelidade não possa ser posta em causa. Contudo, o objetivo do estudo sobre PLC no presente documento centra-se na forma como as comunicações sobre redes PLC são efetivadas, nas suas características e no “ambiente” necessário para que a transmissão possa ocorrer através das redes de energia e não exatamente nos aspetos da engenharia relacionada com a transmissão propriamente dita.

¹⁵ Notar que para a realização de comunicação de voz são tidos como padrão os seguintes valores (abaixo de 100 kbps): 800 bps para que a voz possa ser reconhecida; 8 kbps para qualidade telefónica; 32 kbps para qualidade de emissões em AM; 96 kbps para emissões em FM.

Nas últimas décadas, o recurso a redes de telecomunicações tem sofrido um incremento impressionante. Fruto desta necessidade, os investimentos em infraestruturas de comunicação dedicadas têm trazido custos elevados para os operadores de comunicações e, nem sempre, com o retorno estimado inicialmente. Noutras circunstâncias, em virtude do baixo retorno, são atrasados ou abortados projetos destinados à expansão das redes de dados de alta velocidade. Exemplo disso é o facto de no interior de Portugal o acesso a serviços disponibilizados por operadores de cabo só ser possível via satélite. Foi precisamente este aspeto que potenciou o PLC como uma alternativa válida.

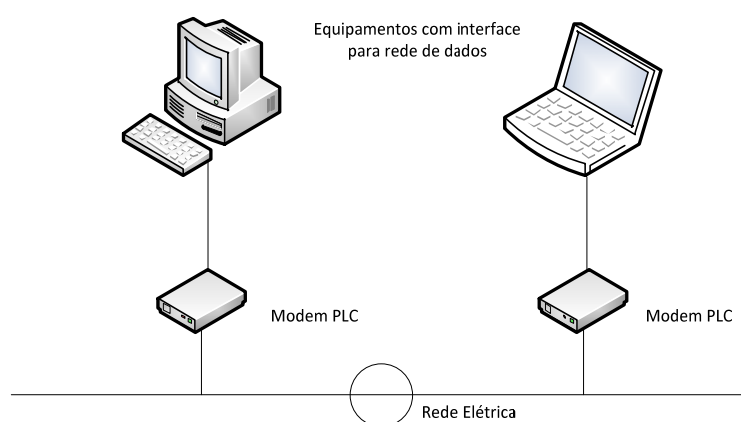


Figura 5 – Comunicação PLC

Tal como ilustrado na figura 6, para que a comunicação PLC funcione é necessária a instalação de equipamento capaz de fazer a conversão do sinal emitido pelos vários equipamentos num formato capaz de ser transmitido pelas redes elétricas. No sentido inverso, o mesmo *modem* é responsável pela transformação do sinal recebido em sinal capaz de ser percebido pelo equipamento que lhe está associado.

A razão de ser destes *modems* não tem unicamente a ver com a modelação do sinal. A importância dos mesmos vai para além disso, uma vez que as redes elétricas não são o canal ideal para a transmissão de dados. O meio usado é caracterizado pela atenuação de frequência e pela existência de ruído que perturba e distorce o sinal enviado. Nem mesmo o facto de operar num espectro de frequências que não excede os 30MHz é sinónimo absoluto de robustez, uma vez que essa gama de frequências é usada por diversos serviços de rádio. Também há que considerar que uma rede PLC se comporta como se fosse uma antena que irradia interferências eletromagnéticas capazes de perturbar serviços que

operem nesta frequência. Para minorar os impactos colaterais entre transmissões que recorrem a frequências semelhantes, a potência de sinal tem que ser controlada. Este aspeto tem impacto na distância a que é possível comunicar, nas velocidades de transmissão e no aumento da sensibilidade da comunicação, que se traduz na vulnerabilidade da mesma.

Ainda assim, com todas as aparentes fragilidades, o PLC continua a ser uma alternativa válida. Para reduzir o impacto do meio usado, recorre-se a mecanismos de modelação altamente eficientes que otimizam a utilização do espectro. A modelação usada é baseada em algoritmos OFDM¹⁶ (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

No que respeita ao mecanismo para correção de erros recorre-se a mecanismos usados também por outras tecnologias de transmissão de dados, tais como FEC (*Forward Error Correction*)¹⁷ e ARQ¹⁸ (*Automatic Repeat Request*).

Outro aspeto importante e a ter em conta é a qualidade de serviço que o PLC deve assegurar (até porque compete comercialmente com outros fornecedores de serviços similares). Nesse sentido e não havendo normalização absoluta sobre PLC, cada fabricante recorre a soluções próprias que lhes permitam atingir eficiência no controlo da camada MAC¹⁹ (*Medium Access Control*).

No que concerne à forma como é gerido o meio de comunicação, uma vez que o mesmo é partilhado é necessária a existências de uma política de gestão de acesso. A execução desta tarefa está a cargo de uma estação central que desempenha assim o controlo e gestão de toda a rede PLC.

Nas redes de baixa tensão, criadas com a finalidade de fornecer clientes finais, dada a grande variedade de dispositivos que podem ser ligados à corrente elétrica, há maior probabilidade de

¹⁶ Método de codificação digital em frequências portadoras distintas como forma de conciliar sinais emitidos numa mesma frequência para destinos/distancias diferentes.

¹⁷ Consiste no envio repetido da informação de comunicação para que o recetor minore a probabilidade de interpretação errada.

¹⁸ Método de controlo de erros que consiste no envio de confirmações de receção ao emissor e de *timeouts* predefinidos para a validação da comunicação. Se o emissor não receber confirmação antes do tempo máximo expectável, retransmite o pacote de informação

¹⁹ É uma subcamada da camada de ligação de dados especificada no modelo OSI que permite implementar mecanismos de controlo e endereçamento capazes de permitir a vários nós de uma rede comunicarem num meio partilhado. Comporta-se como uma subcamada de ligação entre a LLC (*Logical Link Control*) e a camada física de rede.

ocorrência de ruído e, conseqüentemente, maior dificuldade na capacidade de estabelecer comunicação sem a ocorrência de erros. A ocorrência de ruído, para que seja mais facilmente interpretada, diagnosticada e contornada está tipificada da seguinte forma:

- **Ruído de fundo** (ruído estacionário durante longos períodos de tempo);
- **Ruído impulsivo** (principal obstáculo à transmissão de dados pela intensidade relativamente alta que pode ter e à variação com que ocorre – nem sempre permite que os algoritmos de correção de erro sejam eficazes).

3.1.1 Comunicação *Narrowband*

Os sistemas de PLC podem usar como meio de comunicação todas as redes elétricas instaladas. Assim, podem recorrer a:

- Redes de Alta Tensão – Redes que ligam as estações de produção de energia elétrica a áreas de grande consumo (tensão até 380kV);
- Redes de Média Tensão – Redes que abastecem grandes clientes ou áreas geográficas de pequena/média dimensão (tensão até 30kV);
- Redes de Baixa Tensão – Redes que abastecem clientes finais com reduzido consumo energético (tensão de 230 V).

Usando como recurso as redes tipificadas acima, recordemos que a comunicação pode ser feita em banda estreita (*narrowband*) ou banda larga (*broadband*).

Quando se recorre a *narrowband*, tem-se como referência a norma imposta pelo *standard* Europeu (que difere do Americano e do Japonês) CENELEC EN 50065 que disponibiliza um espectro de comunicação que oscila entre os 9 e os 140 kHz (o sistema americano e japonês disponibiliza até 500 kHz). Esta norma divide o espectro em cinco bandas, conforme descrito na tabela 10.

Tabela 9 – Bandas PLC definidas pelo CENELEC

Banda	Espectro de frequência	Aplicação
	3 – 9 kHz	Reservada a companhias de distribuição elétrica
A	9 – 95 kHz	Reservada a companhias de distribuição elétrica ou para uso sob licenciamento
B	95 – 125 kHz	Disponibilizada sem restrições ao consumidor final
C	125 – 140 kHz	Disponibilizada ao consumidor final mas obrigada a protocolo de acesso ao meio de transmissão
D	140 – 148,5 kHz	Disponibilizada sem restrições ao consumidor final

Com esta definição de bandas e de espectro, consegue-se uma largura de banda estreita que não permite mais do que implementar algumas funcionalidades de medição (usadas por exemplo na monitorização remota de contadores de consumo elétrico). Desta forma, a transmissão de dados de forma célere está comprometida. Para que seja possível a transmissão de dados a velocidades superiores a 2 Mbps, são então necessárias frequências mais amplas (30 MHz). É aqui que surge o problema.

Apesar de existirem grupos de trabalho dedicados à definição de normas, não há normas consensuais²⁰. Desta forma, a transmissão de dados em banda estreita com recurso a PLC, encontra-se vocacionada para aplicações de domótica. Caso a distância de comunicação exceda 1 Km, há necessidade de recorrer à instalação de repetidores de sinal. A modelação de sinais na banda estreita é feita com recurso a algoritmos de FSK, mas é expectável que num futuro breve se recorra a BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) (Dostert, 2001).

Os esquemas de modelação usados na banda estreita são também os usados na banda larga. Há contudo diferenças significativas, menos notórias na banda larga, que decorrem da amplitude do espectro usado e que são determinantes: o ruído e a atenuação do sinal (Dostert, 2001).

²⁰ Há atualmente duas entidades que trabalham no sentido de definir uma norma. O *PLCforum*, que incorpora empresas interessadas na tecnologia PLC (tais como companhias elétricas, produtores de equipamento de comunicação, operadores de dados, organismos ligados à investigação, entre outros) e a *HomePlug Powerline Alliance*, sem fins lucrativos e mais vocacionada para as redes internas de PLC.

A descrição detalhada dos vários sistemas PLC de banda estreita pode ser encontrada em (Dostert, 2001).

3.1.2 Comunicação Broadband

Tal como o nome indica a comunicação em banda larga é capaz de rácios de transferência de dados muito mais elevados (superiores a 2 Mbps). Contudo, e porque as redes de energia não são vocacionadas para a transmissão de dados, há fatores limitativos. Entre eles destacam-se a distância de comunicação, a velocidade de comunicação (afetadas pela necessariamente baixa potência com que o sinal é emitido) e a EMC (compatibilidade eletromagnética). Usando redes de média tensão, é possível comunicar ponto-a-ponto com (recurso a *bridging*) até algumas centenas de metros. Recorrendo a redes de baixa tensão, consegue-se implementar comunicação de “*last mile*”.

As redes de baixa tensão, pela topologia complexa que apresentam, podem variar muito de região para região, contudo a topologia física clássica pode comparar-se a uma árvore (uma variante típica da tipologia de estrela). Do ponto de vista lógico, apresenta-se como uma rede em barramento.

No que respeita a equipamentos de redes PLC, topologias de rede de distribuição, questões sobre compatibilidade eletromagnética, nomeadamente demonstrações teóricas do fenómeno, sugere-se a consulta de (Hrasnica, Haidine, & Lehnert, 2004)

3.1.3 Caracterização do canal de transmissão usado por PLC

Num sistema de transmissão terá que se considerar a conversão da informação antes de ser injetada num canal. No que respeita a PLC, tal como noutros canais de comunicação, há uma atenuação de sinal e, tal como dito anteriormente, o canal usado não está otimizado nem foi pensado para a realização de comunicações. Curiosamente, tal como acontece nas redes sem fios, por causa da

descontinuidade de impedância²¹ (neste caso fruto da variedade de equipamentos ligados à linha elétrica) o sinal PLC é refletido várias vezes, comportando-se como uma transmissão *multipath*²² (Philipps, 2000).

Dos vários modelos desenvolvidos para descrever os canais de comunicação na rede elétrica, destacam-se os que consideram o PLC como um meio *multipath* (M. Zimmermann, 2000), (Philipps, 2000) e os que consideram o PLC como uma matriz de transmissões (T.C. Banwell, 2001).

3.1.4 Compatibilidade eletromagnética em sistemas PLC

Do ponto de vista eletromagnético, a injeção de sinais elétricos originados pelo PLC nos cabos de corrente elétrica resulta na radiação de um campo eletromagnético, o que faz com que os cabos se comportem como antenas. Contudo, para respeitar os princípios de compatibilidade eletromagnética, o PLC tem que garantir que ao operar num ambiente partilhado não afeta os sistemas que existam nesse mesmo ambiente.

Por definição, compatibilidade eletromagnética é a capacidade de um dispositivo ou sistema operar num ambiente eletromagnético sem que introduza distúrbios eletromagnéticos intolerantes para si mesmo e para os sistemas existentes nesse mesmo ambiente. Assim, há dois aspetos que interessam distinguir:

- **Funcionamento satisfatório:** significa que o equipamento é tolerante aos sinais eletromagnéticos que têm origem noutros equipamentos (este fenómeno é definido como EMS);
- **Ausência de distúrbios intolerantes:** significa que o equipamento não produz efeitos eletromagnéticos que possam interferir com outros sistemas instalados (fenómeno definido como EME).

²¹ A impedância da rede elétrica sofre variações em função das diferentes características dos cabos elétricos, da tipologia da rede e da natureza dos equipamentos ligados

²² Multipath – nome que designa o fenómeno de a mesma comunicação chegar ao receptor por caminhos diferentes e que resulta de perturbações no canal de comunicação.

Os diversos tipos de compatibilidade eletromagnética são ilustrados pela figura 7.

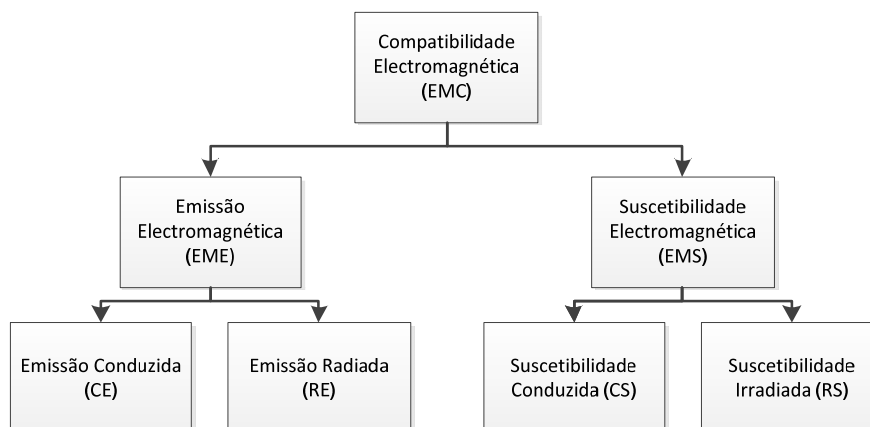


Figura 6 – Tipos de compatibilidade eletromagnética

Fruto da interferência eletromagnética (EMI), a EMC (tipificada na figura 7) é tida como um problema sério no campo das telecomunicações (em particular em emissões de *broadcasting*). Assim, o IEC (*International Electrotechnical Commission*) definiu a EMI como a degradação de desempenho de um sistema ou dispositivo em função da perturbação eletromagnética. A EMC pode assim ser modelada como ilustra a figura 8 em que de descreve:

- Fonte emissora de fenómeno eletromagnético;
- Dispositivo perturbado e incapaz de funcionar capazmente;
- Ligação física (meio capaz de propagar a interferência).

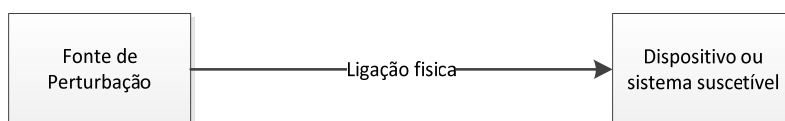


Figura 7 – Modelo representativo de EMC.

Os distúrbios eletromagnéticos podem ser classificados nas seguintes categorias:

- Conduzido (corrente elétrica);

- Indutivo (campos magnéticos);
- Capacitivo (campos elétricos);
- Irradiado (campo eletromagnéticos).

Pelo exposto, considerando as capacidades, mas também as vulnerabilidades de um sistema PLC, é vantajoso que a implementação de uma solução deste género obedeça a alguns cuidados. Um deles, senão o primordial, é a criação de uma matriz EMI²³ do ambiente onde a solução será implementada e que permita aferir da tolerância existente na convivência de sistemas diferentes (Walke, 1999).

3.1.5 Arquitetura de sistemas PLC

A troca de informação entre dois pontos pode ser altamente complexa. Em virtude disso, o processo PLC foi normalizado e dividido em camadas de comunicação individualizadas e hierarquizadas (Walke, 1999). Este modelo traduz de forma esquematizada as tarefas específicas de cada uma das camadas de comunicação e as interfaces entre essas mesmas camadas, sendo ilustrado pela figura 9.

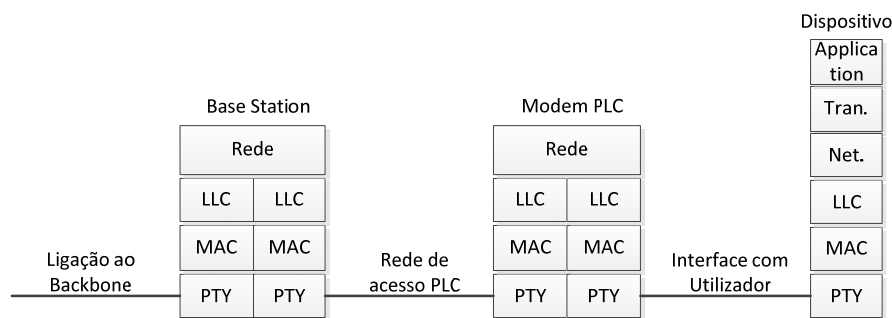


Figura 8 – Camadas de rede PLC

²³ Para facilitar uma análise sistematizada o IEC TC 77 definiu uma norma em que classifica os fenómenos eletromagnéticos e que foram adotados pelo CENELEC TC (IEC, 2001)

3.1.6 Técnicas de Modelação em PLC

A seleção das técnicas de modelação de um sistema de comunicações está naturalmente vinculada às características de operação a que a própria comunicação tem que obedecer.

No caso do PLC, a maior vantagem respeita aos baixos custos de comunicação, uma vez que usa a infraestrutura elétrica como canal. Contudo, o uso deste canal, uma vez que não foi concebido para a transmissão de dados, evidencia problemas significativos tais como ruído e *multipath*. Estes aspetos, fazem com que o canal tenha características não lineares, uma vez que os fatores perturbadores não são constantes. Desta forma, um sistema de modelação capaz de ser usado em PLC deve possibilitar a seleção de frequências, para evitar distúrbios com frequências que já estejam a ser usadas por outras por outros serviços.

Das modelações possíveis (capazes de permitir a transmissão em banda larga), há duas que se destacam: OFDM²⁴ e *spread spectrum*.

A geração de sinais OFDM é realizada com base em dois princípios. Primeiramente, os dados são divididos em pequenos grupos e, em que cada um é modelado numa portadora diferente a que se dá o nome de subportadora. Depois, as subportadoras são inversamente organizados de acordo com a duração da sinalização de cada um, conseguindo assim multiplexar a frequência de cada portadora. (Cimini, 1985).

A codificação da informação, como facilmente se percebe, é essencial para que a transmissão possa ser feita com sucesso. O *interleaving* (ilustrado pela figura 10)²⁵ da informação codificada é usada para evitar a propagação massiva de erros que, quando ocorre, é de difícil correção pelos algoritmos de correção de erros. Quando se recorre a esta técnica, o recetor aplica a técnica que permite “*deinterleaving*”, que consiste separação dos erros recebidos na mensagem em diferentes blocos que permitam a análise dos mesmos.

²⁴ Esta modelação foi selecionada para DSL e para o serviço de DAB na Europa

²⁵ Método que visa a redução de erros num canal através de um procedimento que ordena os símbolos antes da transmissão no meio físico (Hrasnica, Haidine, & Lehnert, 2004)

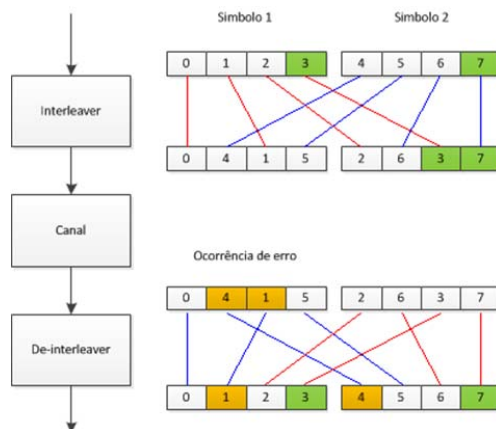


Figura 90 – Esquemática do funcionamento do *Interleaving*.

Em sistemas mais complexos, recorre-se a outra técnica: o *bit-loading*. Com *bit-loading*, a quantidade de informação de cada subportadora depende da qualidade dessa mesma subportadora. Desta forma, ao reduzir o tamanho de cada subportadora, reduz-se também a perturbação inerente à transmissão.

No que respeita à modelação *spread-spectrum* a técnica usada consiste no aproveitamento de toda a frequência disponível para a transmissão de informação (em contraponto ao uso da frequência mínima necessária para a realização da transferência de informação). As primeiras implementações de sistemas que recorriam a *spread-spectrum* apareceram para evitar a sobreposição de frequências entre emissores e recetores que realizam comunicações *wireless* digitais distintas. O princípio de funcionamento assenta em tornar a comunicação impercetível, aproximando o sinal de uma frequência que possa ser percebida como “ruído”. Para tal, recorrem-se a técnicas que fazem variar a duração e a frequência das ondas usadas na comunicação. De entre as vantagens desta técnica destacam-se a segurança (esta modelação é usada em sistemas militares e em ambientes onde as interferências eletromagnéticas possam ocorrer), a resistência a interferências causadas por outros sistemas, a redundância da comunicação, a resistência a *multipath* e a efeitos de atenuação. As técnicas mais comuns de *spread-spectrum* são:

- ***Direct Sequence (DSSS)***

É a forma mais aplicada de *spread-spectrum*. Para separar o espectro do sinal transmitido, o sinal é modelado numa sequência pseudoaleatória em que a fase altera antes de misturar o sinal na portadora do sistema de transmissão (E. Stroem, 2002);

- ***Frequency hopping (FHSS)***

Nesta técnica a frequência do sinal é constante durante um determinado período de tempo. Passado esse período, a frequência é reajustada. São usadas várias frequências, não sobrepostas, a que se dá o nome de “bins”, e que são usadas para emitir cada um dos blocos de dados. (Wong, 2002);

- ***Time hopping (TH)***

Técnica usada para evitar a sobreposição de sinais ou para reduzir a probabilidade de interseção da mensagem transmitida. Para tal, o tempo de transmissão é alterado aleatoriamente, recorrendo a algoritmos pseudoaleatórios (Wong, 2002);

- ***Multi-carrier (MC)***

Consiste na separação da mensagem em frequências distintas e em que a variação de fase alterna entre 0 e 180° (Wong, 2002).

