



Mestrado em Engenharia Eletromecânica

Avaliação de Medidas de Iluminação Eficiente em Edifícios Industriais

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletromecânica
Especialização em Instalações e Equipamentos em Edifícios

Autor

Hugo Filipe de Figueiredo Cardoso

Orientador

Doutora Dulce Helena de Carvalho Coelho

Professora do Departamento Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Doutora Carla Margarida Saraiva de Oliveira Henriques

Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Coimbra

Coimbra, março, 2017

AGRADECIMENTOS

Depois de dois anos decorridos, fico contente pelo trabalho desenvolvido e pelo esforço imposto pelo Mestrado, que me permitiu voltar a desafios exigentes...

Desde já agradeço toda a orientação, dedicação e esforço realizado pelas orientadoras Doutora Dulce Coelho e Doutora Carla Henriques no sentido de atingirmos o objetivo proposto e criarmos uma “equipa” de trabalho.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente foram afetadas pelo tempo por mim despendido na realização do projeto.

À família, claro, por estarem sempre disponíveis para tudo o que preciso.

Às minhas duas mulheres, Joana e Laura, obrigado pela disponibilidade e apoio demonstrado durante todo este processo, garantindo-me todo o tempo e espaço necessário.

Por fim, quero deixar uma nota especial há minha mulher, companheira e amiga por tudo que temos conseguido e por mais um desafio superado em conjunto.

Obrigado por estares sempre aqui...

RESUMO

O apoio às políticas de eficiência energética pode ser visto como uma forma eficaz para a redução do consumo de energia e dos gases com efeito de estufa, ao mesmo tempo que fornece serviços de energia mais económicos em diferentes sectores de atividade.

O setor industrial é particularmente relevante e um dos setores abordados no Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética, através do programa Sistema de Eficiência Energética para a Indústria. As medidas transversais previstas para este sector continuam a desempenhar um papel importante em termos de eficiência nos processos industriais, incluindo a iluminação.

O uso de sistemas de iluminação adequados em instalações industriais, que proporcionem níveis adequados de iluminação ajustados às tarefas realizadas, permitirá maior conforto visual e garantirá a máxima segurança, evitando erros e interrupções nas linhas de produção. Por outro lado, os sistemas de iluminação devem ser flexíveis, expansíveis e facilmente controláveis e manipuláveis. Além disso, a seleção de um sistema de iluminação eficiente deve ter em consideração os impactos económicos, nomeadamente os custos de exploração e manutenção da instalação e os impactos ambientais resultantes do menor consumo de energia e do menor número de equipamentos utilizados.

Embora haja uma consciência pública dos impactos positivos das melhorias do desempenho energético nas instalações industriais existentes, não existem na literatura muitos estudos que abordem de forma abrangente esta questão e, em particular, estudos centrados na avaliação de sistemas de iluminação eficientes.

Neste contexto, o principal objetivo deste estudo é a avaliação de medidas de eficiência energética que possam ser implementadas em sistemas de iluminação de edifícios industriais, tendo em consideração múltiplos aspetos de avaliação (técnicos, económicos, ambientais e sociais).

Palavras-Chave: Edifícios industriais, Eficiência energética, Indicadores económico-financeiros, Sistemas de iluminação eficientes.

ABSTRACT

The support of energy efficiency policies can be seen as a cost-effective driver of energy consumption and greenhouse gas reduction, while providing economical energy services in different activity sectors.

The industrial sector is particularly relevant and addressed in the Portuguese Energy Efficiency Action Plan (NEEAP) in a programme entitled Energy Efficiency System for Industry. The transversal measures accounted for in this sector continue to play an important role in terms of efficiency in industrial processes, including lighting.

The use of adequate lighting systems in industrial facilities, which provide appropriate lighting levels suitable to the tasks performed, will allow greater visual comfort and ensure maximum safety, avoiding errors and interruptions in production lines. On the other hand, lighting systems must be flexible, expandable and easily controlled and handled. In addition, the selection of an efficient lighting system should take into account the economic impacts, in particular the operating and maintenance costs of the installation, and the environmental impacts resulting from lower energy consumption and the lower number of equipment used.