De referir que é possível a mistura destas técnicas em formas híbridas, podendo assim recorrer às melhores características de cada uma, consoante as necessidades. A comparação entre DSSS e FHSS, tal como descrita em (Wong, 2002), é apresentada na tabela 11.

Tabela 10 – Comparação das características de DSSS e FHSS

	DSSS	FHSS
Densidade espectral e geração de interferências	+ Reduzida com ganho de processamento + Propagação contínua da potência do sinal transmitido origina interferências mínimas	+ Reduzido com ganho de processamento - Apenas a potência média do sinal transmitido é difundida e isso não reduz tanto a interferência
Transmissão	+ Banda larga contínua	- Banda estreita descontínua
Susceptibilidade de interferência	+ Interferência com banda estreita é reduzida com recurso a processamento de ganho	- Interferência em banda estreita não é reduzida + Devido a <i>hopping</i> (saltos) é possível transmitir em canais que estejam a ser usados
Velocidade de transferência de dados elevada	+ A velocidade de transmissão pode ser aumentada com recurso a variação de relógio ou a variação da complexidade da modelação	- Necessária mais largura de banda (evitar <i>hopping</i>)
Tempo real (voz)	+ Sem constrangimentos de tempo - Se uma estação estiver saturada, continua assim até que deixe de estar saturada	- Se o canal estiver ocupado, a transmissão a realizar tem que terminar pela conclusão da transmissão em curso
Sincronização	+ Auto sincronização	- Procura realizada em inúmeros canais
Implementação	- Processamento de banda complexo	+ Recetor analógico simples

3.1.7 Camada MAC em PLC

A camada MAC, cujo ambiente é descrito pela figura 12, é transversal à arquitetura de todos os sistemas de telecomunicações e é desenvolvida de acordo com a necessidade de responder especificamente a funcionalidades das redes de comunicação. Tem como finalidade fazer a gestão de acessos dos vários equipamentos da rede ao meio de transmissão que partilham. As suas funções podem ser divididas em grupos:

- **Acesso múltiplo**

Estabelece o método de divisão dos recursos para transmissão em secções que podem ser usadas pelos pontos de rede para comunicarem entre si.

- **Estratégia de partilha de recursos**

Através do protocolo MAC, regula o acesso simultâneo dos vários equipamentos montados na rede aos recursos disponibilizados.

- **Funções de gestão de tráfego**

Implementa funcionalidades adicionais (tanto ao nível da camada MAC como de protocolo) que permitem a comunicação em modo *duplex*, calendarização de tráfego e o controlo de conectividade que asseguram a Qualidade de Serviço (QoS) e a eficiência da rede.

As redes PLC, tal como ilustrado pela figura 13, são caracterizadas pela sua especificidade ao nível de tipologia (que é influenciada pela tipologia de redes elétricas de usadas como meio de transmissão), pela sujeição a níveis de ruído e pelos constrangimentos às taxas de transferência de informação (fruto das condicionantes de compatibilidade eletromagnética). Assim, a camada MAC tem que ser ajustada quando se pretende implementar redes PLC, de forma a que cumpra os seguintes requisitos:

- Acesso múltiplo, para que possam ser realizadas várias serviços de comunicação, assegurando a robustez da rede em relação a distúrbios na transferência de informação;
- Assegurar a utilização otimizada do débito limitado que caracteriza as redes PLC e garantir a QoS dos diversos serviços de telecomunicação que partilham o canal (sendo capaz, para tal, de lidar convenientemente com a presença de ruído no canal).

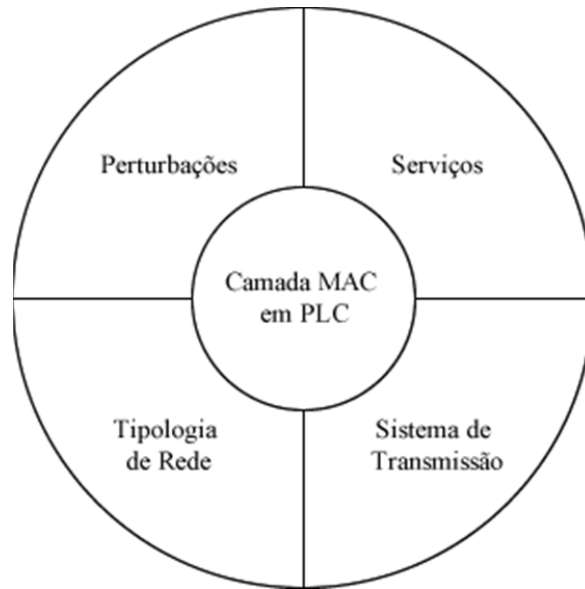


Figura 10 - Ambiente da camada MAC em PLC

Conforme ilustrado pela figura 3 o acesso múltiplo e a estratégia de partilha de recursos (Protocolo MAC) é o núcleo da camada MAC. Na camada de múltiplo acesso, é definido o método de divisão dos recursos de transmissão e está dependente do sistema de transmissão em uso e das funcionalidades da camada física. No âmbito do presente documento, a transmissão pode ser feita com recurso a OFDM ou *spread-spectrum*, tal como referido anteriormente.

Desta forma, a tarefa do protocolo MAC é a gestão de acesso concorrencial dos diversos equipamentos ao meio partilhado. Em conjunto com a camada de múltiplo acesso, implementam mecanismos de tolerância às perturbações que possam existir no canal.

No que respeita à QoS, a camada de controlo de tráfego é preponderante uma vez que implementa mecanismos adicionais (comunicação *duplex*, calendarização e controlo de trafego).

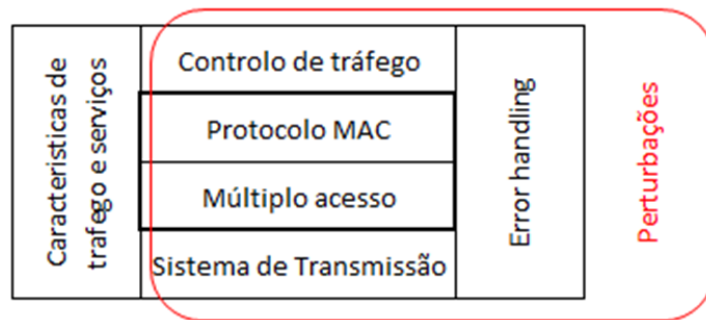


Figura 11 – Estrutura da camada MAC

3.1.8 Gestão de acesso ao meio de transmissão

A gestão de múltiplo acesso estabelece um método de divisão dos recursos de transmissão em secções que serão usadas pelos vários subscritores dos diversos serviços de telecomunicações. O esquema de acesso múltiplo aplica-se ao meio de transmissão, definindo uma determinada frequência do espectro livre, para a transferência de informação. No caso de existirem diversos clientes a concorrer pelo acesso ao canal, é aplicada uma equação matemática que garante a ortogonalidade dos sinais enviados, tal como já referido no presente documento e detalhadamente documentado em (K. David, 1996). Embora não sendo possível aplicar uma ortogonalidade perfeita, em resultado da aplicação de OFDM consegue-se uma influência reduzida, através do recurso aos seguintes esquemas de gestão de acesso múltiplo²⁶:

- **TDMA (*Time Division Multiple Access*)**

Tal como já foi referido, quando se recorre a OFDM a informação a transmitir é dividida em símbolos com uma duração temporal. Neste enquadramento, a transmissão OFTDM/TDMA afigura-se como a solução apropriada para a transmissão (Wong, 2002), (Lindner, 1999). Esta conjectura pode ser assim percebida uma vez que com recurso a TDMA os equipamentos

²⁶ Notar que estas técnicas podem ser usadas de forma isolada ou combinada, para retirar benefícios das características de cada uma. As combinações de CDMA/TDMA (I. Chlamtac, 1997) e CDMA/FDMA (M. Schnell, 1999) são as mais comuns.

podem usar a mesma frequência uma vez que, para efeitos de comunicação, recorrem a uma janela temporal (*time slot*) que lhes permite enviar a informação necessária;

- **FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)**

Com recurso à divisão de frequência, atribui-se a cada equipamento com capacidade comunicativa uma frequência distinta das restantes. Desta forma, disponibiliza-se a cada cliente um canal de transmissão dentro do espectro disponível. Desta forma, o débito, é função da largura de banda da frequência atribuída a cada canal. Uma das vantagens desta técnica prende-se com o facto de ser possível variar a frequência de um canal para evitar perturbações no sinal.²⁷ Desta forma, a grande vantagem do esquema FDMA em relação ao TDMA é a robustez que apresenta em relação a impulsos de frequência e a perturbações (M. Moeneclaey, 2001). Notar que FDMA pode ser implementado em vários sistemas de transmissão tidos como capazes de efetivar comunicação PLC (OFDM e *Spread-Spectrum*);²⁸

- **CDMA (*Code Division Multiple Access*)**

Neste esquema é aplicado um método que divide os recursos da rede em secções. Os dados de equipamentos diferentes são distinguidos por uma sequência específica de códigos, podendo assim ser transmitidos sem interferências entre eles. Este esquema tem como base o princípio de *spread-spectrum* pelo que também é conhecido por SSMA. As variantes mais comuns (havendo outras) são:

- DS-CDMA

Tem por base o método DSSS (*Direct Sequence Spread-Spectrum*) em que os dados de cada cliente são multiplicados por uma sequência binária específica. Nesta abordagem, todos os equipamentos recebem sinais que não lhe são destinados, contudo, ao aplicar o fator multiplicador, filtram a comunicação que lhes é destinada;

- FH-CDMA

²⁷ Este princípio é também válido como forma de evitar o uso de frequências reservadas e para evitar a ocorrência de perturbações eletromagnéticas.

²⁸ A aplicação de FDMA em sistemas de base OFDM dá origem ao acrónimo OFDMA (*OFDM Access*) (R. van Nee, 2000), (Lindner, 1999) , também designado por *Clustered OFDM* (Ye Li, 2001).

Baseado no método FHSS (*Frequency Hopping Spread-Spectrum*) que consiste na separação da transmissão em bandas de frequência diferentes usadas sequencialmente;

- TH-CDMA

Nesta variante (*Time Hopping Code Multiple Access*) os sinais de dados são transmitidos em intervalos de tempo curtos sendo os intervalos definidos por um sequência específica de códigos. É usada toda a largura espectral (tal como em DS-CDMA) residindo a diferença na sequência codificada que determina os *time slots*.

Tal como descrito, com recurso a DS-CDMA é ocupada toda a banda de frequências. Recorrendo a FH-CDMA é apenas usada parte da frequência disponível, sendo esta frequência alterada com o decorrer do tempo. Esta alteração de frequência é feita com base num código de sinalização. Notar ainda que as variantes de CDMA podem ser combinadas de forma a criar soluções híbridas. Esquemas híbridos, tais como DS/FH, DS/TH, FH/TH e ainda DS/FH/TH, podem ser criados para tirar partido das características de cada uma.

Para além do recurso aos esquemas apresentados de forma isolada, há possibilidade de os combinar. Desta forma, pode-se usar, por exemplo, como solução alternativa o esquema de acesso múltiplo que se designa de OFDMA/TDMA (ilustrado pela figura 14). Nesta realidade, o canal de transmissão é dividido em várias frequências que por sua vez são divididas em parcelas de tempo de duração fixa ou variável. Também neste caso, o protocolo MAC é responsável pelo controlo de acesso quer aos canais, quer aos *time slots*. Assim, cada canal de transmissão é constituído por um determinado número de subportadoras²⁹ que são agrupados segundo os princípios a que obedece o esquema OFDMA.

²⁹ Um canal de transmissão pode ter um número fixo ou variável de subcarriers. Tendo um número fixo de subcarriers com data rates variáveis (bit loading), haverá lugar a diferente data rates nos canais de transmissão.

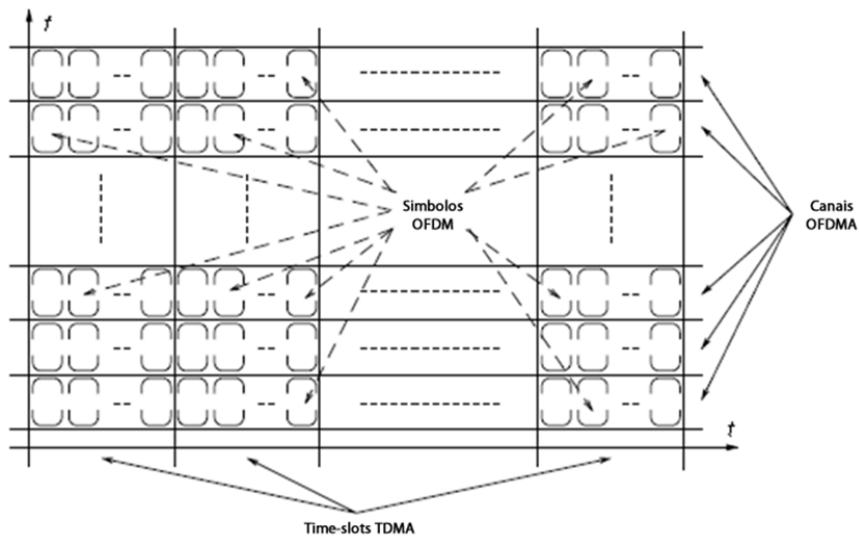


Figura 12 – Esquema OFDMA/TDMA (R. van Nee, 2000)

Graficamente, a diferença entre os esquemas de gestão de acessos múltiplos pode ser expressado como ilustra a figura 15.

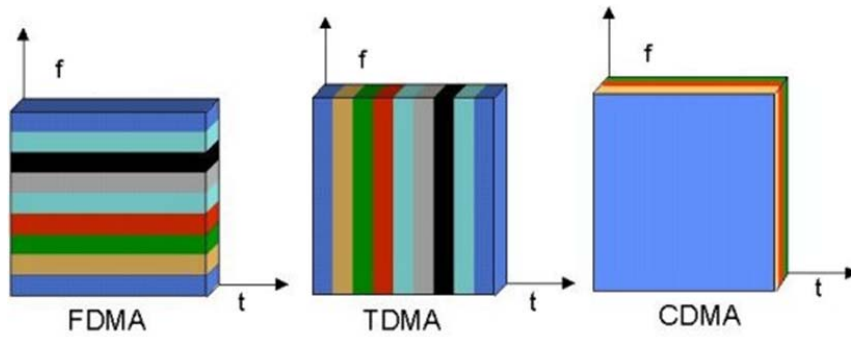


Figura 13 – Perspetiva gráfica comparativa de FDMA, TDMA e CDMA

3.1.9 Ortogonalidade

Como mencionado no ponto anterior, a ortogonalidade em TDMA é conseguida com base num registo temporal. Em FDMA, consegue-se com base na variação de frequência. No que respeita a CDMA, os canais de transmissão são definidos por sequências de códigos e a ortogonalidade entre canais é conseguida pela ortogonalidade dos códigos usados. A seleção destes códigos deve ser regida pelos seguintes fatores (Prasad, 1998):

- Efeito de propagação *multipath* expectável nos vários canais de comunicação;
- Assegurar a capacidade de acesso múltiplo (as sequências de códigos geradas têm que ser distintas e distinguíveis entre si).³⁰

Estratégias de partilha de recursos

Como já foi referido, a partilha de recursos da rede e a gestão de acesso múltiplo é competência do protocolo MAC. Dentro da complexidade desta gestão, interessa distinguir os sentidos em que a comunicação é feita: *downlink* e *uplink*

Assim, há que considerar que a comunicação possa ser bidireccional pelo que o acesso ao meio prevê que os recursos de comunicação tanto devem estar disponíveis para emissor como para recetor. Os princípios aplicados são exactamente os mesmos estando, naturalmente, assegurado que tanto emissor e recetor devem “escutar” e executar a comunicação que lhes é dirigida. No sentido inverso, ambos os interlocutores, devem também ser capazes de enviar informação.

³⁰ A caracterização e geração de códigos está descrita em (Hrasnica, Haidine, & Lehnert, 2004).

3.2 ZigBee

3.2.1 Sensores ZigBee e controlo de rede

O ZigBee é um novo *standard* desenvolvido pela ZigBee Alliance³¹ com a finalidade de implementar *Personal-Area Networks* (PANs). O protocolo ZigBee está construído e alicerçado na especificação IEEE 802.15.4, que define o MAC e as camadas físicas para esta tipificação de redes. De entre as redes implementadas com recurso a ZigBee, destacam-se as que se destinam a:

- **Gestão de Energia:** Permite implementar mecanismos de leitura de contadores de água, luz e gás (entre outros) permitindo com recurso aos dados recolhidos implementar mecanismos de controlo de eficiência e de resposta oportuna a picos de consumo;
- **Automação de edifícios:** Auxilia na monitorização e deteção de gases, permite saber se as portas estão abertas ou fechadas, facilita a recolha de informação relacionada com o bom estado dos equipamentos sujeitos a sensorização e permite ainda intervir sobre a iluminação e a climatização;
- **Automação doméstica:** À semelhança do que pode ser feito na automação de edifícios, permite a monitorização remota de sistemas de iluminação, aquecimento, sistemas de segurança passiva (como sensores de fogo, fumo, inundação ou abertura/fecho de portas);
- **Monitorização clínica:** Permite a monitorização de dados clínicos de pacientes (como batimento cardíaco) sem limitar a mobilidade do paciente;
- **Telecomunicações:** É possível integrar o protocolo em dispositivos móveis, de forma a permitir a troca de informação entre aparelhos (à semelhança do que acontece com *Bluetooth*);
- **Controlo remoto de equipamentos eletrónicos (ZigBee RF4CE):** À semelhança da tecnologia de infravermelhos usada nos controlo remotos comuns, pode recorrer-se a ZigBee para o controlo de equipamentos eletrónicos;

³¹ ZigBee Alliance é um consórcio que promove *standards* para ZigBee no que respeita a taxas de transferência baixas e baixo consumo energético de sensores e para mecanismos de controlo da rede.

- **Monitorização de processos industriais:** Permite, uma vez que não requer cablagens, a fácil recolocação de sensores que estejam destinados, por exemplo, a controlo de inventário, monitorização de movimentos de peças e equipamentos³². Permite ainda, pelos mesmos motivos, o controlo facilitado de temperatura, pressão, níveis de reservatórios, humidade e vibração.

3.2.2 Características da rede ZigBee

Apesar dos vários *standards* existentes (tabela 12) para a implementação de redes sem fios, o protocolo ZigBee pela sua especificidade, pode ser entendido como a melhor solução para determinados ambientes em que é necessário colmatar necessidades específicas. As suas características tornam-no na melhor opção sempre que os seguintes requisitos tenham que ser observados:

- Baixo consumo de energia (um dispositivo ZigBee pode trabalhar durante anos sem que seja necessário substituir baterias);
- Baixo custo;
- Baixos índices de transferência de informação (O data rate máximo é de 250 Kbps);
- Facilidade de implementação;
- Capacidade de interligar até 65000 nós na mesma rede;
- Capacidade de estabelecimento automático da própria rede;
- Recursos a pacotes de informação pequenos (quando comparado com WiFi ou *Bluetooth*).

³² Este processo é designado por RFID (*Radio Frequency Identification*).

Tabela 11 – Comparação de características entre WiFi, Bluetooth e ZigBee.

	Wi-Fi 802.11	Bluetooth IEEE 802.15.1	ZigBee IEEE 802.15.4
Aplicação	Redes sem fios	Substituição de cabos para comunicação pontual	Controlo e monitorização
Banda de Frequência	2.4 GHz	2.4 GHz	2,4 GHz 868 MHz 915 MHz
Baterias (vida útil)	Até 5 dias	Até 7 dias	Até 7000 dias
Nós por rede	30	7	65000
Largura de Banda	2 – 100 Mbps	1 Mbps	20 – 250 Kbps
Alcance (metros)	Até 100	Até 10	Até 75
Topologia	Árvore	Árvore	Árvore, Estrela, Mesh

Tipificação de dispositivos ZigBee

Uma rede ZigBee é composta por diversos dispositivos a que genericamente se dá o nome de nós. A arquitetura destes nós é ilustrada na figura 16.

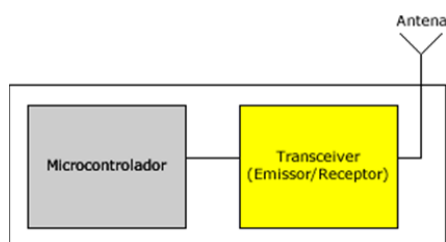


Figura 14 – Arquitetura de um nó ZigBee³³

³³ Um nó pode operar como FFD (*Full Function Devive*) ou como RFD (*Reduced Function Device*)

De acordo com a forma como um nó pode operar, destaca-se o desempenho das seguintes funções:

- **Coordenador:** É um FFD³⁴ responsável pela gestão de toda a rede. Em cada rede existe apenas um coordenador que, de forma mais detalhada, é responsável pela seleção do canal em uso na rede, atribui os endereços aos elementos constituintes da rede, controla os equipamentos que podem ser adicionados e retirados da rede, armazenagem de informação sobre as redes vizinhas e a quem compete a transferência de pacotes de aplicação;
- **End Device:** Este dispositivo pode ser um RFD³⁵ (operando assim com limitações no que concerne a camada MAC do protocolo IEEE 802.15.4 – e consumindo menos energia) que se encontra “ligado” a um *router* ou a um coordenador e que desempenha funções relacionadas com a transferência de pacotes de aplicação. Um *End Device* pode naturalmente sair da rede em que se encontra inserido;
- **Router:** Um *router* é um FFD que tem a finalidade de, numa rede em árvore ou *mesh*, expandir a cobertura da rede e encaminhar a mensagem a transmitir pelo melhor caminho até que alcance o destino. Na essência tem o mesmo papel que um coordenador. Contudo, não pode influir sobre as definições que estabelecem a rede;
- **ZigBee Trust Center (ZTC):** É um dispositivo capaz de zelar pela gestão da segurança na rede. Para isso, procede à gestão das chaves de segurança e à autenticação dos dispositivos;
- **ZigBee Gateway:** Uma *gateway ZigBee* tem a finalidade e a capacidade de conectar uma rede ZigBee a outra rede, através da conversão dos protocolos usados em cada uma das redes a interligar.