Although there is public awareness of the positive impacts of energy performance improvements in the existing industrial facilities, there is limited published literature which comprehensively addresses this issue and, in particular, studies focusing on the assessment of efficient lighting systems.

In this context, the main objective of this study is to evaluate energy efficiency measures that can be implemented in lighting systems of industrial buildings, taking into account multiple aspects of evaluation (technical, economic, environmental and social).

Keywords: Efficient lighting systems, Energy efficiency, Financial economic indicators, Industrial buildings.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos do Projeto.....	3
1.3. Estrutura do Relatório	4
2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA	7
2.1. Enquadramento Geral.....	7
2.2. Enquadramento Legislativo.....	10
2.3. PNAEE 2016	11
2.4. Iluminação Eficiente na Indústria - Boas práticas.....	14
3. ILUMINAÇÃO	19
3.1. Enquadramento.....	19
3.2. Iluminação e Produtividade.....	21
3.3. Qualidade da Iluminação.....	22
3.4. Conceção Prática dos Sistemas de Iluminação	26
3.5. Eficiência Energética na Iluminação.....	35
3.6. Tecnologias de Iluminação.....	36
3.7. Enquadramento Legislativo e Normativo	39
4. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS EFICIENTES DE ILUMINAÇÃO EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS	41
4.1. Enquadramento das Soluções Globais Existentes e Propostas.....	41
4.2. Caracterização Geral das Indústrias	44
4.3. Caracterização das Soluções Globais Existentes	47
4.3.1 Número Total de Lâmpadas	47
4.3.2 Potência Total Instalada.....	49
4.3.3 Custo Anual de Energia.....	49
4.4. Caracterização das Soluções Globais Propostas	50
4.4.1 Número Total de Lâmpadas por Tecnologia	50
4.4.2 Potência Total Instalada.....	52
4.4.3 Custo Anual de Energia.....	52
4.5. Avaliação das Medidas de Iluminação Eficiente	53
4.5.1 Avaliação Técnica	53
4.5.1.1 Consumo Anual de Energia.....	54

4.5.1.2	Número Total de Lâmpadas	56
4.5.1.3	Potência Total Instalada	56
4.5.2	Avaliação Económica	57
4.5.2.1	Custo Anual de Energia.....	58
4.5.2.2	Custo Anual de Manutenção	58
4.5.2.3	Investimento Total.....	59
4.5.2.4	Payback Simples	60
4.5.2.5	Valor Atual Líquido	61
4.5.2.6	Taxa Interna de Rentabilidade.....	63
4.5.2.7	Savings to Invest Ratio (Rácio entre poupança e investimento).....	64
4.5.3	Avaliação Ambiental	66
4.5.3.1	Emissões de CO2	66
4.5.4	Avaliação Social	67
4.5.4.1	Aceitação da Solução	67
5.	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1– Consumo total de energia final na indústria (DGEG, 2014a).....	1
Figura 3.1 – Consumo global de eletricidade em iluminação por setor de utilização (IEA, 2006).	20
Figura 3.2 – Strategic Roadmap 2015 da LightingEurope (LE, 2016).	21
Figura 3.3 – Requisitos de qualidade de iluminação (adotado de Licht, 2016c).....	23
Figura 3.4 – Elementos a considerar num projeto de sistema de iluminação (LE, 2016a).	26
Figura 3.5 – Potenciais poupanças em função do tipo de sistema de controlo a instalar na iluminação interior (Licht, 2016c).	31
Figura 3.6 – Áreas de tarefa, de trabalho e envolvente (Licht, 2016d).	32
Figura 3.7 – Custos num sistema de iluminação (adotado de Licht, 2016a).....	34
Figura 3.8 – Oportunidades de eficiência energética na iluminação (adotado de ACEEE, 2010).	35
Figura 3.9 – Tecnologias de iluminação (baseado em CEIC, 2011).....	36
Figura 3.10 – Eficácia das diferentes tecnologias (Simonson, 2012).....	37
Figura 4.1 – Esquema exemplificativo das indústrias avaliadas.	42
Figura 4.2 – Número total de indústrias avaliadas por ano.	44
Figura 4.3 – Número total de indústrias por setor de atividade.	45
Figura 4.4 – Número total de lâmpadas por tecnologia nas soluções existentes.....	47
Figura 4.5 – Percentagem total de lâmpadas por tecnologia e por setor de atividade.....	48
Figura 4.6 – Potência total instalada [W] por solução existente.	49
Figura 4.7 – Custo anual de energia [€/ano] por solução existente.....	50
Figura 4.8 – Número total de lâmpadas das soluções propostas por tecnologia.	51
Figura 4.9 – Percentagem total de lâmpadas das soluções propostas por tecnologia e por ano de referência.....	51
Figura 4.10 – Potência total instalada [W] por solução proposta.....	52
Figura 4.11 – Custo anual de energia [€/ano] por solução proposta.	53
Figura 4.12 – Redução do consumo anual de energia [kWh/ano] por solução proposta.	54
Figura 4.13 – Percentagem de redução total do consumo [kWh/ano] por solução proposta e por setor de atividade.....	55
Figura 4.14 – Redução do número de lâmpadas por solução.....	56
Figura 4.15 – Percentagem de redução de potência total por solução proposta.....	57
Figura 4.16 – Redução do custo anual de energia [€/ano] por solução proposta.	58
Figura 4.17 - Poupança anual de manutenção [€/ano] por solução.....	59
Figura 4.18 – Investimento total [€] por solução	60
Figura 4.19 – <i>Payback</i> simples e vida útil [anos] por solução proposta.	61
Figura 4.20 – VAL com taxas de atualização de 2% e 5% [€] por solução proposta.	62
Figura 4.21 – TIR [%] por solução proposta.....	63
Figura 4.22 – SIR com taxas de atualização de 2% e 5% por solução proposta.	64
Figura 4.23 – Indicadores económico-financeiros obtidos para as soluções com o maior e o pior SIR	65

Figura 4.24 – Redução total de CO₂ [kgCO₂/ano] por solução proposta. 66
Figura 4.25 – Avaliação das soluções globais propostas em função da aceitação social..... 68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estratégias Energéticas Europeias.....	8
Tabela 2.2 – Objetivos da ENE 2020 (adotado de EFINERG, 2015).....	9
Tabela 2.3 – Definição dos eixos da ENE 2020 (adotado de EFINERG, 2015).....	9
Tabela 2.4 – Legislação nacional referente à eficiência energética.....	10
Tabela 2.5 – Áreas e programas do PNAEE 2016 (RCM, 2013).....	11
Tabela 2.6 – Impactos do PNAEE 2016 por área (RCM, 2013).....	12
Tabela 2.7 – Medidas transversais – Setor Industrial (RCM, 2013).....	13
Tabela 3.1 – Exemplo de alguns valores de UGR em função da atividade.....	24
Tabela 3.2 – Tipo de cor temperatura de cor (EN 12646-1, 2011).....	25
Tabela 3.3 – Índice de proteção da luminária IPxx (adotado de SSLHB, 2009).....	28
Tabela 3.4 – Índice de proteção contra impactos mecânicos IKxx (adotado de SSLHB, 2009).....	29
Tabela 3.5 – Valores de refletância em função do tipo de superfície.....	31
Tabela 3.6 – Caracterização dos fatores de manutenção (adotado de Licht, 2016e).....	33
Tabela 3.7 – Custos associados aos sistemas de iluminação (Licht, 2016a).....	34
Tabela 3.8 – Características das tecnologias de iluminação (adotado de SSLHB, 2009).....	36
Tabela 3.9 – Vantagens e desvantagens de cada tecnologia de iluminação (adotado de Simonson, 2012).....	38
Tabela 3.10 – Legislação nacional.....	39
Tabela 3.11 – Legislação europeia.....	39
Tabela 3.12 – Normas europeias.....	40
Tabela 3.13 – Resumo de guias e relatórios técnicos.....	40
Tabela 4.1 – Elementos usados na caracterização das diferentes áreas dos edifícios.....	42
Tabela 4.2 – Critérios e parâmetros de conceção da solução a propor por área específica.....	43
Tabela 4.3 – Metodologia usada na conceção das soluções de iluminação.....	43
Tabela 4.4 – Identificação das soluções.....	45
Tabela 4.5 – Indicadores de avaliação técnica.....	53
Tabela 4.6 – Indicadores de avaliação económica.....	57
Tabela 4.7 – Indicador de avaliação ambiental.....	66
Tabela 4.8 – Indicador de avaliação social.....	67
Tabela 4.9 – Escala de ponderação e respetiva avaliação.....	68