³⁴ FFD (*Full Function Devive*) – Dispositivo capaz de fazer roteamento de pacotes ZigBee

³⁵ RFD (*Reduced Function Device*) – Dispositivo incapaz de rotear pacotes e que tem que estar sempre associado a um único FFD

3.2.3 Topologias das redes ZigBee

Uma rede ZigBee recorre à especificação IEEE 802.15.4 para definir tanto a camada física como a camada MAC. Apesar deste *standard* definir as topologias estrela, árvore, árvore em cluster e mesh como possíveis, o Zigbee não suporta a árvore em *cluster*.

As topologias implementadas (figura 17) obedecem aos seguintes pressupostos :

- **Topologia em Estrela:** Consiste num Coordenador e em diversos *End Devices*. Nesta topologia cada nó comunica apenas com o Coordenador. Havendo necessidade de comunicação entre os nós, há necessariamente passagem pelo Coordenador. A grande vantagem desta topologia reside na simplicidade de implementação, sendo a sua maior desvantagem o facto de o Coordenador poder ficar assoberbado pela quantidade de comunicações que tem que fazer;
- **Topologia em Árvore:** Nesta topologia, há um Coordenador, *Routers* e *End Devices*. O *router* implementa uma maior abrangência da cobertura de rede e tem associados a si *End Devices* que são seus “filhos”. Cada “filho” existente na rede pode apenas comunicar com o próprio “pai”. A maior vantagem desta topologia é a capacidade de cobertura que a rede pode alcançar. A maior limitação prende-se com o facto de os “filhos” ficarem incomunicáveis caso o “pai” fique indisponível;
- **Topologia de Árvore em Cluster:** Apesar de não ser possível implementá-la em ZigBee, é um caso específico da topologia em Árvore em que um grupo constituído por “pai” e “filhos” são chamados de *Cluster* e identificados por um Cluster ID;
- **Topologia Mesh:** Esta topologia também é conhecida como *peer-to-peer*. Incorpora um Coordenador, *Routers* e diversos *End Devices*. É caracterizada pela fácil capacidade de expansão da rede (fruto da adição de mais nós à rede existente), a possibilidade de todos os nós comunicarem entre si e com isso eliminar zonas “mortas”, capacidade autorregenerativa que lhe permite encontrar um caminho alternativo para a comunicação em caso de falha do inicial e

adição de nós facilitada. No que respeita a desvantagens, há a considerar a maior complexidade do protocolo de *routing*³⁶.

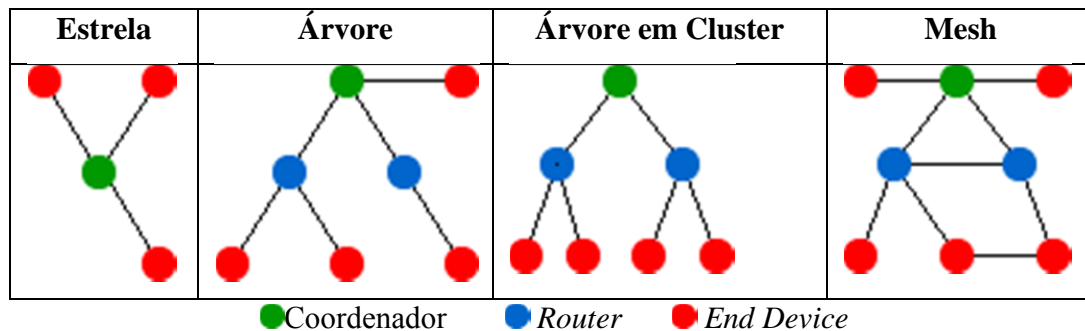


Figura 15 - Topologias ZigBee

3.2.4 Arquitetura do Protocolo ZigBee

O protocolo ZigBee utiliza a camada MAC e a camada Física do *standard* 802.15.4. Para além deste tronco comum, a ZigBee Alliance desenvolveu o ZigBee *Device Object* (ZDO), uma subcamada de suporte aplicacional, a camada de rede e a gestão de segurança.

A arquitetura do protocolo Zig Bee é assim dividida em três secções, conforme descrito pela figura 18:

- IEEE 802.15.4 que consiste na camada MAC e Física;
- Camadas ZigBee que compreendem a camada de rede, a ZDO, a subcamada aplicacional e a gestão de segurança;

³⁶ O endereçamento de um nó na rede é feito com recurso a endereços de 16 bits (atribuição feita pelo Coordenador sempre que um nó é adicionado à rede). Contudo, cada dispositivo tem um endereço IEEE único de 64 bits. Os endereços de 16 bits ao serem mais curtos implicam um menor consumo energético, pois as *frames* para comunicação são mais pequenos. Desta forma, corre-se o risco de haver dispositivos diferentes em redes vizinhas com o mesmo endereço.

- Produção de aplicações, que permite aos fabricantes de dispositivos ZigBee desenvolver as suas próprias aplicações.

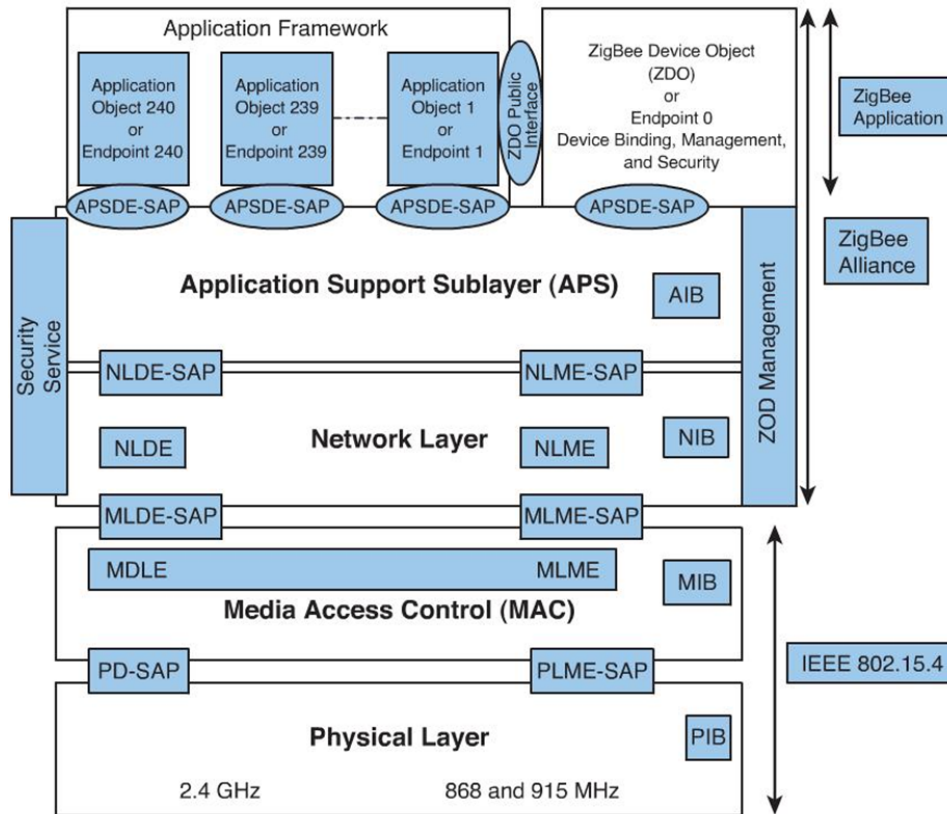


Figura 16 – Arquitetura do Protocolo ZigBee (Organization, 2008)

A tabela 13 apresenta as larguras de banda destinadas a comunicações com recurso a ZigBee, as velocidades de transferência de dados e os canais usados para o efeito.

Tabela 12 – Bandas de Frequências operadas na camada física

Banda de Frequências	Países	Débito	Nº dos Canais
868.3 MHz	Europa	20 Kbps	0
902 – 928 MHz	EUA	40 Kbps	1 – 10
2.405 MHz	Mundo Inteiro	250 Kbps	11 – 26

O protocolo ZigBee tem as camadas seguintes:

- **Camada Física:** É responsável pela modelação dos sinais enviados e pela desmodulação dos sinais recebidos;
- **Media Access Control (MAC):** tem como função a gestão do acesso à rede através de CSMA/CA e a transmissão das *frames* responsáveis pela sincronização, de forma a garantir comunicações fiáveis;
- **Camada de Rede:** Encontra-se entre a MAC e a Subcamada de Suporte Aplicacional e tem responsabilidade sobre a gestão de nós que são adicionados e retirados da rede, roteamento da comunicação e inicialização da rede;
- **Subcamada de Suporte Aplicacional (APS):** Disponibiliza os serviços necessários para que os nós e os ZDO interajam com a camada de rede. Alguns dos serviços disponibilizados para a transferência de dados são “*request*”, “*confirm*” e “*response*”:
 - **Application Object (endpoint):** Um objeto aplicacional define os inputs e os outputs da APS. A título ilustrativo, podemos considerar que num sistema de iluminação o interruptor é o “*input*” e o estado da lâmpada é o “*output*”.
 - **ZDO:** Responsável pela gestão de “*endpoints*”. Das funcionalidades que lhe são inerentes destacam-se a catalogação (Coordenador, *Router* ou *End Device*) do tipo de dispositivo numa rede, a inicialização da APS e da camada de rede, inicialização do coordenador para estabelecer a rede, a gestão de segurança e da própria rede.
 - **End Node:** Cada *End Device* pode ter vários *endpoits*. Cada um dos *endpoits* tem um perfil aplicacional e pode ser usado para controlar vários dispositivos. Cada *endpoint* define as funções de comunicação com um determinado dispositivo (um comando remoto, por exemplo);
 - **ZigBee Addressing Mode:** O endereçamento em ZigBee pode ser feito de forma direta, em grupo ou com recurso a *broadcast*. Quando há endereçamento direto, dois dispositivos comunicam apenas entre si. Quando há endereçamento de grupo, parte-se do pressuposto que a aplicação tem definidos grupos de dispositivos, a reação a um comando faz-se notar em vários dispositivos. No caso de endereçamento com recurso a *broadcast*, é enviada informação a todos os nós para que assumam o mesmo comportamento.

3.2.5 ZigBee Vs ZigBee PRO

A especificação de ZigBee, tal como descrito na tabela 14, define duas especificações particulares: A ZigBee e a ZigBee PRO. A ZigBee PRO distingue-se da especificação inicial pelos melhoramentos que contempla. Entre eles destaca-se a segurança, a topologia *mesh* e a capacidade de autorregeneração da rede. Estes aspetos fazem com que seja particularmente indicada para ambientes críticos. Para além destas características a especificação ZigBee PRO destaca-se pelas seguintes características:

- **Endereçamento:** Qualquer dispositivo que se junte à rede assume um endereço que lhe é atribuído com recurso a um método estocástico³⁷. No que respeita à resolução de conflitos de endereçamento, estes são geridos na camada MAC;
- **Gestão de conectividade:** Fruto da topologia *mesh* que implementa, cada nó é capaz de avaliar a qualidade de comunicação dos nós vizinhos e selecionar o melhor para enviar os pacotes de comunicação;
- **Agilidade da Frequência:** Mesmo depois de selecionar a melhor frequência no arranque da rede os nós têm a capacidade de reportar a anomalias na frequência ao dispositivo que gere a rede. Quando há vários nós a reportar problemas com a frequência corrente, o equipamento gestor da rede informa os nós da alteração do canal e procede à alteração do canal em uso;
- **Endereçamento por Grupos:** Capacidade de um pacote ser endereçado para mais do que um dispositivo;
- **Commissioning:** Ferramentas usadas para instalar dispositivos ZigBee;
- **Compatibilidade:** Permite a adição de qualquer dispositivo à rede desde que não comprometa a definições de segurança em uso;
- **Ligação Assimétrica:** Por norma a qualidade de ligação não é a mesma, no que respeita a receção e envio de comunicação. Isto pode acontecer porque os equipamentos não têm todos a mesma sensibilidade e potência de sinal;

³⁷ Cada dispositivo recebe um endereço aleatório. Ao recorrer a endereçamento estocástico, elimina-se a necessidade do nó “pai” ter uma tabela com os endereços que possa vir a atribuir a “filhos”.

- **Fragmentação:** Permite a fragmentação dos pacotes de maior dimensão em pacotes mais pequenos, com o intuito de agilizar a comunicação na rede. O recetor tem a capacidade de voltar a juntar os pacotes que tinham sido previamente fragmentados;
- **Consumo energético:** Na especificação ZigBee PRO apenas os *end devices* são alimentados por baterias. Os restantes equipamentos são alimentados pela tensão elétrica. No sentido de poupar energia, os *end devices*, são capazes de hibernar. Quando estão neste estado não recebem comunicação mas, assim que “acordam” contactam o gestor da rede para receberem os *updates* que possam ser necessários;
- **Routing:** Permite dois tipos de roteamento: *multicast* e muitos-para-um. Este último é usado em redes que tenham concentradores;
- **Segurança:** Permite o recurso a:
 - Segurança *standard*: É permitido aos dispositivos o uso da chave de rede (*network key*) e da chave de conectividade (*link key*). Nesta realidade, a chave de rede é uma chave *standard* e todos os dispositivos partilham a mesma chave. Os dispositivos não necessitam de autenticação para se juntarem à rede, uma vez que o *trust center*³⁸, a chave mestra e o SKKE são opcionais. Com segurança *standard* o *trust center* limita-se a transportar a chave de rede.
 - Alta Segurança: Permite o uso de três chaves: a chave de rede, de *link* e as chaves mestras. Tanto o *trust center* como o SKKE³⁹ são obrigatórios. O *trust center* através da chave de transporte envia a chave de ligação e de rede aos dispositivos. Os dispositivos da rede são forçados a autenticarem-se.
- **Trust Center:** É obrigatório. Pode ser um *router*, um coordenador, um concentrador ou, em alternativa, um equipamento específico.

³⁸ Responsável por alojar as chaves de rede e por autorizar a adição de dispositivos à rede por intermédio do uso da chave de segurança

³⁹ (*Symmetric-Key Key Exchange*) Método para definição da chave de segurança

Tabela 13 – Comparação as funcionalidades das várias especificações ZigBee.

Funcionalidades	ZigBee 2006	ZigBee	ZigBee PRO
Coordenador da rede seleciona o melhor canal na inicialização da rede	Sim	Sim	Sim
Detecta interferencias durante a transmissão e altera canal	Não	Sim	Sim
Faz distribuição de endereços na rede	Sim	Sim	Não
Faz distribuição de endereços na rede de forma estocástica	Não	Não	Sim
Suporta endereçamento para grupos	Sim	Sim	Sim
Roteamento Muitos-Para-Um	Não	Não	Sim
Encriptação AES-128 com <i>Message Integrity Code</i> (MIC)	Sim	Sim	Sim
<i>Trust Center</i> pode ser desempenhado por qualquer equipamento na rede	Coordenador	Coordenador	Sim
Escalabilidade da rede limitada pela forma como endereços são assignados	Sim	Sim	Não
Possibilidade de fragmentação das mensagens	Não	Sim	Sim
Permite <i>buffering</i> que suporte fragmentação de mensagens	Não	Sim	Sim
Ferramenta de <i>Commissioning</i>	Sim	Sim	Sim
Dispositivos guardam informação sobre dispositivos vizinhos	Não	Não	Sim
Permite segurança elevada	Não	Não	Sim
Topologia de rede	Árvore e <i>Mesh</i>	Árvore e <i>Mesh</i>	<i>Mesh</i>

3.2.6 Application Layer

A Camada Aplicacional (figura 19) é constituída por *EndPoints* (*Application Objects*) que armazenam as aplicações e os ZDO. Um nó pode ter, no máximo, 240 *EndPoints*⁴⁰.

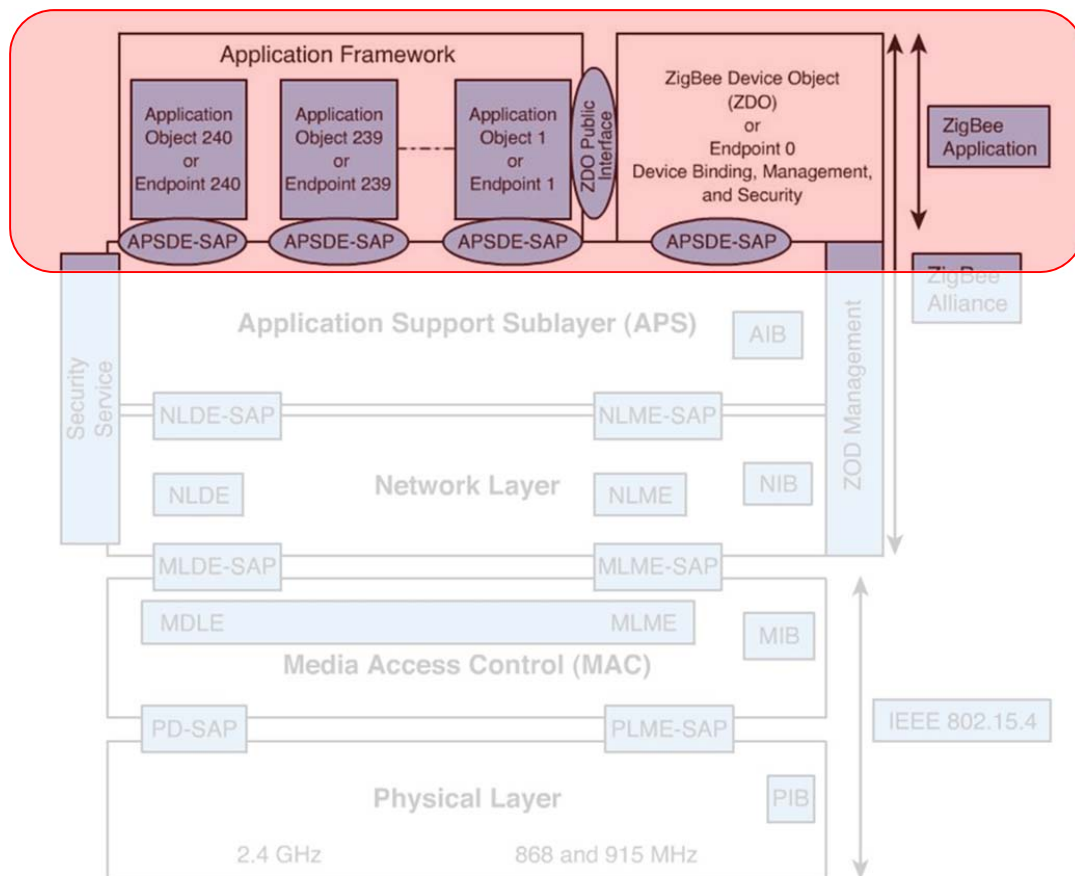


Figura 17 – Pormenor da Camada Aplicacional da Arquitetura do Protocolo ZigBee (Organization, 2008)

⁴⁰ Os 240 endereços iniciais são usados pelos *EndPoints*. Os endereços entre 241 e 254 são reservados para uso futuro. O endereço 255 é usado para a realização de *broadcasting*. O endereço “0” é assignado ao ZDO.

EndPoint

O *EndPoint* guarda o perfil aplicativo (programa) desenvolvido de acordo com o comportamento esperado para o dispositivo. A informação é enviada e recebida através de primitivas APSDE-SAP⁴¹ (Organization, 2008).

ZDO

O ZDO é um *EndPoint* Aplicacional localizado na camada aplicativo com o endereço “0”. Como é mostrado na figura 19, interage com as primitivas APSDE-SAP para transferir dados e também com as primitivas APSME-SAP (Organization, 2008) em virtude das mensagens de controle. Ao ZDO competem as seguintes tarefas de gestão:

- Determinação do tipo de dispositivo na rede;
- Inicialização da APS e da camada de rede;
- “Descoberta” de dispositivos;
- Inicialização do Coordenador para que se possa estabelecer a rede;
- Gestão de segurança;
- Gestão da rede;
- Gestão das ligações (*binding*)⁴².

ZDP

O ZDP é um conjunto de descritores de dispositivos localizado na camada aplicativo (Ata Elahi, 2009). Estes descritores (descoberta de dispositivos, de serviços, *binding* e *unbinding*, e gestão de rede) podem ser acessados por outros dispositivos que façam parte da rede. De entre estes descritores destacam-se os seguintes:

⁴¹ *Application Support sub-layer Data Entity. Service Access Point*

⁴² *Binding* é o processo usado para estabelecer ligação lógica entre dois *Endpoints* localizados em dispositivos diferentes.

- **Device and Service Discovery:** O ZDO disponibiliza comandos aos dispositivos da rede para que estes possam aferir as capacidades dos restantes nós constituintes da rede. Para isso, um dispositivo pode enviar um comando em modo de *broadcast*, ou dirigido a um dispositivo específico. De entre as interrogações possíveis, destacam-se a capacidade de aferir o tipo de dispositivo e o tipo de objeto aplicacional;
- **Descritor de Nó:** Contém a seguinte informação sobre o nó: tipificação lógica, descritor complexo, banda de frequências, “capacidade” MAC, código do fabricante, tamanho máximo do *buffer*, tamanho máximo para receção de informação e “máscara” do servidor;
- **Descritor de Potência do Nó:** Indica a forma como o nó é alimentado. Tem como descritores o modo de alimentação, as fontes de alimentação disponíveis e o nível de carga da fonte de alimentação;
- **Descritor simples:** Define o perfil e os *clusters* de *input/output* suportados pelo *EndPoint* ativo no nó;
- **Descritor complexo:** fornece informação detalhada sobre o dispositivo. Destaca-se o nome do fabricante, o modelo e o número de serie, o URL do fabricante e o tipo de caracteres usados (ASCII ou Unicode).

Descoberta de Equipamentos na Rede

A descoberta de equipamentos na rede é conseguida através de interrogações feitas à rede. Quando interrogados, os dispositivos, respondem com o seu endereço (notar que esta interrogação pode ser individualizada ou feita com recurso a *broadcast*). Se o equipamento interrogado for um coordenador ou um *router*, a resposta dada inclui a lista de endereços dos equipamentos que lhe estão associados.

Binding

Ao processo usado para estabelecer a ligação lógica entre dois *Endpoints* localizados em dispositivos diferentes, dá-se o nome de *Binding*. É um processo unidirecional em que é necessária a seguinte informação:

- Endereços de origem e de destino dos nós;
- Endereços de origem e de destino dos *EndPoints*;
- ID do Cluster e ID do perfil das aplicações.