ABREVIATURAS

ADENE	-	Agência para a Energia
ARCE	-	Acordo de Racionalização dos Consumos de Energia
ATEX	-	Atmosferas Explosivas
CE	-	Comissão Europeia
CIE	-	Commission Internationale de l' Eclairage
ECO.AP	-	Programa de Eficiência Energética para a Administração Pública
EED	-	Diretiva de Eficiência Energética
EIA	-	U.S. Energy Information Administration
EJ	-	Exajoule
ENE2020	-	Estratégia Nacional para a Energia 2020
ENEC	-	European Norms Electrical Certification
ERSE	-	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FEE	-	Fundo de Eficiência Energética
FM	-	Fator de Manutenção
FPC	-	Fundo Português do Carbono
GEE	-	Gases de efeito de estufa
IEA	-	International Energy Agency
IEO	-	International Energy Outlook
LLMF	-	Lamp Lumen Maintenance Factor (Fator de manutenção dos lumens da lâmpada)
LMF	-	Luminaire Maintenance Factor (Fator de manutenção da luminária)
LSF	-	Lamp Survival Factor (Fator de sobrevivência da lâmpada)
OCDE	-	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PNAC	-	Plano Nacional para as Alterações Climáticas
PNAEE	-	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	-	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
PPEC	-	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica
PREn	-	Planos de Racionalização do Consumo de Energia
RMF	-	Room Maintenance Factor (Fator de manutenção do espaço)
SGCIE	-	Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia
SIR	-	Savings to Invest Ratio (Rácio entre poupança e investimento)

tep	-	Tonelada equivalente de petróleo
TIR	-	Taxa Interna de Rentabilidade
UE	-	União Europeia
UGR	-	Unified Glare Rating
VAL	-	Valor Atual Líquido
VDE	-	VDE Institute
WEO	-	World Energy Outlook

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Num contexto global, segundo os dados da *U.S. Energy Information Administration* publicados no *International Energy Outlook* (EIA, 2016), a procura de energia na indústria varia entre regiões e países do mundo, com base no tipo de atividade económica e no nível de desenvolvimento tecnológico. De acordo com a mesma publicação, o sector industrial consumiu em termos mundiais 54% da energia final em 2012 e o consumo de energia global projetado no caso referência neste sector crescerá em média 1,2% ao ano de 2012 a 2040.

Em termos nacionais, de acordo com os dados publicados no Relatório *Energy Efficiency trends and policies in Portugal* (ADENE 2015), o sector industrial é o segundo maior consumidor de energia no país, com um peso de 32% no consumo total de energia final. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2013, os processos de fabrico são responsáveis por 90,5% do consumo de energia no sector industrial. A evolução dos consumos de energia final no sector industrial por fonte de energia, no horizonte temporal de 1995 a 2014, é mostrada na Figura 1.1.