Os tipos de *Binding* suportados por ZigBee são:

- Um para um (um interruptor a controlar uma única lâmpada);
- Um para muitos (um interruptor a controlar várias lâmpadas);
- Muitos para um (vários interruptores a controlar uma lâmpada).

3.2.7 Segurança em ZigBee

A segurança de uma rede, seja ela qual for, é de extrema importância. Nesse sentido, para que a informação transmitida não possa ser acessada por ninguém que não seja emissor ou destinatário, são implementados diversos mecanismos que visam a proteção e integridade da informação. Nesse sentido, são assegurados os seguintes elementos:

- **Confidencialidade:** garante que mesmo em caso de intercepção da comunicação a informação não tem significado. Implementa mecanismos capazes de assegurar a privacidade da informação e protege-a em caso de intercepção;
- **Autenticação:** Verifica a identidade do equipamento que tenta acessar à rede;
- **Integridade:** Assegura a consistência da informação;
- **Não repúdio:** Garante ao remetente a fidelidade da origem da comunicação.

Criptografia

A Criptografia estuda os princípios e as técnicas pelas quais a informação pode ser manipulada de forma a que apenas possa ser reconhecida por quem tiver uma chave que a decifre. Ao processo de codificação e decodificação da informação dá-se o nome de encriptação e desencriptação, respetivamente. A figura 20 ilustra o princípio subjacente a um modelo criptográfico.

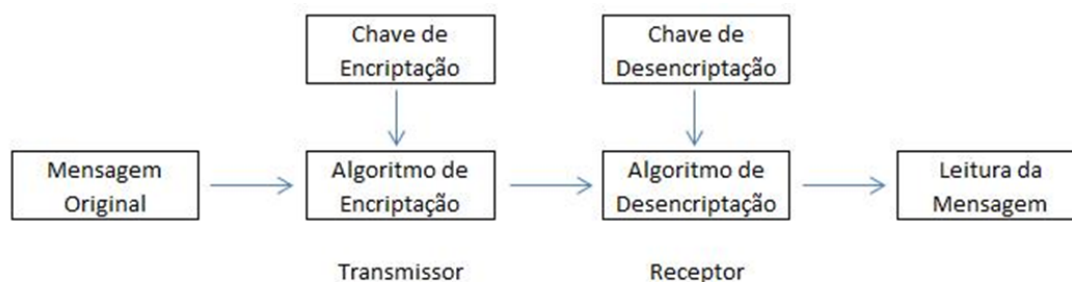


Figura 18 – Modelo Criptográfico

Os modelos criptográficos modernos⁴³ são os seguintes:

- ***Symmetric Key Cryptography***: Neste modelo, o emissor e o recetor partilham a chave usada na encriptação da mensagem. Tem como vantagem o facto de ser um método simples e rápido. Como desvantagem apresenta o facto de emissor e recetor terem que trocar a chave de desencriptação entre si. Os algoritmos que permitem esta abordagem podem ser divididos em:
 - ***Stream Ciphers***: A mensagem original é encriptada bit a bit sendo depois submetida ao operador logico (XOR) que dá origem a encriptação;
 - ***Block Ciphers***: A encriptação da mensagem original é feita em grupos de bits. A título de exemplo, o DES (*Data Encryption Standard*) opera com blocos de 64 bits.
- ***Advanced Encryption Standard (AES)***: Modelo que recorre a blocos de 128, 192 ou 256 *bits* encriptados simultaneamente. (Federal Information Processing Standards Publication , 2001).

A segurança em ZigBee assegura a integridade da mensagem, a autenticação e a privacidade dos dispositivos. Permite diferentes níveis de segurança e recorre *Counter Mode* (CTR) com encriptação AES de 128 *bits* para encriptar a mensagem. Recorre ainda a *Cipher Block Chaining* (CBC) com AES de 128 *bits*, para assegurar a criação de um código de integridade da mensagem (MIC). A segurança em ZigBee recorre a chaves simétricas e pode aplicar criptografia à camada aplicacional e de rede, sendo

⁴³ Os modelos criptográficos podem ser divididos em duas grandes classes: Os modelos clássicos são os anteriores ao aparecimento de aplicações computacionais e os modelos modernos são aqueles que estão associados a criptografia dos sistemas de comunicação.

decisão do fabricante a seleção do nível em que a segurança será aplicada. Outra característica é o facto de ser a camada que gera a *frame* a ser responsável pela segurança do mesmo.

Em ZigBee são definidos três tipos de chaves de segurança:

- **Link Key:** Chave partilhada entre apenas dois dispositivos com o intuito de de proteger os frames ao nível da camada APS (por norma um dos dispositivos é o *Trust Center*)
- **Network Key:** Chave global usada por todos os dispositivos da rede sendo o *Trust Center* responsável pela distribuição do endereço em uso. Cada Trust Center pode ter uma pool de endereços (identificada por uma sequência numérica)
- **Master Key:** Chave mestra carregada previamente nos dispositivos, utilizada ao nível da camada aplicacional. A diferença, quando comparada com a *Network key*, reside no facto de não ser enviada através do canal “não seguro” que é estabelecido inicialmente (aquando da inicialização da rede).

3.3 Análise de soluções existentes

No mercado, há diversas soluções que visam a redução de fluxo e, conseqüentemente, o menor consumo energético em parques de iluminação pública. Alguns desses mecanismos não recorrem a soluções tecnológicas de cariz informático. É o caso das soluções que recorrem à redução de fluxo de iluminação por redução de tensão (como é o caso da solução desenvolvida pela Reverberi) (Reverberi) ou que recorrem a programação estática dos balastros incorporados nas luminárias para reduzir de forma definitiva o fluxo luminoso emitido (como é o caso de balastros desenvolvidos pela Philips).

Em virtude do enfoque do presente trabalho ser a forma como as TIC e os sistemas de informação aportam valor aos sistemas de iluminação que recorrem a telegestão, serão detalhadas duas soluções que se socorrem da temática já abordada no presente documento. Assim, para ilustrar a aplicação do protocolo ZigBee, recorrer-se-á à solução desenvolvida pela Owlet. A mesma abordagem será feita em relação ao protocolo PLC. Para tal, será observada a solução desenvolvida pela Sogexi. Ambas as soluções (Sogexi/PLC e Owlet/ZigBee), já deram provas de qualidade e robustez em diversas aplicações reais.

3.3.1 Sogexi

A Sogexi⁴⁴ é uma empresa Francesa sediada em Lyon que desenvolveu um sistema de redução de fluxo de iluminação tendo como pilar o protocolo PLC. O sistema desenvolvido assenta numa tipologia de rede em estrela que interliga a TCU (*Tegis Cetral Unit* – figura 21) e os nós de comunicação instalados nas luminárias monitorizadas.

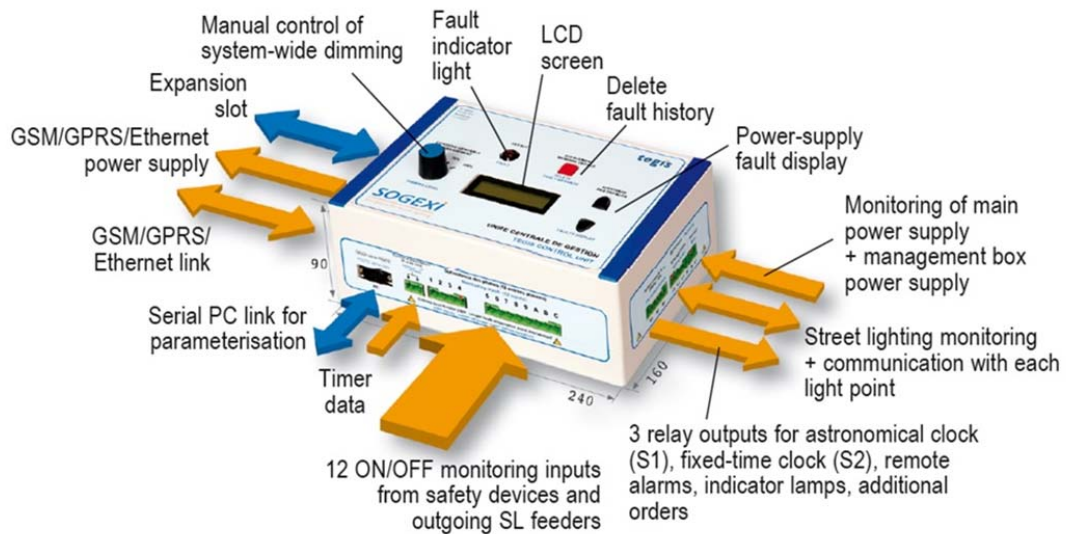


Figura 19 – Unidade Central de Controlo (Sogexi)

O controlo dinâmico de cada ponto de luz é conseguido através do acoplamento de um equipamento designado como TDX (figura 22). Este equipamento recebe a comunicação da TCU por PLC e converte a ordem recebida num sinal DALI ou 1-10V. Este sinal é depois enviado à luminária para que seja feita a alteração de fluxo luminoso. Uma vez que o sistema tem retorno de informação a TCU regista o comportamento de todos os equipamentos que estão a jusante da mesma.

⁴⁴ <http://www.sogexi.fr/>



Figura 20 – TDX. (Sogexi)

Conforme é ilustrado pela figura 23, o sistema reside basicamente em 3 componentes:

O primeiro, sendo também o mais importante, é a TCU que tem a capacidade de comunicar com os pontos de luz instalados ao longo dos circuitos de iluminação. Este equipamento é colocado à saída do Posto de Transformação (PT) e pode ser ligado a circuitos monofásicos ou trifásicos.

O segundo componente é o TDX. Este equipamento é responsável pela recepção da ordem enviada pela TCU, pela conversão do sinal PLC recebido em DALI ou 1-10V (protocolo de comunicação dos *drivers* ou balastros associados à luminária) e pelo envio do sinal convertido ao equipamento de iluminação. De referir que dada a bidirecionalidade do sistema é também capaz de fazer a modelação de sinal em sentido inverso. Desta forma, consegue informar a TCU sobre a reação obtida da luminária.

O terceiro componente é o *modem* que fica acoplado à TCU. É o equipamento que permite ao gestor do parque de iluminação comunicar e interagir com o sistema instalado e, conseqüentemente, reagir aos comportamentos observados.

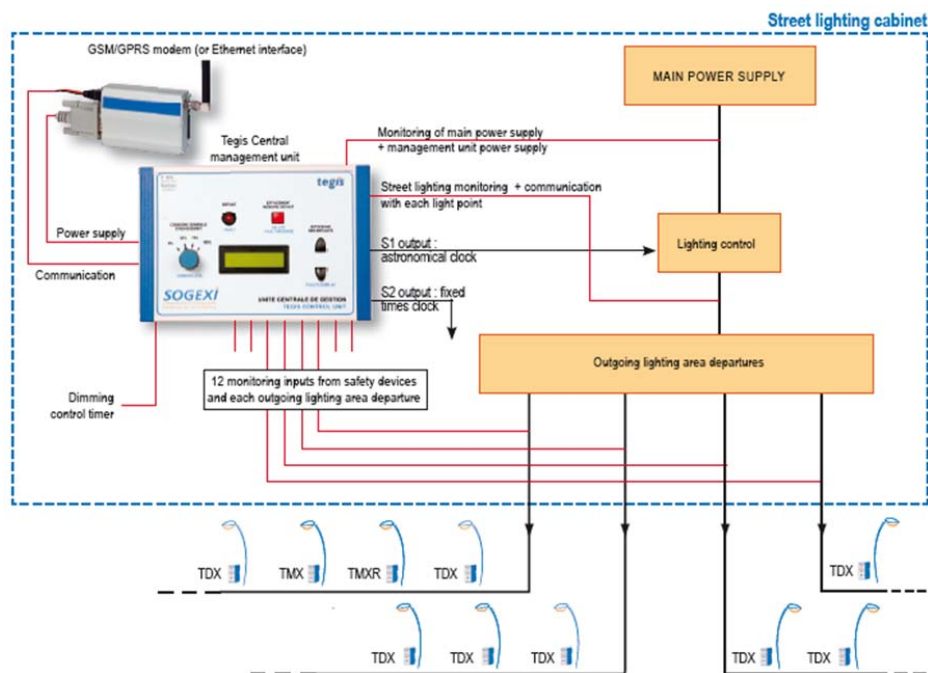


Figura 21 – Esquemática de implementação⁴⁵ (Sogexi)

Do ponto de vista funcional o sistema desenvolvido pela SOGEXI (assente na tecnologia de comunicação PLC) é capaz de implementar as seguintes funcionalidades:

- **Poupança Energética:**
 - Capacidade de redução de fluxo de iluminação de forma calendarizada;
 - Funcionalidade de apagamento e acendimento condicionado;
 - Otimização da troca de componentes (balastos, lâmpadas).
- **Monitorização do Sistema:**
 - Monitorização de consumos instantâneos, diários e periódicos;
 - Monitorização do estado das luminárias;
 - *Reporting* em tempo real;
 - Capacidade de intervenção remota.

⁴⁵ Inicialmente o sistema desenvolvido pela Sogexi foi aplicado a parques de iluminação instalados com luminárias de descarga. Não obstante, a redução de fluxo em luminárias LED é uma possibilidade e uma realidade.

No que respeita à possibilidade de integração com o sistema proposto, tal como descrito na figura 24, esta é assegurada pela possibilidade do sistema central de armazenamento de informação (sistema ao qual a TCU reporta informação através do modem) recorrer a *Web Services*⁴⁶. Desta forma, é facilitada a comunicação com uma plataforma central que seja capaz de integrar diferentes tecnologias.

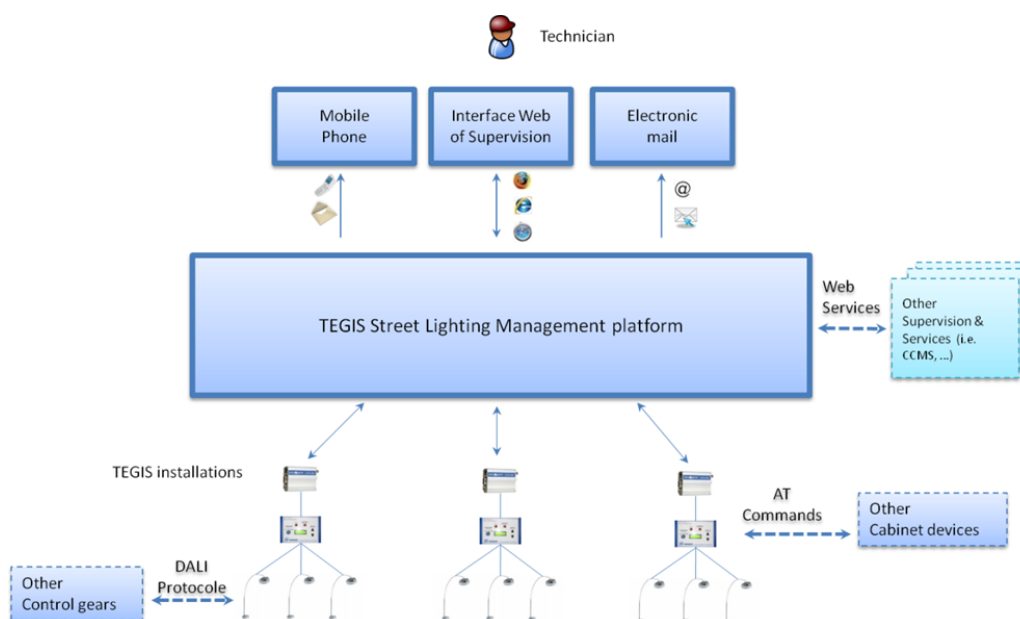


Figura 22 – Canais de comunicação do sistema Sogexy (Sogexi)

Tecnicamente, a solução assenta nos seguintes pressupostos na comunicação entre TCU e TDX:

- Recurso a PLC;
- De acordo com a norma CENELEC EN50065-1 (Banda B);
- Velocidade de transmissão de 100 bits/seg;
- Protocolo aberto.

⁴⁶ Nome dado a soluções de integração e de comunicação para aplicações diferentes. Os Web services são componentes que permitem às aplicações enviar e receber dados em formato XML

3.3.2 Owlet

A Owlet⁴⁷ é uma empresa Alemã sediada em Mainz que desenvolve um sistema de redução de fluxo de iluminação com recurso a ZigBee. O sistema desenvolvido e cuja arquitetura é descrita pela figura 25, assenta numa tipologia em estrela em que a rede é *self-healing*. Quer isto dizer que a rede de comunicações tem a capacidade regenerativa de encontrar o caminho mais eficaz para a comunicação entre os nós que a integram e que a falência de um nó não influi no comportamento normal dos restantes nós.

O sistema desenvolvido pressupõe a existência de um concentrador e gestor da rede ZigBee que é designado por SeCo (*Segment Controller*) e de equipamentos terminais de controlo individualizado de cada ponto de luz. De acordo com a especificidade do ponto de luz opta-se por equipamentos distintos: CoCo (*Column Controller*) para controlar dois pontos de luz instalados na mesma coluna, ou LuCo (*Luminaire Controller*) para controlar pontos de luz isolados.

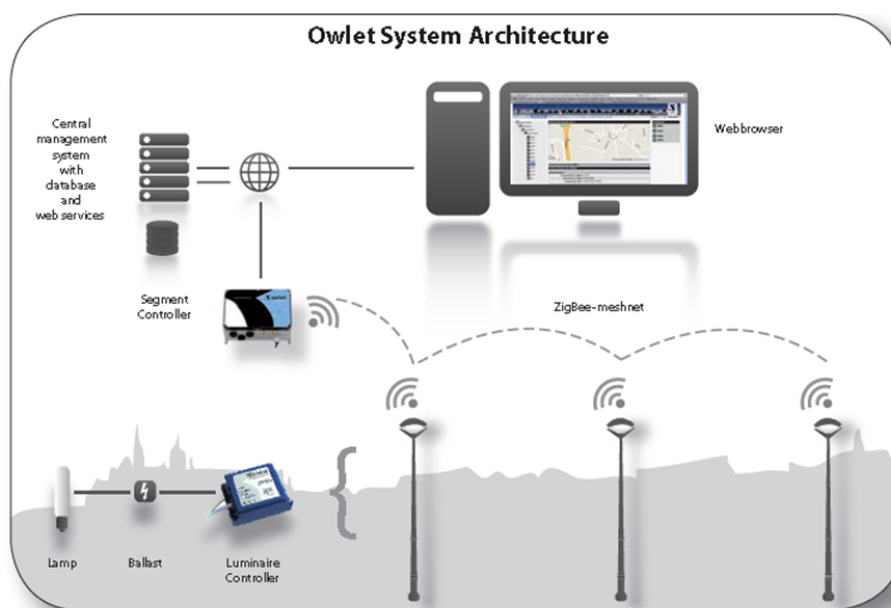


Figura 23 – Arquitetura do Sistema Owlet. (Owlet)

⁴⁷ <http://owlet-streetlight.de/>

O modelo de comunicação usado pelo sistema Owlet é o protocolo ZigBee que permite interligar numa rede os equipamentos instalados. A rede de comunicação é caracterizada por ter uma tipologia em estrela e pelo facto de ser *self-healing*. Desta forma, a rede é capaz de determinar o melhor caminho que a informação deve percorrer.

O modo de operação de cada nó da rede pressupõe que se encontra em “*Idle Mode*”. Sempre que um nó não recebe ou envia informação o módulo de Radio Frequência encontra-se hibernado. A mudança de estado ocorre sempre que se verifica uma das condições descritas no fluxograma da figura 26:

1. Modo de transmissão ativado (quando há informação capaz de ser transmitida);
2. Modo de receção (é recebida informação válida);
3. Modo de descanso (apenas aplicável a dispositivos terminais);
4. Modo de Comando (quando a sequência de comando é inicializada).

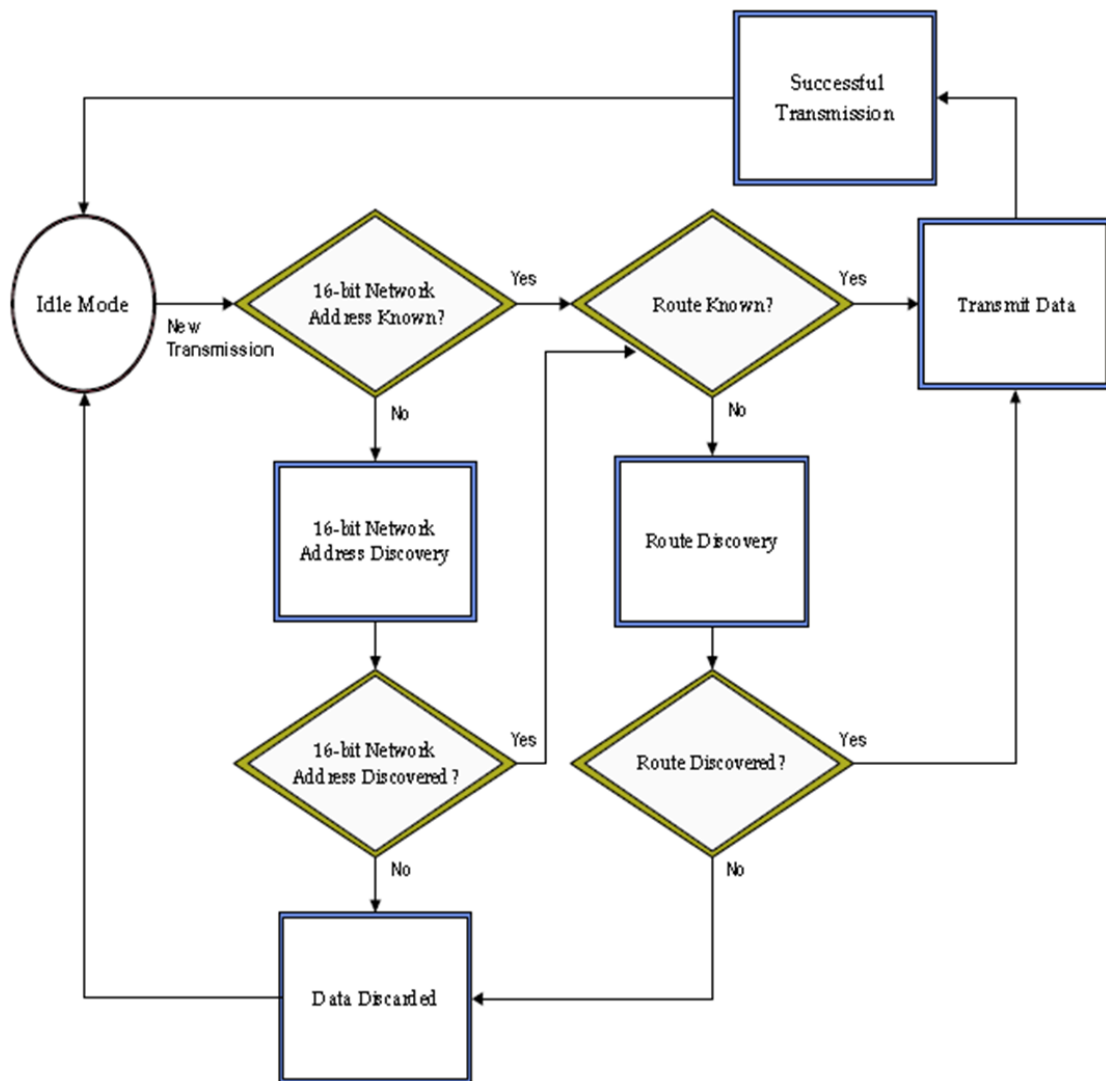


Figura 24 – Fluxograma de alternância de estados (Ata Elahi, 2009)

Comparativamente a outras tecnologias que recorrem a transmissões de dados por rádio frequência, as vantagens são descritas na tabela 15:

Tabela 14 – Tabela comparativa de tecnologias que recorrem a radiofrequência.

	ZigBee e 802.15.4	GSM/ GPRS CDMA	802.11	Bluetooth
Aplicação Principal	Monitorização e controlo	Redes de voz e de dados	Internet de alta velocidade	Conectividade de dispositivos
Longevidade de Bateria	Vários Anos	1 Semana	1 Semana	1 Semana
Largura de Banda	250 Kbps	Até 7 Mbps	Até 54 Mbps	720 Kbps
Alcance	Até 100 metros	Vários Km	Até 100 metros	Até 100 metros
Vantagens	Baixo Consumo Baixo Custo	Utiliza infraestrutura existente	Velocidade	Facilidade de uso

3.3.3 Vossloh-Schwabe

A Vossloh-Schwabe⁴⁸ é uma empresa alemã (adquirida pela Panasonic em 2002) sediada em Lüdenscheid que tem uma solução de telegestão para iluminação pública assente no protocolo PLC. À semelhança do sistema desenvolvido pela Sogexi, também a tipologia de rede é em estrela sendo o controlo de cada ponto de luz conseguido por intermédio de um equipamento designado por iLC (*Intelligent Luminaire Controller* – Figura 27) ou por um iPC (*Intelligent Pole Controller* – Figura 28).

⁴⁸ <http://www.vossloh-schwabe.com/home.html>



Figura 25 – Intelligent Luminaire Controller (Vossloh-Schwabe)



Figura 26 – Intelligent Pole Controller (Vossloh-Schwabe)

A vantagem que apresenta em relação à solução da Sogexi é a capacidade de, com apenas um equipamento poder controlar mais do que uma luminária (duas, para ser exato) de forma simultânea e individualizada.

Paralelamente a estes equipamentos é ainda disponibilizado o iMCU (*Intelligent Light Controller* – Figura 29) que pode ser acoplado a um balastro (ferromagnético ou eletrônico) e que é capaz de converter o sinal recebido em DALI⁴⁹ ou 1-10V de forma a poder comunicar ao balastro a redução de fluxo que este deve assumir.⁵⁰ Este equipamento funciona como *stand-alone* e pode ser reprogramado (necessário garantir conectividade física) para que tenha um desempenho diferente.

⁴⁹ DALI – *Digital Addressable Lighting Interface* (ver apêndice B)

⁵⁰ Este equipamento não será abordado em detalhe uma vez que o conceito de redução de fluxo não é confundível com os princípios de telegestão que o presente trabalho aborda. A entrar em detalhe sobre este equipamento, por critérios de justiça teria também que abordar soluções similares da Philips e de outros fabricantes. Uma vez que estes equipamentos implementam redução de fluxo mas não permitem telegestão não serão analisados, embora mereçam referência.



Ilustração 27 – Intelligent Light Controller (Vossloh-Schwabe)

A solução apresentada pela Vossloh-Schwabe caracteriza-se pelas seguintes características:

- **Poupança Energética:**
 - Capacidade de redução de fluxo de iluminação de forma calendarizada, com recurso a grupos e sem ignorar a especificidade das luminárias;
 - Equipamentos de controlo com baixo consumo energético (<1W);
 - Otimização da troca de componentes (balastos, lâmpadas).
- **Operacionalização do Sistema:**
 - Monitorização de consumos instantâneos, diários e periódicos;
 - Monitorização do estado das luminárias e otimização dos ciclos de manutenção;
 - *Reporting* em tempo real;
 - Controlo das luminárias com base de grupos ou de forma individualizada.

3.4 Resumo do enquadramento teórico

A presente secção tem como finalidade apresentar de forma aglutinada tudo o que foi já abordado. Pretende-se, de forma simples mas não simplista, comparar as tecnologias e, desta forma, evidenciar as maiores vantagens e as fragilidades que apresentam. Apesar da abordagem comparativa apresentada, há que ter em conta que uma tecnologia não é melhor que outra. O que se pretende é mostrar que, de acordo com as necessidades específicas a que é necessário responder, há que ponderar a solução a que se recorrerá. Mais do que aspetos tecnológicos, há que considerar aspetos financeiros e o

ambiente envolvente no que concerne, por exemplo, a localização geográfica, parque de luminárias instalado e ainda, naturalmente, qual a solução que é capaz de responder capazmente ao caderno de encargos que espelha as necessidades e as expectativas que recaem sobre a solução a implementar.

Na tabela 17 é apresentada uma lista de pontos que devem ser analisados e que auxiliará na seleção inicial da solução que se afigura mais vantajosa.

Tabela 15 – Check List para seleção de tecnologia a implementar

Sistema	Caracterização	
PLC	Instalação Elétrica	Nova/Antiga?
		Neutro Comum / Fases Equilibradas?
ZigBee	Localização	Terreno Acidentado?
		Obstáculos na via Pública?
		Cobertura de GSM?
PLC / ZigBee	Projeto de Iluminação	Tipo de Luminárias Instaladas?
		Quantidade de PTs?
		Quantidade de Luminárias isoladas?
		Quantidade de Luminárias “duplas”?
		Redução de fluxo estático ou dinâmico?
		Disponibilidade financeira?

A resposta às questões evidenciadas na tabela 16 permitirá observar aspetos críticos ao funcionamento de ambas as soluções. Não sendo cumpridos os requisitos mínimos que caracterizam cada uma das soluções e havendo constrangimentos financeiros, é ainda possível implementar sistemas de regulação de fluxo recorrendo a drivers ou balastros programáveis.

A tabela 17 apresenta, de forma comparativa, os aspetos mais relevantes das soluções comerciais abordadas e, naturalmente, das tecnologias a que recorrem para que possam ser implementadas.

Tabela 16 – Comparação das soluções comerciais.

Protocolo	PLC	PLC	ZigBee
Comunicação com “master” para efeitos de telegestão	Apenas GSM	GSM e TCP/IP	GSM e TCP/IP
Robustez do sinal transmitido e modelação do sinal	Fraca Comunicação efetuada na banda B segundo a norma CENELEC EN50065-1	Boa Comunicação efetuada de forma auto adaptativa na banda B ou C da norma CENELEC 50065-1	Boa Comunicação feita segundo o protocolo ZigBee e beneficiada por tipologia de <i>Mesh Networking</i>
Frequência de comunicação	125 KHz (limite da banda B)	95-125KHz (banda B) 125-140 KHz (banda C)	2.405 MHz
Modelação do sinal transmitido	Informação não disponível comercialmente	Informação não disponível comercialmente	Informação não disponível comercialmente
Acesso ao meio de transmissão	Informação não disponível comercialmente	Informação não disponível comercialmente	Informação não disponível comercialmente
Maiores Fragilidades	Robustez do sinal transmitido; Tipologia de rede implementada; Luminárias não	Tipologia de rede implementada; Luminárias não conseguem ser atuadas sem que estejam	Sistema só é atuado se for garantida comunicação entre “master” e “slaves”

	conseguem ser atuadas sem que estejam alimentadas por corrente elétrica	alimentadas por corrente elétrica	
Resiliência da solução	Fraca Equipamentos de controlo da luminária dependem da tipologia da rede.	Média Em caso de falha de comunicação os controladores das luminárias atuam isoladamente	Média Apesar da vantagem que advém da resiliência conseguida pela tipologia de rede, depende da disponibilidade do “ <i>master</i> ” para que as ordens de redução de fluxo sejam interpretadas
Adaptabilidade a luminárias distintas instaladas nos mesmos circuitos	Não	Sim Cada controlador de luminária é configurado especificamente	Sim Cada controlador de luminária é configurado especificamente
Agrupamento de luminárias	Não	Sim	Sim
Distingue luminárias com características diferentes	Não	Não	Sim
Velocidade de comunicação	100 bps	5 Kbps	250 Kbps
Distância máxima entre nós	100m	2000 m	100 m

Número máximo de luminárias controladas por cada master	128 (com partilha física da instalação elétrica de um PT)	200 (com partilha física da instalação elétrica de um PT)	150 (independentemente de serem alimentadas por PTs distintos)
Tipologia de rede	<i>Bus</i>	<i>Bus</i>	Estrela (<i>Mesh-Network</i>)
Protocolo comunicação entre controlador de nó e balastro/driver	DALI (Se o balastro ou <i>driver</i> não receberem DALI, há necessidade de instalar um conversor de sinal).	DALI / 1-10V	DALI / 1-10V
Controlo unificado de luminárias independentemente do master a que estão associadas	Não	Não	Não
Integração com soluções que recorram a outras tecnologias de comunicação.	Não	Não	Não
Reação adaptativa ao meio	Não	Sim (Com recurso à instalação de sensores	Sim (Com recurso à instalação de sensores em cada

	em cada luminária que se pretenda “reativa”)	luminária que se pretenda “reativa”)
--	--	--------------------------------------

É no seguimento da análise expressa na tabela 17 que foi identificada uma oportunidade de melhoria pertinente que dá razão à realização do presente trabalho.

Resumidamente, identificam-se três características (marcadas a cor vermelha) que podem ser interpretadas como oportunidades de melhoria. Em resultado do estudo levado a cabo, constata-se que tecnologias de telegestão diferentes, tornam impossível a integração das mesmas. Para além disso, ainda que a tecnologia usada pela comunicação que permite a implementação de regulação de fluxo seja a mesma, os vários grupos não conseguem interagir entre eles. Ainda assim, o que se entende ser a maior oportunidade de melhoria prende-se com o facto de tornar a iluminação reativa e inteligente (naturalmente, artificialmente inteligente) a fenómenos do meio envolvente. Considerando a utilização de inteligência artificial e a integração de tecnologias heterogéneas, estão reunidas as premissas nucleares para elevar a Iluminação Pública a um estado avançado, sem paralelo e manifestamente vantajoso.

4 Modelação da solução proposta

Como resultado do estudo apresentado, percebe-se que não há soluções ideais. Há, efetivamente, boas soluções desde que se adaptem e respondam às expectativas que recaem sobre elas. Na realidade todas as soluções são boas desde que parametrizadas para responder ao que é esperado que façam, e desde que sejam considerados aspetos críticos ao seu funcionamento.

A motivação para a modelação de uma solução capaz de otimizar os sistemas de iluminação pública sujeitos a telegestão é a dificuldade existente em gerir de forma integrada os sistemas heterogéneos.

Segundo os princípios mais elementares de gestão, há que conhecer para poder agir em consonância. Esta abordagem não é nada de novo e foi já sobejamente estudada por vários autores ligados ao mundo da gestão e da economia. Este binómio, traduzido graficamente pela figura 30, é abordado, detalhado e traduzido naquilo que Michael Porter defende como suporte à estratégia competitiva de uma organização (Porter, 1998).



Figura 28 – Estratégias competitivas genéricas de Michael Porter.

Esta abordagem pode ser compreendida e implementada no universo da telegestão de sistemas de iluminação pública. Efetivamente, o que se pretende modelar é uma solução diferenciadora, unificada e que apresente um TCO⁵¹ altamente vantajoso.

No seguimento da figura 30, a temática em foco é a telegestão de sistemas de iluminação pública. No que respeita à intersecção dos vetores “alvo estratégico” e “vantagem estratégica” a aposta é na diferenciação da solução em estudo e que é alicerçada pela diferenciação em relação aos modelos de telegestão existentes. De referir, que a diferenciação é atingida pela capacidade de gestão integrada de sistemas heterogéneos dotados de inteligência artificial.

Tendo em conta a temática da telegestão de Iluminação Pública é possível perceber, à luz de uma análise SWOT, as variáveis que caracterizam a solução apresentada. Primeiramente há que perceber que os Sistemas de Iluminação Pública e em particular as empresas que os comercializam (no caso em concreto a Schröder Iluminação SA), são afetados por variáveis internas e por variáveis externas. Tanto uma como outras, revelam aspetos favoráveis e desfavoráveis. Do ponto de visto interno (variáveis respeitantes ao interior da própria empresa) serão analisadas as forças e as fraquezas. Do ponto de visto externo (variáveis não influenciáveis pela empresa e que são reflexo do ambiente externo à empresa) serão analisadas as oportunidades e as ameaças. A análise SWOT⁵² é apresentada na figura 31.

⁵¹ TCO – Total Cost of Ownership

⁵² Para além desta análise tradicional, são adicionados dois vetores a cada quadrante que traduzem a quantificação do custo financeiro (eixo xx) e o custo humano (eixo yy).

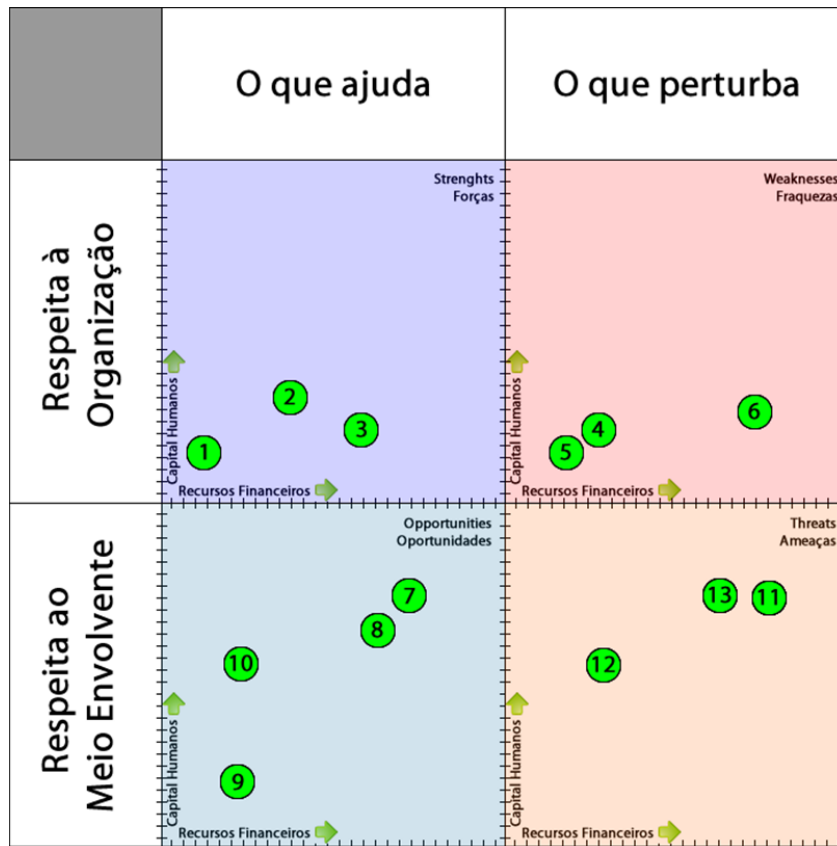


Figura 29 – Análise SWOT⁵³ da maturidade dos sistemas de Telegestão de Iluminação Pública (“Realidade Schröder vs. Concorrência”)

Legenda da figura 31:

- | | |
|---|--|
| 1 – Possibilidade de Evolução | 8 – <i>Branding</i> da marca “Schröder” |
| 2 – Existência de Soluções | 9 – Visibilidade comercial das soluções instaladas |
| 3 – Capacidade Tecnológica | 10 – Concorrência “parada” |
| 4 – Soluções “estaque” | 11 – Normalização de equipamentos |
| 5 – Decisão “política” em apostar em IA e integração de sistemas heterogéneos | 12 – Soluções concorrentes “incapazes” |
| 6 – Maturidade das tecnologias de suporte integradas nas atuais soluções | 13 – Mercado saturado de “más soluções” |
| 7 – Conhecimento de mercado | |

Esta matriz (reveladora da realidade atual) será analisada de forma detalhada na seção alusiva às "Perspetivas Futuras" e será complementada com uma análise de perspectiva futuras.

⁵³ A análise SWOT apresentada é “desvirtuada” pela adição de dois eixos que pretendem ilustrar os investimentos de cariz humano e financeiro.

4.1 Pressupostos

Para melhor apresentar o modelo proposto, primeiramente, é apresentado o que é tido como axiomático em soluções de telegestão (e que resulta da análise detalhada feita sobre as implementações que recorrem a Owllet e Sogexi)

Paralelamente ao que acontece noutros domínios, não será credível nem razoável que uma tecnologia domine o mercado de forma absoluta ou monopolista. Desta forma são elencados os pressupostos que sustentam a linha de raciocínio seguida para modelar a solução proposta:

1. Cada implementação de telegestão estudada no presente documento pressupõe o controlo de um número máximo de equipamentos de iluminação por cada unidade central de controlo;
2. A comunicação integrada entre unidades de controlo distintas não é possível;
3. Fruto da “cegueira” à vizinhança, duas luminárias próximas podem apresentar comportamentos distintos para a mesma realidade;
4. Cada fabricante recorre a protocolos diferentes para realizar a comunicação com os pontos de luz sujeitos a telegestão;
5. Da mesma forma que os protocolos são distintos, também o canal de comunicação o é;
6. Sendo sistemas heterogéneos, a filosofia de gestão do parque de luminárias instaladas é distinta no que concerne a:
 - a. Protocolos usados;
 - b. *Timing* para ordenação de comandos;
 - c. Forma como recebem a informação e a tratam;
 - d. Forma como gerem cada ponto de luz e o integram com o ambiente envolvente (reação por sensorização ou comportamento adaptativo).
7. Dificuldade com que dão informação em tempo oportuno sobre ocorrências relacionadas com eventos ocorridos;
8. Disparidade de forma e conteúdo entre as mensagens recebidas das luminárias.

4.2 Abordagem

A abordagem realizada é alicerçada pelos pressupostos enunciados e considerando três princípios elementares:

1. Envio de comunicação das unidades controladoras para os pontos de luz;
2. Receção de comunicação proveniente dos pontos de luz;
3. Abstração da tecnologia de comunicação do sistema de telegestão e manipulação integrada da informação referida nos pontos anteriores com recurso a camadas comportamentais que serão alicerçadas em redes neuronais, (Koch & Segev, 2012) com dotação de Inteligência Artificial, (Norvig, 2003) que tornam o sistema capaz de operacionalizar de forma integrada o comportamento das luminárias envolvidas.

A necessidade de recorrer a Inteligência Artificial (IA) e a redes neuronais impõe-se pela convivência natural e quase imperativa de ambas as tecnologias. A mais-valia que a IA apresenta para o modelo sugerido prende-se com o facto de, com estes métodos computacionais, ser possível a implementação de um grau de “aprendizagem” que permite ao sistema aprender com os “erros” de forma a ter um melhor desempenho no futuro, recorrendo para tal a regras ou lógicas pré-estabelecidas.

A utilização de redes neuronais, sendo esta área tida como uma componente da IA, podem ser vistas como um modelo matemático simplificado do funcionamento do cérebro humano. Esta perspetiva consiste num número elevado de unidades elementares de processamento (os neurónios – nós da rede) que recebem e enviam estímulos uns aos outros, formando uma rede altamente interconectada. Desta forma consegue-se um modelo em que os pontos de iluminação estão relacionados entre si e com a capacidade de terem reações orientadas por princípios e realidades assimiladas com a experiência passada. O pressuposto é simples: cada neurónio tem um peso que decorre do resultado da sua operação de análise. Por cada resultado correto o neurónio ganha um ponto. Por cada resultado errado ganha meio ponto. Com base neste pressuposto, o sistema assume uma rotina em que privilegia o caminho que obtém mais pontos. Outra vantagem significativa é que no caso de haver pontos de luz em grande quantidade e com elevado grau de dependência relacional é possível que haja um elevado número de resultados diferentes sem prejuízo da memória disponibilizada pelo sistema computacional. Isto

acontece porque ao invés de um sistema computacional tradicional, não necessita de executar de forma lógica as instruções de comando.

Ainda assim, apesar desta breve explicação é importante referir que o desígnio da IA não é o de seguir regras mas sim o de resolver problemas. Como tal, há duas vertentes da IA: a IA simbólica e a IA conexionista (Norvig, 2003).

Dando continuidade ao detalhe da abordagem que vem sendo apresentada, primeiramente há que considerar que sistemas distintos não comunicam da mesma forma. No que respeita à manipulação de dados, também ela é distinta. Sendo distinta implica que o “administrador” do sistema de telegestão tenha amplos conhecimentos que lhe permitam perceber e reagir a comportamentos distintos. Na verdade, em virtude de haver sistemas distintos, um mesmo evento pode ser apresentado de formas diferentes e nem sempre de interpretação fácil.

O modelo proposto considera uma implementação que recorre a IA que, por sua vez, é alicerçado em matrizes funcionais que estabelecem as premissas comportamentais das luminárias instaladas. Estas matrizes não são mais do que camadas interpretativas de redes neuronais que relacionam entre si as luminárias instaladas e que ao serem interpretadas por um sistema computacional permitem a abstração e independência das características tecnológicas de cada uma das implementações reais de sistemas de telegestão. Desta forma é possível ultrapassar as diferenças tecnológicas das várias soluções. Com esta abordagem, que consiste num *middleware* de integração é possível gerar e gerir comunicação com sistemas heterogéneos de forma unificada. Oportunamente, será descrita a forma como este sistema integrador gerará, receberá e como procederá à conversão de ordens de comunicação de génese distinta.