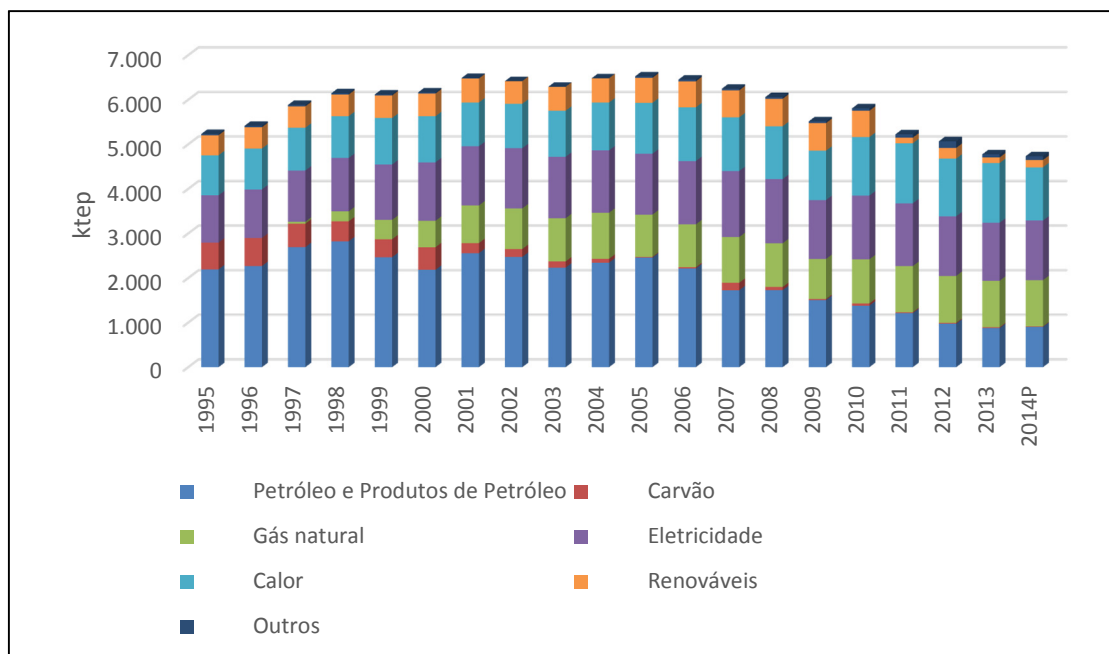


Figura 1.1– Consumo total de energia final na indústria (DGEG, 2014a).

De 2000 a 2013 o consumo de energia no sector industrial decresceu cerca de 1,7% por ano, atingindo 4,8 Mtep em 2013. Este decréscimo foi mais notório a partir de 2007, devido, principalmente, à redução do consumo de petróleo (ADENE 2015). Por outro lado, analisando a intensidade energética (i.e. o rácio entre a energia consumida e o valor acrescentado), que avalia o consumo de energia por unidade produzida, registou-se uma melhoria desde 2006 (-12%, em 2013, comparando com 2006).

A otimização do consumo de energia no setor industrial torna-se essencial não só para melhorar a competitividade industrial mas também para atingir objetivos sociais mais vastos, como seja a segurança energética, o crescimento económico, a atenuação das alterações climáticas e a proteção ambiental. Mas, embora exista um potencial significativo para reduzir o consumo de energia neste setor, as oportunidades para incrementar a eficiência energética ainda não estão fortemente exploradas (IEA, 2012). Os programas de gestão de energia têm vindo a demonstrar ser fundamentais na abordagem de muitas das barreiras que impedem a adoção em grande escala da gestão da energia na indústria e as políticas energéticas devem continuar a fornecer orientações úteis sobre como planear e projetar, implementar, avaliar e monitorizar os programas de gestão de energia para a indústria (IEA, 2012).

Em Portugal, no âmbito da Estratégia Nacional para a Energia (aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 15 de outubro) foi regulamentado o SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia pelo Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de abril e posteriormente alterado pela Lei n.º 7/2013, de 22 de janeiro, e pelo Decreto-Lei n.º 68-A/2015, de 30 de abril. O SGCIE foi estabelecido com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia, tendo em atenção a necessidade de salvaguardar a respetiva base competitiva no quadro da economia global.