Para além dos aspetos já descrito, outra funcionalidade que constará do modelo é a integração da informação recolhida para que possa ser analisada com recurso a automatismos que possibilitem a existência de *outputs* cuja interpretação se pretende facilitada e capaz de gerar valor adicional. O que se pretende é que o sistema tenha uma vertente de *Business Intelligence* que, para além da sensibilidade do administrador do sistema, permita a tomada de decisões com base em pressupostos analíticos e factuais obtidos através de *data mining*⁵⁴.

Na figura 30 é apresentada a arquitetura do sistema a implementar.

⁵⁴ Nome dado ao processo de explorar grandes quantidades de dados orientados à procura de padrões consistentes, como regras de associação ou sequências temporais visando a deteção de relacionamentos sistemáticos entre variáveis.

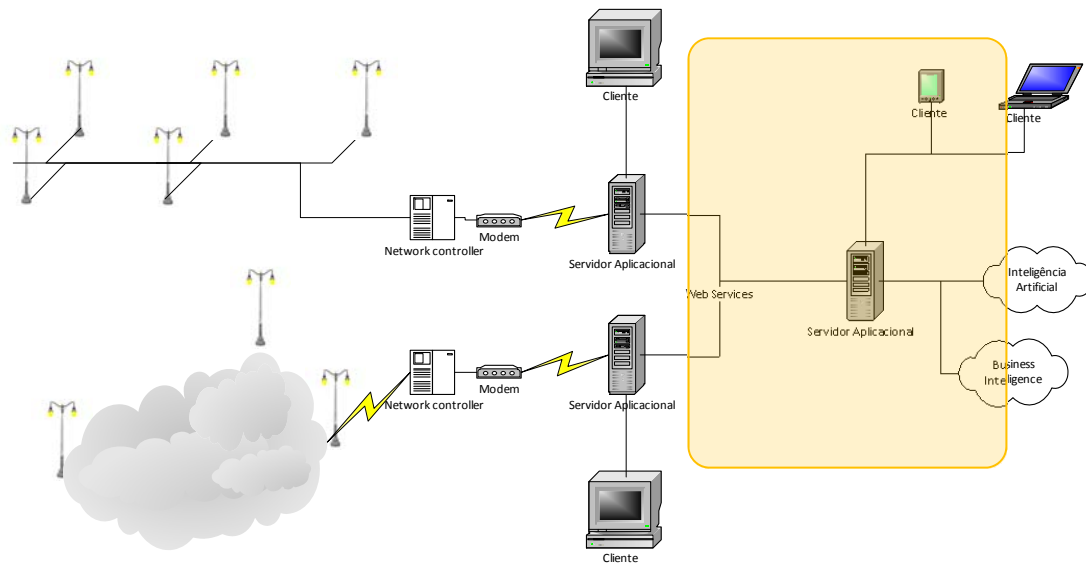


Figura 30 – Arquitetura do sistema proposto.

Conforme é visível na figura 32, a arquitetura apresentada não altera nem interfere com a realidade existente. Apenas é adicionada uma camada computacional a montante dos sistemas instalados (área sombreada a laranja).

Do ponto de vista funcional, o sistema apresentado pode ser entendido como uma interpretação matricial da disposição dos pontos de luz no terreno.

A sucessão de imagens apresentadas ilustra a abordagem defendida:

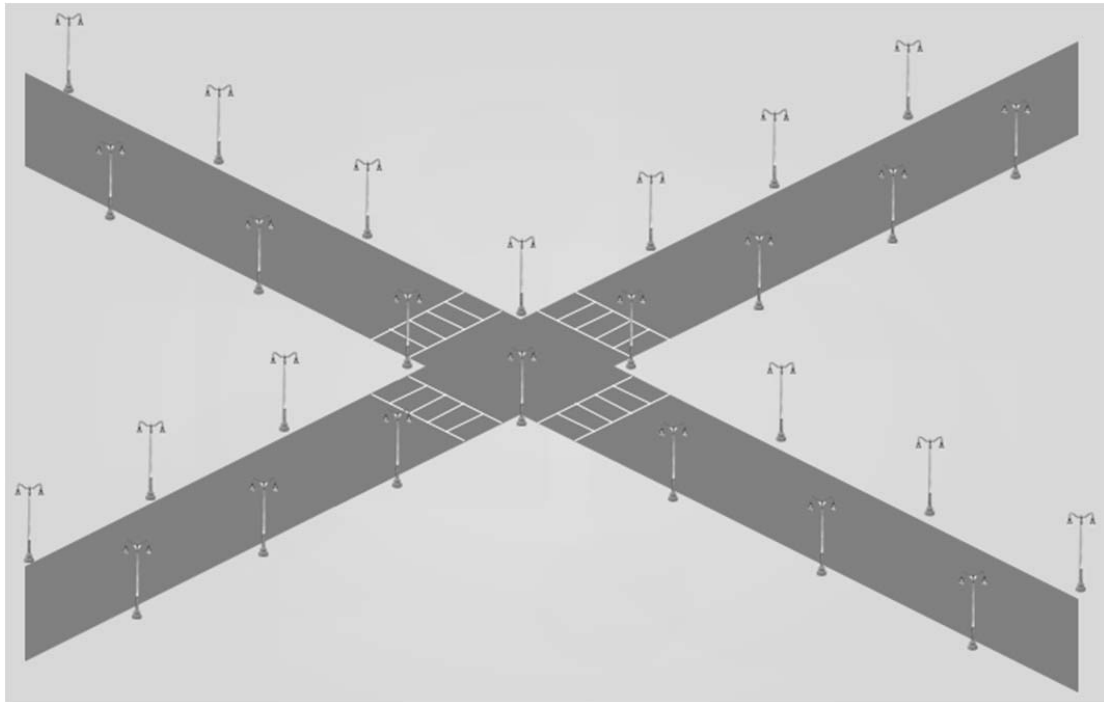


Figura 31 – Esquema tradicional de disposição de pontos de luz na via pública

Na figura 33 é visível a disposição uniforme de equipamentos destinados à iluminação da via pública. Nesta realidade o objetivo, por motivos de redução de custos, poderá ser afastar o mais possível as luminárias umas das outras, desde que seja mantida a uniformidade mínima de luz ao nível do solo. Ao afastar as luminárias umas das outras os custos são reduzidos uma vez que se poupa na aquisição de equipamentos e, conseqüentemente, na manutenção dos mesmos. Uma vez que se reduz ao máximo o número de pontos de luz há uma óbvia e conseqüente redução da fatura energética e de emissão de gases nefastos à atmosfera. Tipicamente, não sendo esta a razão, fruto da pressão mediática existente sobre a preservação do meio ambiente, esta é uma característica cada vez mais observada. Em instalações existentes e em que já não é possível alterar a distância entre luminárias, para conseguir reduzir custos, tem-se recorrido ao “apagão” intercalado de luminárias.

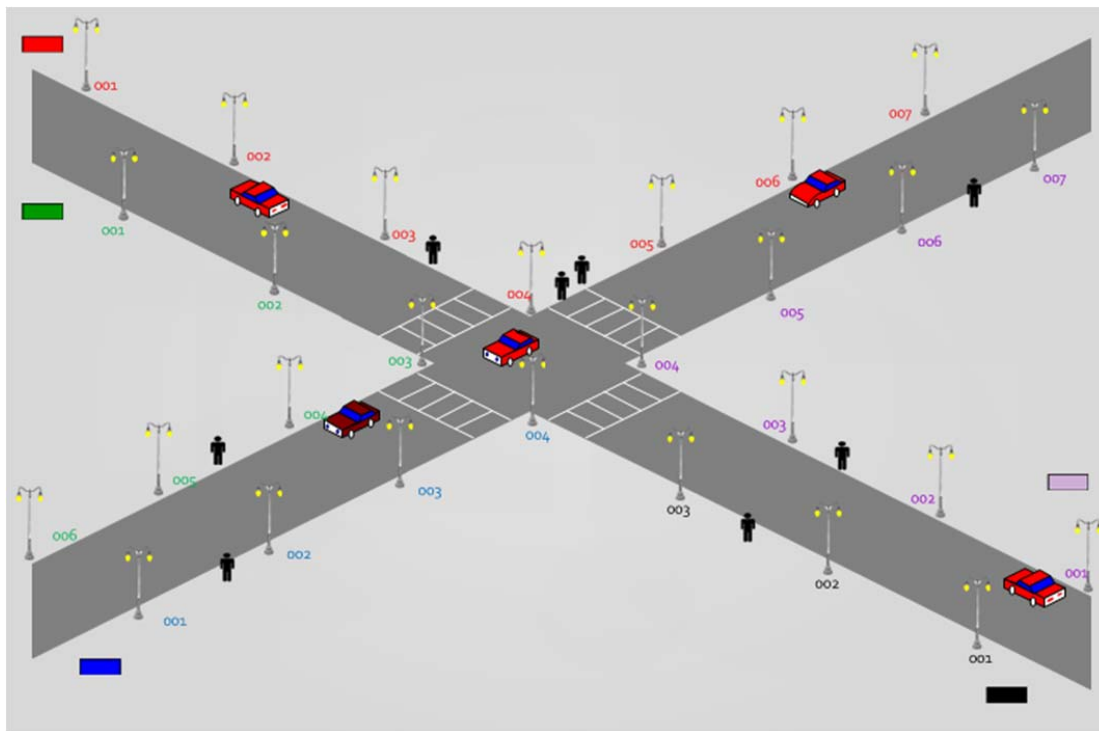


Figura 32 – Disposição de pontos de luz com endereçamento para telegestão

Fruto da necessidade cada vez mais premente de reduzir custos com a iluminação pública, os sistemas de telegestão (sistemas distintos são apresentados na figura 34 com cores distintas) têm vindo a assumir preponderância, uma vez que permitem a redução do fluxo de iluminação e, conseqüentemente, a redução dos custos relacionados com o consumo elétrico dos equipamentos.

A questão que se levanta e que é considerada pertinente, tal como já foi referido no presente documento, prende-se com a gestão integrada de sistemas que apesar de se proporem cumprir, na sua essência, o mesmo objetivo não podem ser geridos e reagir a eventos de forma integrada e unificada. Como se observa na figura 34, os pontos de luz que estão mais próximos do cruzamento estão sob gestão de sistemas de iluminação distintos (cada uma das cores dada a cada um dos endereços indica que estão associados a sistemas distintos). O problema que imediatamente se identifica é o facto de cada um dos sistemas poder debitar fluxos de iluminação distintos. Neste cenário, hipotético, mas possível, poderá haver esquinas que no mesmo instante temporal estão sujeitas a redução de fluxo (podendo este ter maior ou menor amplitude), que estão sem iluminação ou iluminadas na sua plenitude; este é um dos

aspectos que se pretende evitar. Considerando a necessidade de os pontos de luz reagirem a um evento (por exemplo o acendimento gradual aquando da deslocação de uma viatura ou a um peão que atravessa a estrada) não é possível que luminárias sob controlo de unidades de controlo distintas possam atuar de forma orquestrada.

A solução proposta está ilustrada na figura 35.

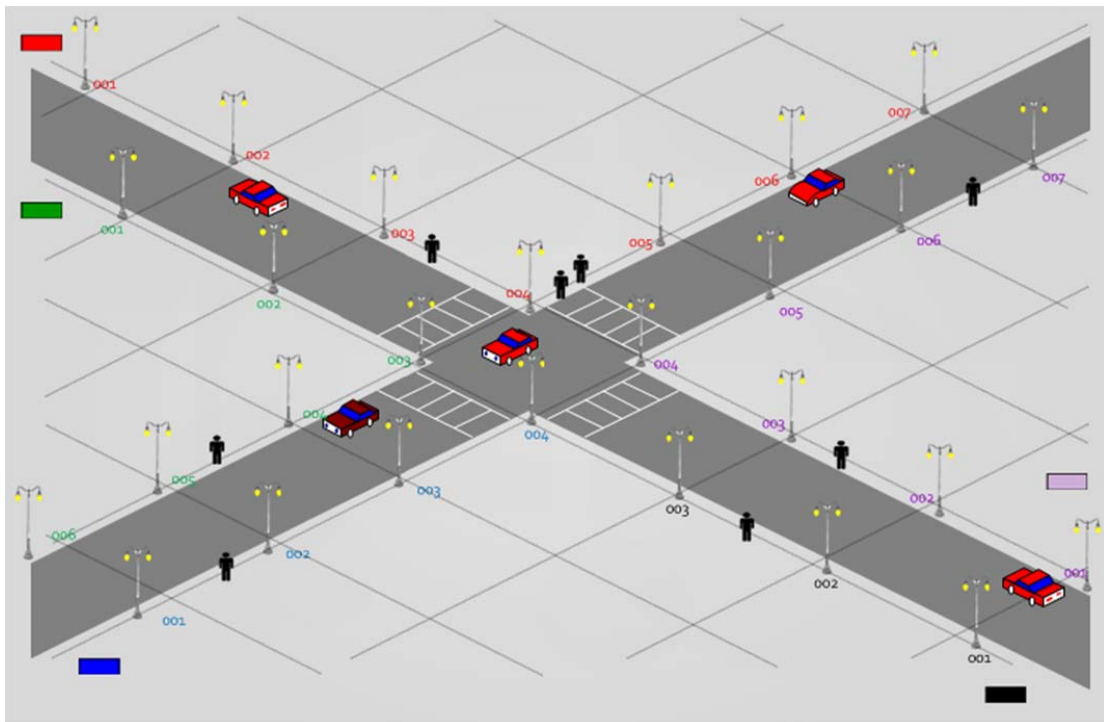


Figura 33 – Aplicação do modelo neuronal a sistemas de iluminação pública.

No modelo apresentado, é possível passar a um nível superior a poupança de energia sem hipotecar a segurança dos transeuntes. Para tal, criar-se-á o conceito de uma matriz (naturalmente, nem sempre com a geometria perfeita que a figura ilustra) que é ativada segundo um motor de IA capaz de interpretar eventos que ocorram e de fazer ativar as luminárias conforme as camadas funcionais e a rede neuronal de pontos de luz definida. Conceptualmente, uma rede neuronal, traduz a relação de dependência que as luminárias podem ter entre si. De entre os fatores influentes destacam-se aspetos tais como:

1. Luminária antecedente e seguinte, de acordo com a disposição geográfica para que seja possível no sentido de deslocação iluminar com base no pressuposto “luminária a ligar = luminária ligada

- + 1” e, no sentido contrário seja possível iluminar com base no pressuposto “luminária a ligar = luminária ligada – 1”;
2. Orientação de direção do trânsito, no que respeita deslocação de uma viatura. Para que seja possível iluminar capazmente a via no sentido em que o carro se desloca;
 3. Variedade de direções que podem ser equacionadas pelo veículo, de acordo com a sinalização viária e para que seja possível iluminar capazmente todas as alternativas viárias à disposição de um automobilista;
 4. Iluminação de acessos concorrentes àquele em que o veículo se desloca, como forma de maximizar a perceção de segurança.

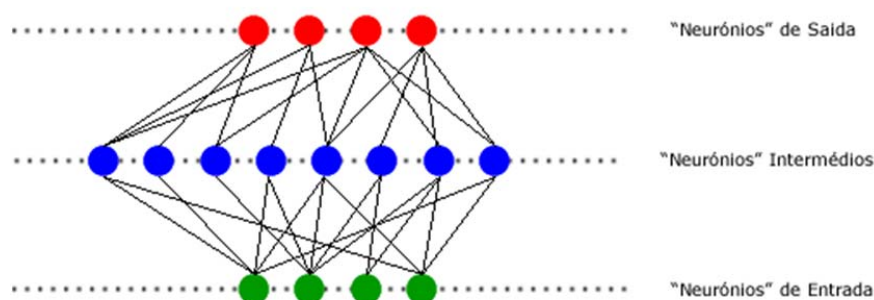


Figura 34 – Tipificação de rede neuronal⁵⁵

Tal como na figura 36, o princípio a aplicar traduz-se pela referenciação das luminárias a serem acionadas após ser detetado um comportamento num “neurónio de entrada”. Um “neurónio de entrada” poderá acionar um número ilimitado de luminárias, mesmo que os pontos de luz pertençam a sistemas heterogéneos.

⁵⁵ A rede neuronal ilustra a relação de dependência entre as luminárias instaladas. Conceptualmente, uma luminária deve saber que luminárias deve ativar sempre que deteta um evento.

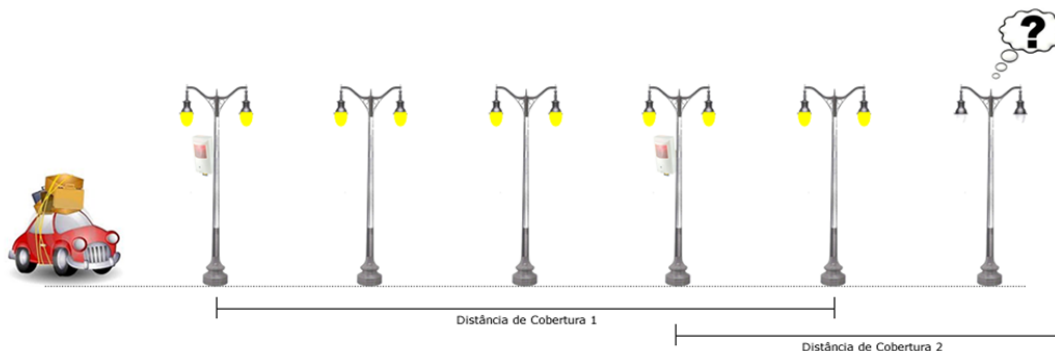


Figura 35 – Sobreposição de cobertura geográfica de luminárias

Na figura 37 é ilustrado outro princípio que se prende com a necessidade de evitar zonas de variação brusca de fluxo. Para tal, é definido o pressuposto de que o acendimento de uma luminária influirá no acendimento de um determinado número de luminárias sucessivas e que nessa distancia coberta há, a determinada altura, uma luminária equipada com um sensor que ao ser ativado influirá no acendimento de uma nova serie de luminárias. Este pressuposto, ao ser repetido, faz com que não haja zonas de acendimento brusco e com que haja uma transição natural entre pontos de luz que possam estar (ou não) associados a sistemas de controlo de gestão distintos.

Para além das vantagens funcionais, as vantagens de integração e gestão estão estruturadas conforme a figura 38 ilustra. É de notar que na base da pirâmide estão todas as luminárias telegeridas e que se agrupam em sistemas de gestão com quem, atualmente, a interação é feita de forma ponto-a-ponto e sem qualquer integração. No topo da pirâmide está a funcionalidade a que o modelo proposto responderá e que se traduz pela integração de todos os sistemas heterogéneos de gestão primária.

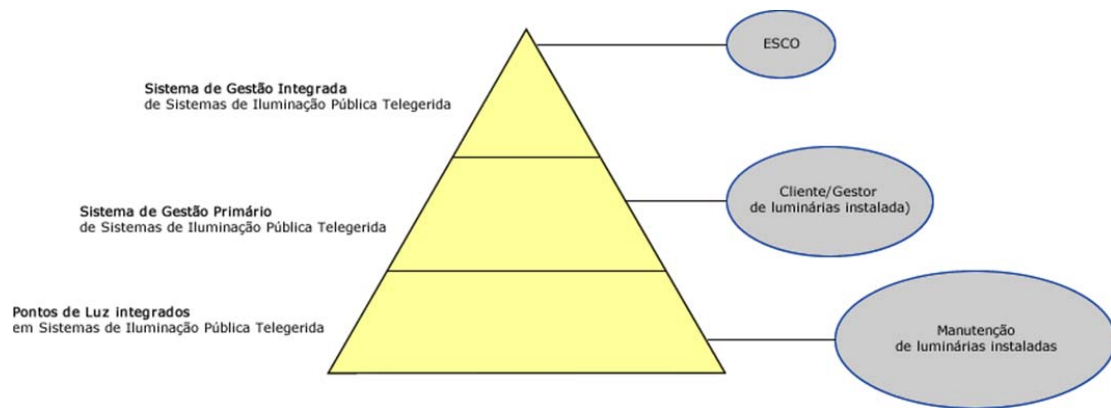


Figura 36 – Orgânica dos Sistemas de Gestão de Iluminação Telegeridos⁵⁶

Naturalmente, a filosofia do modelo apresentado tem que estar suportada por premissas que garantam o funcionamento capaz das luminárias que integra. Para tal, criou-se um modelo de dados (protótipo) que apenas pretende assumir-se como o primeiro passo na estruturação da informação a armazenar e que sirva de base à programação do sistema que será responsável por despoletar no sistema os comportamentos programados.

O modelo descrito na figura 39 carece de aperfeiçoamento, por exemplo, no que respeita aos tempos de acendimento de cada luminária. Contudo, este e outros aspetos serão definidos aquando da real implementação de um sistema de testes que irá refletir, naturalmente, a análise funcional que será feita oportunamente. Em resumo, o modelo de dados e toda a programação inerente será afinado de acordo com o estudo de um modelo real e da expectativa funcional que recaia sobre ele. No presente documento, mais do que estudar aprofundadamente o modelo funcional, interessa estudar a arquitetura do modelo e a sua aplicabilidade.

⁵⁶ Pode ser encontrada informação sobre ESCO (*Energy Service Companies*) em diversos sites. Destaco os seguintes endereços: <http://www.naesco.org> (EUA) e <http://www.managenergy.net/> (Europa)

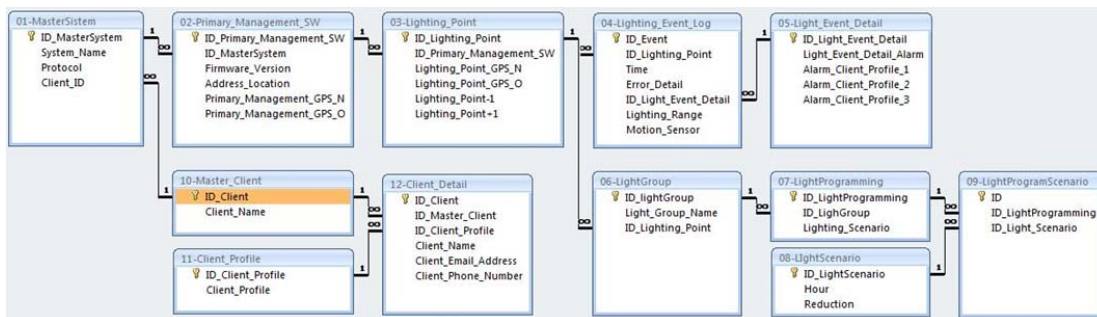


Figura 37 – Esboço do Modelo de Dados

Estruturalmente o sistema pode ser visto como uma série de camadas sobrepostas que operam em conjunto, de forma a permitir a execução do modelo proposto. A figura 40 é elucidativa desta perspectiva.

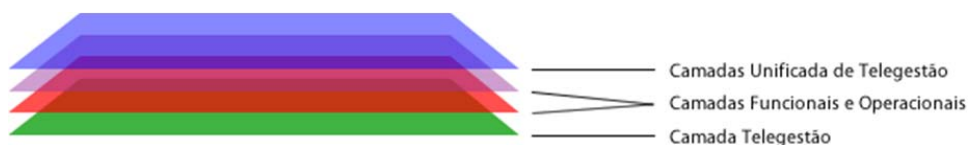


Figura 38 – Modelação em camadas do Modelo de Telegestão Integrada.

Relativamente ao funcionamento do sistema, ele pode ser visto segundo o fluxograma da figura 41. Não sendo detalhado, uma vez que não é esse o objetivo imediato, é possível identificar o comportamento operacional a ser implementado.

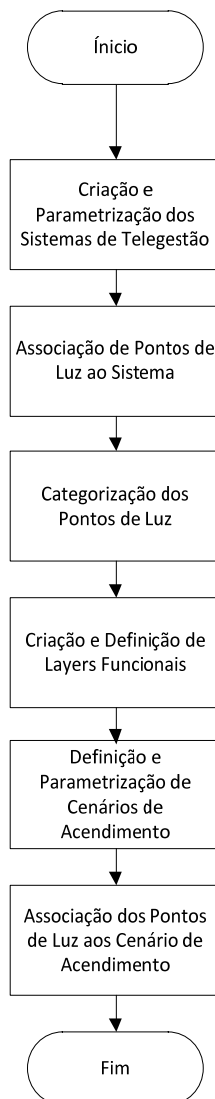


Figura 39 – Fluxograma Operacional do Sistema de Telegestão Integrado

A perspectiva operacional pode ser sucintamente descrita pelo fluxograma da figura 42.

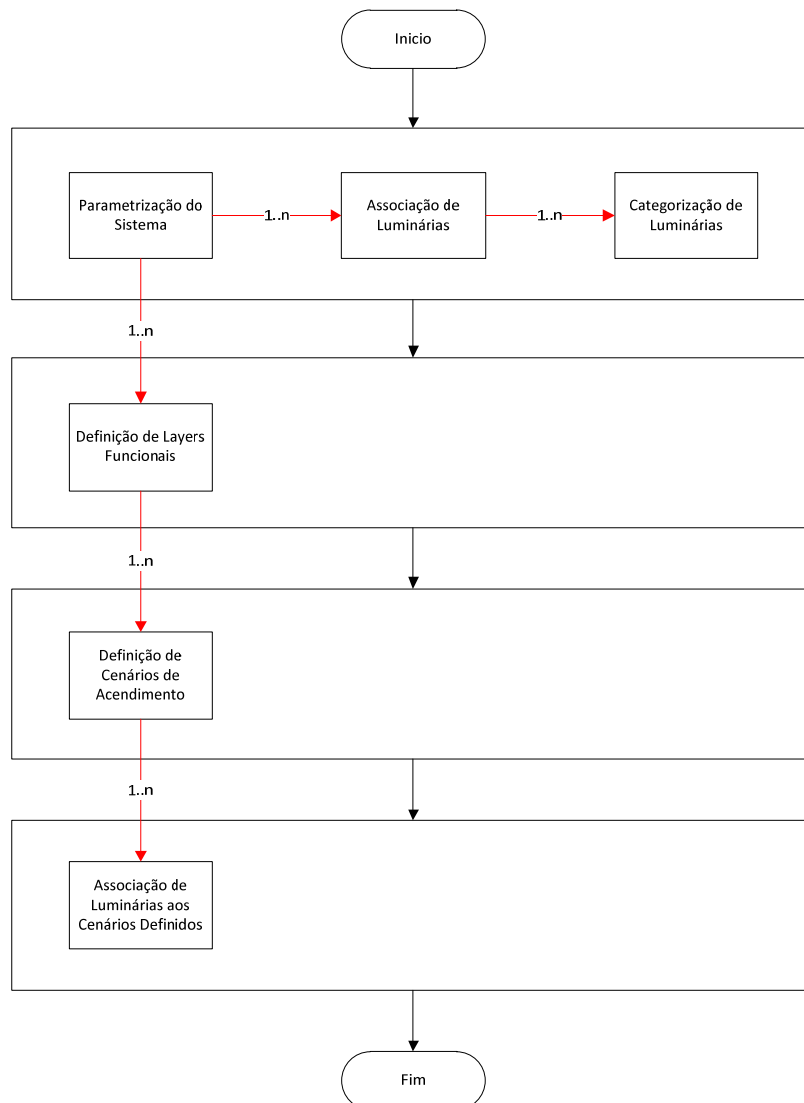


Figura 40 – Fluxograma Funcional do Sistema de Telegestão Integrado

A figura 42 pretende descrever de forma simplificada o procedimento operacional. O primeiro passo, consiste na parametrização de uma camada funcional dos sistemas envolvidos (eventualmente heterogéneos), na associação de luminárias e na categorização das luminárias de acordo com a sua especificidade tecnológica. Terminado o primeiro passo, serão definidas as camadas funcionais do sistema (sequências de acendimento de acordo com, por exemplo, o ordenamento e a sinalização viária). Este passo é seguido pela configuração dos cenários de iluminação (definição de fluxos de iluminação). Por fim, há necessidade de associar as luminárias ao cenário em que serão enquadradas.

4.3 Vantagens

As vantagens em recorrer a um sistema integrado de sistemas de telegestão são (entre outras) significativas e destacam-se as seguintes:

1. Existência de uma camada aplicacional simplificada;
2. Existência de uma camada aplicacional normalizada;
3. Ocultação ao cliente da complexidade de gestão inerente aos sistemas integrados;
4. Possibilidade de controlo do parque de iluminação telegerido de forma centralizada;
5. Capacidade de integrar sistemas que obedecem ao mesmo padrão tecnológico, mas que implicam gestão diferenciada;
6. Possibilidade de integrar sistemas que recorram a tecnologias distintas de comunicação com os pontos de luz;
7. Capacidade de desenhar uma rede “inteligente” que reaja a estímulos recebidos do meio envolvente de forma integrada;
8. Base de dados centralizada e capaz de facilitar a análise da informação recolhida dos vários sistemas;
9. Resiliência dos sistemas de telegestão não é afetada, em caso de falha, uma vez que esta plataforma não impede os sistemas de assumirem os comportamentos mínimos programados;
10. Conhecimento avançado e aprofundado sobre o parque de iluminação instalado;
11. Elevação a um nível de conhecimento avançado de uma área de importância vital e que até agora era gerida de forma reativa.

Tal como ilustrado pela figura 43 (demonstra o efeito de “*drill down*” que se pretende implementar), em que cada ponto de cor é sinónimo de um sistema de telegestão diferente, esconde-se do cliente final toda a complexidade tecnológica das soluções de telegestão implementadas. Desta forma, será apenas visível uma camada aplicacional com uma interface amigável que estará acessível através de várias plataformas e que lhe permitem interagir com o sistema de forma simples, rápida e intuitiva.



Figura 41 - Perspetiva do sistema integrador de sistemas de iluminação telegeridos

Numa realidade em que se pretenda o acompanhamento em tempo real das instalações sujeitas a telegestão munida de IA, será possível partir de uma visão macro e aprofundar a perspetiva de interação sobre o sistema. Consegue-se desta forma um detalhe de alarmística capaz de monitorizar individualmente cada unidade granular: a luminária.

Como pressuposto para a monitorização considera-se interessante que o acesso à plataforma de monitorização e operação seja agnóstico a plataformas de *software* (como sistemas operativos) ou de *hardware*.

5 Conclusão e Perspetivas Futuras

5.1 Conclusões

Após a realização do presente trabalho constata-se que os sistemas de iluminação telegeridos têm ainda muito para evoluir, nomeadamente no que concerne à capacidade de integração e unificação. Até hoje, com recurso a lâmpadas de descarga, dada a lentidão de reação das mesmas era virtualmente impossível fazer com que a iluminação tivesse comportamentos adaptativos ao meio envolvente. Ainda assim, foram desenvolvidas e comercializadas diversas soluções capazes de reduzir o custo energético das luminárias. Fruto da ansia por soluções mais eficientes e também da pressão tecnológica, a iluminação LED assume cada vez maior relevância.

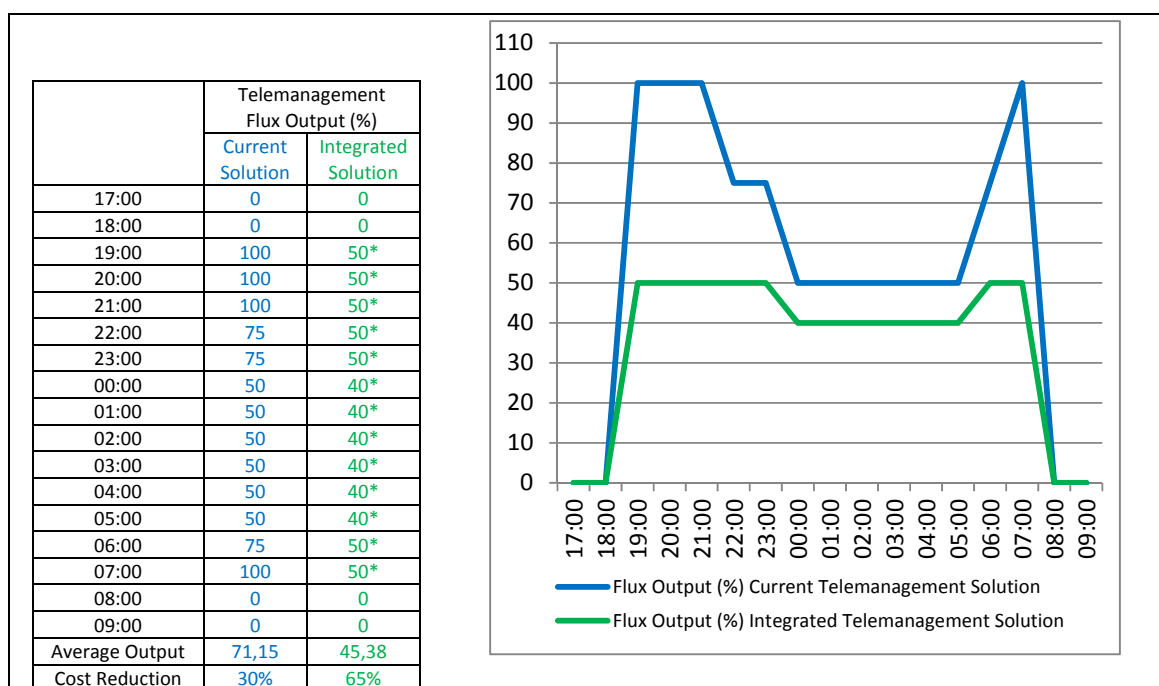
Para que assim seja, contribuem, entre muitos outros fatores, a disseminação tecnológica no fabrico, o aumento de qualidade, a redução do preço, a cada vez maior longevidade dos LED's, o menor consumo energético, a possibilidade de escolher com maior facilidade a temperatura de cor da luz emitida. Chegada esta nova era de iluminação, o novo paradigma foca-se no desígnio da rentabilidade extrema do investimento realizado. Atualmente, é cada vez mais aceite o paradigma que defende que iluminar bem não é necessariamente iluminar muito. É neste contexto, e a par de outros fatores, que os LED's e a telegestão ganham preponderância.

Com o modelo proposto, abre-se uma nova perspetiva e um novo entendimento sobre o comportamento que a Iluminação Pública pode desempenhar. Sem esquecer a importância que a redução de custos assume para as autarquias nacionais e sem questionar o valor das soluções atualmente disponíveis no mercado, o que se defende é uma nova abordagem. Pretende-se a unificação dos sistemas tendo como objetivo a implementação de soluções de iluminação inteligentes, auto adaptativas e em que a redução do consumo energético é elevado a um patamar que não ignora critérios de segurança. Muito pelo contrário: faz da segurança o pilar fundamental deste novo paradigma que é iluminar melhor e com maior eficiência. De acordo com o modelo apresentado, não será apenas a calendarização horaria a definir entre que horas é possível reduzir o consumo energético. Eleva-se o patamar de inteligência da

iluminação pública fazendo com que sejam atuados os pontos de luz necessários e de forma adaptativa ao meio envolvente. Passa a poder-se segmentar o comportamento da Iluminação Pública de forma diferenciada, o comportamento de um transeunte é necessariamente diferente do comportamento de um veículo. Sendo assim, porque devemos de nos satisfazer com o mesmo desempenho, no que concerne ao comportamento da iluminação pública?

A tabela 17 ilustra a poupança que este sistema é capaz de implementar. Ao invés de recorrer a calendarização de fluxo luminoso, poderá optar-se por um regime reduzido contínuo em que os picos de acendimento ocorrem em função da deteção de eventos e não com base na probabilidade ou perspectiva da ocorrência de fenómenos determinísticos como, por exemplo, arbitrar que depois das 00:00 o fluxo pode ser reduzido drasticamente, porque já há poucas pessoas na rua.

Tabela 17 - Projeção de redução de custos (comparação com soluções tradicionais)



Considerando a viabilidade e razoabilidade do presente modelo, é apresentado o detalhe da análise SWOT (tabela 18) onde são evidenciados fatores que demonstram a viabilidade e oportunidade para industrializar o modelo proposto no presente documento. Na realidade vivida atualmente, sendo a telegestão de sistemas de iluminação pública uma área carente de soluções capazes, diferenciadoras e

integradas, considera-se que o presente documento mais do que apontar lacunas, identifica soluções capazes de serem tornadas realidade.

Tabela 18 – Detalhe de análise SWOT

		Impacto no Negócio			Tendência		
		Elevado	Médio	Fraco	Subir	Manter	Descer
Pontos Fortes	Possibilidade de Evolução			X	X		
	Existência de Soluções			X		X	
	Capacidade Tecnológica		X			X	
Pontos Fracos	Soluções “estanque”			X		X	
	Decisão “política” em apostar em IA e integração de sistemas heterogéneos	X				X	
	Maturidade das tecnologias de suporte integradas nas actuais soluções			X		X	
Oportunidades	Conhecimento de mercado		X		X		
	Branding da marca “Schröder”		X		X		
	Visibilidade comercial das soluções instaladas	X			X		
	Concorrência “parada”			X		X	
Ameaças	Normalização de equipamentos			X	X		
	Soluções concorrentes “incapazes”			X	X		
	Mercado saturado de “más soluções”		X			X	

Fruto do trabalho desenvolvido, para que fosse possível apresentar o presente documento sem comprometer o eventual cariz inovador e inventivo do modelo apresentado, foi realizado o Pedido Provisório de Registo de Patente.

O perito do Instituto Nacional de Propriedade Industrial emitiu um relatório onde fez a primeira avaliação da matéria técnica tendo o cuidado de a comparar com o estado da técnica divulgado à data do pedido. O relatório emitido não tem carácter vinculativo uma vez que “a aferição da possível patenteabilidade só poderá ser feita aquando da análise do pedido definitivo em sede de exame de invenção”. São, contudo, identificados dois documentos que versam sobre temáticas próximas:

- CN 102076143 A (Telchinha Shandong Co LTD), 2011.05.25
- CN 102413605 A (Univ Soochow), 2012.04.11

Após avaliar os documentos em causa, acredita-se que a patenteabilidade do modelo alvo de PPP é válida, tendo apenas que ser defendida em sede de própria (exame de invenção aquando do pedido definitivo de patente).

5.2 Perspetivas futuras

O trabalho apresentado, apesar de toda a fundamentação que visa sustentá-lo, é ainda um passo embrionário para a solução defendida. No futuro, como em tantas áreas, ultrapassadas as questões “políticas” iniciais em que os “players” que dominam o mercado imergem, a dotação da iluminação pública de IA será uma realidade. Ainda que a dotação da iluminação pública de IA tarde, será uma inevitabilidade. Para além disso, há que perceber que as necessidades e especificidades da iluminação não se cingem à iluminação pública. Há muitos cenários onde a iluminação pode e deve ser considerada como algo crítico e que pode ser abordada à luz de um novo paradigma. A questão que deve ser colocada é simples e pode resumir-se a uma questão central: Será a noite e a iluminação artificial uma assunção dogmática em que a iluminação existe apenas para corrigir a falta de luz natural? Parece óbvio que a mesma abordagem (a mesma tida desde sempre) não poderá satisfazer todas as realidades. Provavelmente, nunca terá havido (pelo menos de forma recorrente e objetiva) a capacidade de pensar a iluminação de forma que transcenda a sua caracterização e os aspetos que lhe são inerentes (temperatura de cor, os tipos de lâmpadas, a inovação conseguida com os LED’s, os materiais de construção, etc.) . Será que a iluminação da rua de uma aldeia deve ser pensada da mesma forma que a rua de uma cidade? E um parque urbano quando comparado com uma zona industrial? E um porto de mar quando comparado com uma refinaria de produtos petrolíferos? Naturalmente, as questões que se colocam são imensas e de resposta complexa. Assim, a temática apresentada será abordada e aprofundada na prossecução da minha carreira académica.

6 Referências Bibliográficas

Ata Elahi, A. G. (2009). *ZigBee Wireless Sensor and Control Network*. Prentice Hall.

Box, H. C. (2010). *Set Lighting Technician's Handbook*. Focal Press.

Cimini, L. (1985). Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency. *IEEE Transaction Communications*.

Commission, I. E. (s.d.). *International Electrotechnical Commission*. Obtido de International Electrotechnical Commission: <http://www.iec.ch/>

DALI. (s.d.). *DALI*. Obtido de DALI: <http://dali-ag.org/>

Dostert, K. (2001). *Powerline Communications*. Prentice Hall.

E. Stroem, T. O. (2002). *An Introduction to Spread Spectrum Systems*. Gotemburgo, Suécia: Department of Signals and Systems, Chalmers University of technology.

Federal Information Processing Standards Publication . (2001). Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES). *Federal Information Processing Standards Publications (FIPS PUBS)*, 51.

Ferreira, H. C., Lampe, L., Newbury, J., & Swart, T. (2010). *Power Line Communications*. Wiley.

Future, L. L. (2012). *LED Lighting*. O'Reilly - Maker Press.

Graves, H., & Ticleanu, C. (2011). *LED Lighting: A Review of the Current Market and Future Developments*. bre press.

- Hrasnica, H., Haidine, A., & Lehnert, R. (2004). *Broadband Powerline Communications Networks*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- I. Chlamtac, A. F. (1997). Time-spread multiple-access (TSMA) protocols for multihop. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(6), 804-812.
- IEC. (2001). Electromagnetic Compatibility: The role and Contribution of IEC Standards. *International Electrotechnical Commission, Lists of EMC Publications in IEC*.
- K. David, T. B. (1996). *Digitale Mobilfunksysteme*. Estugarda, Alemanha: B.G. Teubner.
- Koch, C., & Segev, I. (2012). *Methods in Neuronal Modeling: From Ions to Networks*. MIT Press.
- Lenk, R., & Lenk, C. (2011). *Practical Lighting Design with LEDs*. IEEE Press.
- Lindner, J. (Julho-Agosto de 1999). MC-CDMA in the Context of General Multiuser/ Multisubchannel Transmission Methods. *Emerging Telecommunications Technologies*, 10(4), 351-367.
- M. Moeneclaey, M. V. (Março de 2001). Sensitivity of multiple-access techniques to narrowband. *IEEE Transactions on Communications*, 49(3), 497-505.
- M. Schnell, I. D. (1999). A promising new wideband multiple-access scheme for. *ETT*, 10(4), 417-425.
- M. Zimmermann, K. D. (2000). *The low voltage distribution network as last mile access network - sinal propagation and noise scenario in the HF range*. AEÜ International Journal of Electronics and Communications.
- Norvig, S. J. (2003). *Artificial Intelligence*. New Jersey: Prentice Hall.

Organization, Z. S. (2008). *ZigBee Specification*. ZigBee Standards Organization.

Owlet. (s.d.). *Owlet*. Obtido de <http://owlet-streetlight.de/en/>.

Philipps, H. (2000). *Development of a statistical model for powerline communications channels*. Limerick, Ireland: ISPLC.

Porter, M. (1998). *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. New York: The Free Press.

Prasad, R. (1998). *Universal Wireless Personal Communications*. Boston, London: Artech House.

R. van Nee, R. P. (2000). *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Boston, Londres: Artech House Publishers.

Reverberi. (s.d.). *Reverberi*. Obtido de Reverberi: <http://www.reverberi.it/>

Rodrigues, M. R. (2002). *Modelling and Performance Assessment of OFDM Communication Systems; PhD Thesis, Department of Electronic and Electrical*. London: University College.

Rose, M. T. (1990). *A Practical Perspective on Osi* . Prentice Hall.

Sogexi. (s.d.). *Sogexi*. Obtido de <http://www.sogexi.fr/>.

T.C. Banwell, S. G. (2001). A new approach to the modelling of the transfer function of the power line channel. *Proceedings of the 5th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*. Malmö.

The Nobel Foundation. (s.d.). *Nobelprize*. Obtido de Nobelprize.org:
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1909/marconi-bio.html

Verlag, R. P. (2001). *DALI AG (Digital Addressable Lighting Interface Activity Group) of ZVEI, Division Luminaires*. Frankfurt: AG DALI.

Vossloh-Schwabe. (s.d.). *Vossloh-Schwabe*. Obtido de <http://www.vossloh-schwabe.com/en/home.html>.

Walke, B. H. (1999). *Mobile Radio Networks - Networking and Protocols*. Chichester, UK, England: John Wiley & Sons Ltd.

Wong, T. F. (2002). *Spread Spectrum and Code Division Multiple Access: Introduction to Spread spectrum*. Electrical and Computer Engineering, University of Florida. Obtido de Electrical and Computer Engineering, University of Florida: <http://www.wireless.ece.ufl.edu/eel6503/>

Ye Li, N. R. (Dezembro de 2001). Clustered OFDM with channel estimation for high rate wireless data. *IEEE Transactions on Communications*, 49(12), 2071–2076.

Apêndice A – 1-10V

É um sistema de controlo de sinalização usado em sistemas de iluminação que recorrem a controladores eletrónicos (Box, 2010). Estes dispositivos são alimentados por corrente contínua (DC)⁵⁷ havendo para efeitos de redução de fluxo um cabo que faz o controlo do sinal e que faz variar a tensão (volts) entre 0 e 10. Quando o sinal passado pelo controlador é de 10V o equipamento de iluminação gera o fluxo luminoso máximo. Quando o sinal é de 0V, o equipamento desliga-se. Os dispositivos sujeitos a dimming estão concebidos para responder a variações de tensão entre 0 e 10V pelo que dão resposta linear a outputs como a tensão, a intensidade de corrente e o fluxo luminoso.

Na maioria dos casos, a variação de tensão na fonte de alimentação ou no balastro é limitada. Assim, a redução de fluxo luminoso consegue fazer-se até o limite de 90 %. Quando este valor é atingido, o equipamento socorre-se de um interruptor que provoca o corte de corrente e, conseqüentemente, o apagamento do equipamento.

A principal vantagem deste sistema reside no facto de ser simples de implementar e de diagnosticar em caso de anomalia. Tem também a vantagem de, em virtude de usar correntes baixas (tipicamente 1 mA), recorrer a cabos de baixa espessura sem que haja quebras de tensão significativas.

No que respeita a desvantagens, há que referir o facto de ser necessário um cabo de sinalização por dispositivo controlado (por canal de controlo, para ser mais exato) e um segundo cabo para o sinal de retorno, o que faz com que controlar sistemas com muitas luminárias possa ser difícil de gerir, em virtude da quantidade de cabos usados. Há ainda a limitação da distancia que influi na queda de tensão mas que pode ser combatida com o aumento da espessura do cabo⁵⁸ ou com a calibração do dispositivo de receção do sinal para compensar a atenuação do sinal. Como desvantagem há também a possibilidade de o sinal de tensão emitido ser afetado por interferências provocadas pela corrente (campos eletromagnéticos que podem inclusive ser gerados pelos cabos de tensão que alimentam a própria luminária) que se poderão manifestar através de efeitos de flicking na fonte emissora de luz.

⁵⁷ Direct Current

⁵⁸ Esta limitação assenta no pressuposto teórico de que um cabo fino tem a resistência de 20Ω por cada 1000 metros.

Apêndice B - DALI

DALI (DALI)(Digital Addressable Lighting Interface) é o standard⁵⁹ desenhado para controlo de iluminação aplicada a edifícios numa perspetiva de rede e que se afigura como sendo o sucessor dos sistemas 1-10V.

A rede DALI consiste num controlador que tem ligado a si diversos equipamentos de iluminação. A monitorização assenta na comunicação feita com os diversos equipamentos que é feita de forma bidirecional, de forma assíncrona em half-duplex através de um barramento que recorre a dois fios distintos e com a velocidade máxima de 1200 bps. É possível endereçar individualmente cada um dos dispositivos mas pode também ser feito broadcast da comunicação. O controlador consegue endereçar 64 dispositivos⁶⁰ pelo que cada dispositivo de iluminação tem um endereço numérico que varia entre 0 e 63. A topologia de rede de uma instalação DALI é, por norma, em estrela ou bus sendo a comunicação conseguida com recurso a um par de cabos. É de referir que não sendo um sistema classificado como SELV (Separated Extra Low Voltage) não é afetado pela proximidade de cabos de transporte de corrente elétrica. Os dados transmitidos obedecem à codificação manchester⁶¹, de forma a aumentar a tolerância a erros induzidos por ruído de origem elétrica. Outra vantagem deste sistema reside na incorporação de um díodo no circuito de interface e que permite que o dispositivo seja ligado desprezando a polaridade. Do ponto de vista elétrico apresenta como características a variação de sinal entre $0 \pm 4.5V$ para “0” e entre $16 \pm 6.5V$ para “1”. A intensidade máxima de corrente é de 250mA sendo o cabo de rede isolado para 600V e de diâmetro nunca inferior a 1mm e tendo como extensão máxima 300m com a queda máxima admitida de 2V. Apresenta ainda o interface de sinal separado galvanicamente, razão pela qual dispensa resistores terminadores. As primeiras gerações de dispositivos DALI recorrem a EEPROMs para armazenarem as configurações, contudo, pelo limite de ciclos de escrita têm vindo a ser substituídas por RAM, ainda que esta tecnologia obrigue ao pagamento acessório de licenciamento. O dimming é

⁵⁹ Sustentado pelas normas IEC 60929 e IEC 62386. A norma IEC 60929 é a primeira versão da norma e tem revisão agendada para 23 de Junho de 2014.

⁶⁰ A quantidade de endereços ser maximizada com recurso a Gateways

⁶¹ Codificação também conhecida como Phase Encoding que promove a tolerância a erros através da introdução de um bit de transição entre cada bit da dados transmitido.

conseguido com recurso a um algoritmo adaptado à sensibilidade ocular que garante níveis uniformes, ainda que os equipamentos sejam de fabricantes distintos.

As imagens que apresento foram retiradas de (Verlag, 2001)

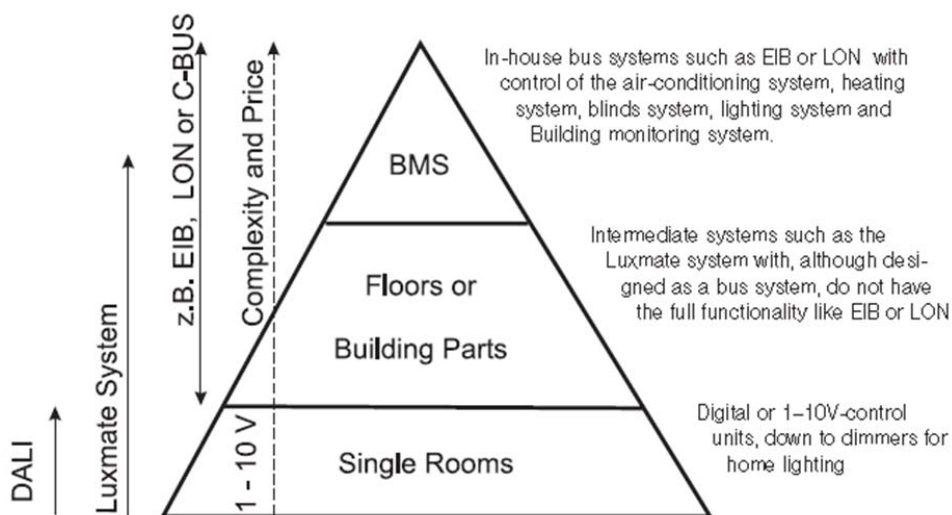


Figura 42 - Dali aplicado a Building Management Systems

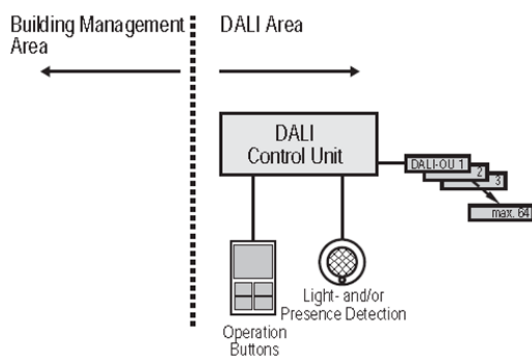


Figura 43 - Sistema Dali (sistema stand-alone)

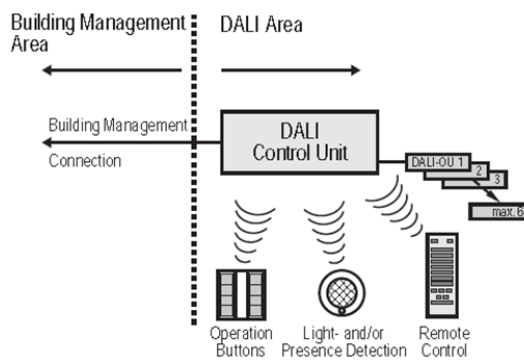


Figura 44 - Sistema Dali (Subsistema stand-alone)

Apêndice C – DMX

DMX (Lenk & Lenk, 2011) é um protocolo digital a que se recorre para controlar e desencadear efeitos de iluminação em aplicações profissionais. A área em que tem maior aplicabilidade é no mundo do espetáculo.

Ao contrário de um sistema tradicional em que os sistemas de iluminação são desligados através da corte de corrente e ligados através do fornecimento de corrente elétrica, os equipamentos sujeitos a este protocolo são ligados e desligados com recurso a uma consola que gere os equipamentos que lhe estão associados através de comandos específicos.

Ao contrário de outros protocolos, é possível endereçar diversos equipamentos recorrendo apenas a um cabo de envio de sinal. Este cabo é composto por dois condutores e uma malha que funciona como shield. Os sinais transportados têm entre 120 e 150 Ω .

Uma vez que o protocolo pressupõe o uso de um único cabo para atuar diversos equipamentos, para que seja possível enviar sinais com destinatários distintos atribui-se a cada equipamento canais dedicados. Este protocolo consegue gerir 512 endereços por canal sendo que cada equipamento pode ter associados diversos canais, consoante os comportamentos que é capaz de desempenhar. A título de exemplo, uma máquina de fumos precisa apenas de um canal por onde lhe é ordenado que se ative. No caso de uma luz de acendimento e apagamento rápido (strobe) são necessários 3 canais: um para o brilho da lâmpada, outro para a velocidade do flash e um terceiro para a duração do flash.

O DMX distingue-se dos sistemas analógicos de controlo pelo facto de usar um barramento comum para a comunicação com os dispositivos. Se assim não fosse, seria necessário um cabo de comunicação com cada dispositivo sujeito a controlo.

De referir que a comunicação sendo digital obedece a variações de 0 e 1 sendo a comunicação agrupada em 8 bits (o que perfaz 256 combinações distintas).

De referir que o endereçamento dos equipamentos pode ser estático (recurso a DIP Switch ou dinâmico)

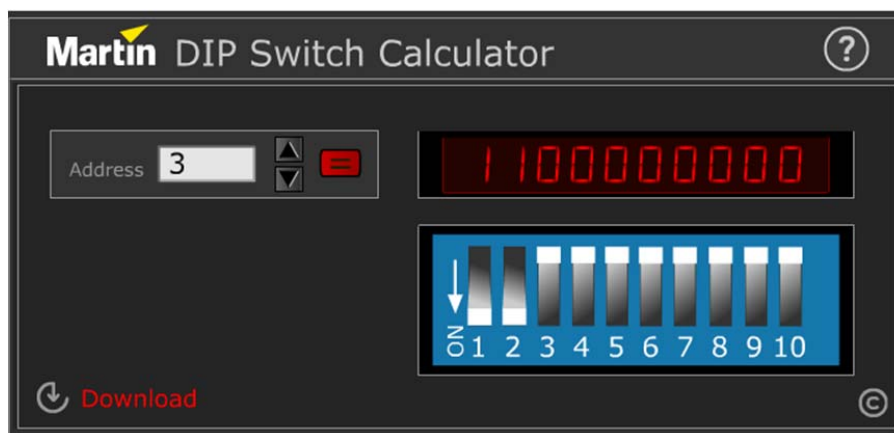


Figura 45 - Calculador de endereçamento DIP Switch

Outra característica do DMX é que o protocolo não pressupõe a recepção de feedback por parte dos equipamentos da rede. Desta forma, o sinal é enviado e não há informação de retorno que permita aferir do desempenho do equipamento.

A distância máxima que a comunicação com recurso a DMX pressupõe é de 910m. A título de curiosidade a modelação do sinal transmitido é feita com recurso a FHSS pois desta forma evita-se o conflito com outras frequências rádio.

Apêndice D – Tipificação de equipamentos de iluminação pública

Tabela 19 - Tipificação de Luminárias para Iluminação Pública

Tipificação de Luminárias para Iluminação Pública									
Equipamentos de Iluminação	Fonte de Luz	Tipo de Balastos/Driver	Modelo Balastro/Driver	Tipo de Lâmpada	Fluxo Mínimo	Protocolo DMX	Protocolo DALI	Protocolo 1-10V	Protocolo Dynadimmer
Luminárias	Descarga	Electrónico	Xitanium	CDOTT	50 %	Não	Sim	Sim	Sim
				SAP	30 %	Não	Sim	Sim	Sim
				CPO	60 %	Não	Sim	Sim	Sim
		Ferromagnético	Tecnologia em Descontinuidade						
	LED	Electrónico	Xitanium Xtreme	LED	10 %	Não	Sim	Sim	Sim



Figura 46 - Componentes de Sistema de Iluminação Pública

Anexo A – LonWorks Protocol

Retirado de <http://www.echelon.com/technology/lonworks/lonworks-protocol.htm>

The LonWorks® protocol provides services at each layer of the OSI seven layer reference model.

The protocol is open for anyone to implement, and a reference implementation in the C programming language can be obtained from CEA. Since its invention, the protocol has become an ANSI standard, an IEC standard, a Chinese national standard, and recently has achieved ISO standardization.

Layer 1: Physical Layer

At Layer 1, multiple physical links are supported such as RS-485; our free-topology (FT) and power line (PLC) transceivers; and third-party wired, wireless, and fiber transceivers.

Layer 2: Link Layer – MAC Algorithm

At the Link Layer, Layer 2 of the OSI model, the LonWorks protocol provides an innovative independent media access control (MAC) layer based on improvements made to the Carrier Sense Multiple Access (CSMA) family after Ethernet was standardized. The MAC layer combines two concepts: p-persistent CSMA and non-persistent CSMA.

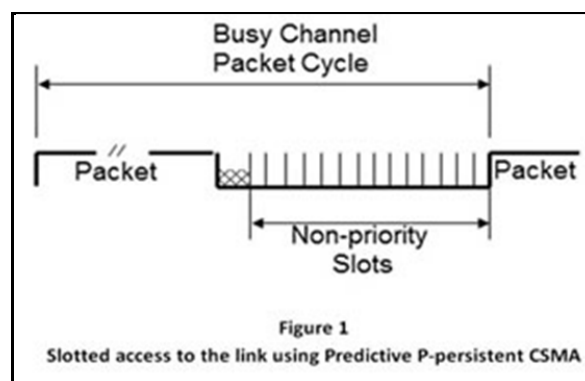
P-Persistent CSMA. In P-persistent CSMA, access to the link is slotted, and the transmitting station accesses the link with probability P, so for example, in a 0.1 persistent CSMA link, there would be 10 slots and access to the link would be randomized such that the probability of transmitting through any one of those slots is 10 percent.

Thus, the smaller the number P, the more slots there are for a station to randomize link access. Having a very large number of slots reduces the probability of collision because the chance that any two stations would pick the same slot to transmit is reduced. The drawback in having many slots is, in an idle network, the average delay to send a message is the number of slots divided by two. Ideally, randomized access to the link would be over a small number of slots when there are only a few stations waiting to transmit, and when many stations have a message to send, they would randomize access over many slots. P-persistent CSMA doesn't solve the delay problem by itself.

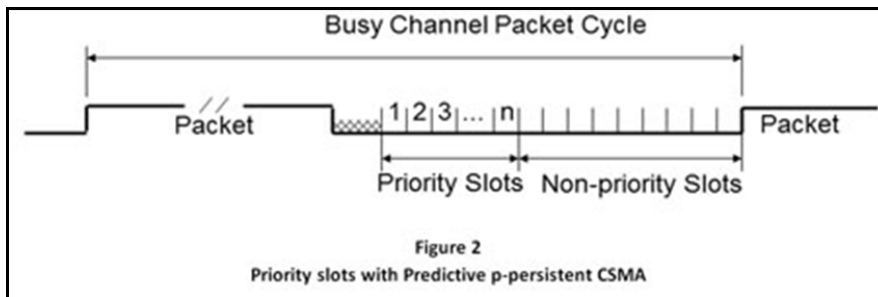
Non-persistent CSMA. With non-persistent CSMA, whenever a station has a message to send, it randomizes its access rather than immediately transmitting. This technique prevents multiple stations that respond to a single event from causing packet collisions.

Non-persistent CSMA is very useful for networks that have bursts of packet traffic, and many control networks have this characteristic. Other characteristics of networked control systems are that, often, when a station sends a message, it must receive a response or an acknowledgment, and this multicasting of information is often used. For example, a node with a temperature reading may need to share it with multiple nodes simultaneously. Multicasting is the most efficient way to do this. If multicasts need a response or are unacknowledged, more than half the packets on the link are predictable because each packet generates at least one and sometimes more responses.

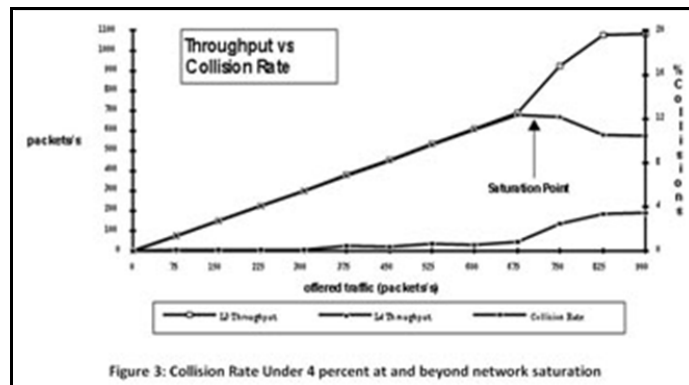
Predictive p-persistent CSMA. To support prioritized access to the link when the network is congested, some number of randomizing slots may be assigned to individual stations for their exclusive use. In this way, a station with the MAC priority privilege may use the dedicated slot and avoid all link access contention. Figure 1 shows the slotted access protocol. Figure 2 shows the use of dedicated priority slots after each packet to ensure that critical stations have access to the link without packet contention.



Using Predictive CSMA, when a station sends a message, the number of response packets the message will generate is encoded in the packet's Layer 2 header. This is called the link backlog increment. The number of packets that will be sent in response to an initial message is known by the sender because it must keep track of responses so it knows when to stop retransmitting. All the nodes on the link receive all the packets and examine the Layer 2 header to see what the increment of the link backlog is. They use this running backlog to adjust the number of slots they randomize for their own link access. So the backlog is dynamically increased when there is more traffic, and it decays over time as traffic recedes.



In this way, the LonWorks protocol dynamically adjusts the number of randomizing slots based on the known future. The protocol's MAC algorithm for a peer-to-peer network has been shown empirically to use link bandwidth up to 80 percent of its theoretical maximum with the collision rate of fewer than 4 percent. It is very efficient and requires minimal state, no knowledge of the number of stations on the link, and no collision detection hardware.



Traffic versus delay illustrating the power of Predictive P-Persistent CSMA to avoid collisions even during network overload.

Layer 2: Link Layer – Bit Encoding

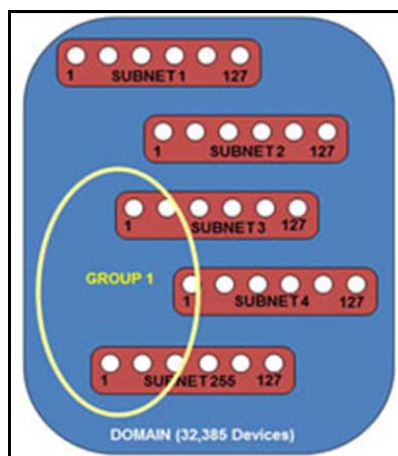
Beside the MAC algorithm, Layer 2 provides bit encoding and a 16-bit cyclic redundancy check (CRC). The CRC is the CCITT CRC-16 standard. Bit encoding is bi-phase space encoding. This is a variant of differential Manchester encoding that provides polarity insensitivity when communicating on twisted-pair wires. An installer need not be concerned about which of the two wires to connect to which of the two terminals.

Layer 3: Network Layer

Layer 3, the Network Layer, provides addressing. In the LonWorks protocol, addressing is hierarchical, starting with the node's domain and followed by its subnet and identification number, each expressed in eight bits. Alternatively, a node may have membership in multiple multicast groups, with each group address encoded as a single byte. A domain can include up to 256 multicast groups, as well as 255 subnets, each having a maximum of 127 nodes. To save bandwidth, a domain's address may be encoded as zero in length, as a single byte, three bytes, or to ensure uniqueness, six bytes. This simple addressing design permits very simple routing of packets across multiple links. The routing tables are quite small, with, for example, an array of 256 bits determining whether a message should pass across the router to a given subnet, or whether a member of a particular group is on the other side of the router.

Layer 4: Transport Layer

Layer 4, the Transport product protocol layer, is where packet retransmission and duplicate detection is handled. When the station sends a packet, it specifies whether the packet is sent using unreliable or reliable services. Unreliable services include unacknowledged services, and unacknowledged but repeated services. Reliable services are confirmed with an acknowledgment or response. The protocol supports reliable unicast as well as multicast, making it transparent to the application whether its information is being sent to one or more stations. For every packet, the number of retries, the time between retries, and the total transaction time on the receiver's side are configurable. This allows transactions to either fail or succeed within a bounded time, meeting the application response time requirements.



Layer 5: Session Layer

Layer 5, the Session Layer, is where request response services are handled. Besides sending a response, the protocol saves it, so that if a retry comes along, the response can be resent without the application needing to re-compute and retransmit.

Layer 6: Presentation Layer

Layer 6, the Presentation Layer, is used with Echelon's publisher-subscriber data model. The Presentation Layer header encodes the semantics of data passed in the Application Layer. It also carries the identifier of data items.

Layer 7: Application Layer

Layer 7, the Application Layer, provides data called network variables. Network variables are application specific data types that contain semantics beyond float, integer, and Boolean. Examples might be a temperature in degrees Celsius with high and low limits defined as well as a value defined as valid or not. Network variable outputs on one node may be bound to network variable inputs on other nodes, provided that the data types between the output of one and input of others are in agreement.

When the control program modifies one of its network variable outputs the LonWorks protocol intercepts that modification and sends the new value to any subscribers of that value. The subscribers see that their input network variable of the same type as the sender's output network variable has a new value. This data-driven control model using complex data types with rich semantics supports sophisticated control scenarios that do not depend on agreement for command types and command syntax.

In Layer 7, the protocol also provides for node discovery, and even more importantly, their logical interfaces, the network variables and functional profiles that each supports, their possible provisioning, and other information to allow each to be easily integrated into a control system.

Automatic discovery of nodes and their network interfaces enables highly efficient installation and network provisioning that reduces network installation time and lowers the total cost of the system.

Finally, Layer 7 supports a standard way to upgrade node software, so the system can evolve in response to changing needs