O SGCIE prevê a realização periódica de auditorias energéticas que incidam sobre as condições de utilização de energia, a conceção e o estado da instalação e promovam o aumento da eficiência energética, incluindo a utilização de fontes de energia renováveis. Prevê, ainda, a elaboração, a execução e subsequente verificação do seu cumprimento, de Planos de Racionalização dos Consumos de Energia (PREn) com base nos elementos recolhidos durante a realização da auditoria energética. Estes PREn devem contemplar objetivos mínimos de eficiência energética e, uma vez aprovados, constituem Acordos de

Racionalização dos Consumos de Energia (ARCE) celebrados com a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), associando ao seu cumprimento a obtenção de incentivos pelos operadores das instalações consumidoras envolvidas.

Ainda em termos nacionais, a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), reconhecendo que do lado da procura de energia continuam a existir inúmeras barreiras ao aumento da eficiência no consumo de energia, nomeadamente quanto à participação das empresas de energia em atividades de eficiência energética e à adoção de equipamentos e hábitos de consumo mais eficientes por parte dos consumidores, consignou no Regulamento Tarifário a criação de um “Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica” (PPEC), no âmbito das suas atribuições e em conformidade com as diretrizes comunitárias e nacionais (ERSE, 2017).

O PPEC tem como objetivo prioritário, apoiar financeiramente iniciativas que promovam a eficiência e redução do consumo de eletricidade nos diferentes segmentos de consumidores, através de ações empreendidas pelos comercializadores de energia elétrica, operadores das redes de transporte e de distribuição de energia, associações e entidades de promoção e defesa dos interesses dos consumidores de energia elétrica, associações empresariais, associações municipais, agências de energia e instituições de ensino superior e centros de investigação (ERSE, 2017).

No PPEC 2013-2014 (5ª edição) das 70 medidas aprovadas de 29 promotores, na sua maioria, medidas em iluminação, gestão de consumos e força motriz, 30% são respeitantes ao segmento indústria. O PPEC 2017-2018, com implementação iniciada a 1 de janeiro de 2017, aprovou 75 medidas que serão implementadas por 33 promotores, onde se incluem, para a indústria, o fornecimento de sistemas de iluminação eficientes (ERSE, 2017).

1.2. Objetivos do Projeto

Em geral, os edifícios industriais englobam diversas áreas, para além das áreas de produção, de diferente complexidade e especificidade. Por este motivo, a iluminação deve ser adaptada às características dos edifícios industriais, de modo a proporcionar os níveis de iluminação ajustados às tarefas a realizar, a obter maior conforto visual, garantindo segurança, evitando erros e interrupções nas linhas de produção e promovendo maiores

níveis de produtividade. Os sistemas de iluminação devem ser flexíveis, expansíveis e de fácil controlo e manuseamento. Para além destes aspetos, a seleção de um sistema eficiente de iluminação deve ter em consideração os impactos económicos, em particular os custos de funcionamento e de manutenção da instalação, e os impactos ambientais resultantes de menores consumos de energia elétrica e do menor número de equipamentos utilizados.

Neste contexto, o objetivo principal deste projeto consistiu na avaliação de medidas de eficiência energética que possam ser implementadas em sistemas de iluminação de edifícios industriais, tendo em consideração múltiplos aspetos de avaliação (técnicos, económicos, ambientais e sociais).

A avaliação das diferentes medidas foi efetuada com base em dados reais, permitindo obter diferentes indicadores para cada um dos aspetos de avaliação considerados, através de uma análise custo-benefício.

1.3. Estrutura do Relatório

Este relatório de projeto está estruturado em cinco capítulos. No primeiro Capítulo, “Introdução”, é feito o enquadramento do presente trabalho, são referidas as principais motivações, e são apresentados os principais objetivos e a estrutura do relatório.

No Capítulo 2, “Eficiência Energética na Indústria”, faz-se referência à eficiência energética num contexto global e nacional, apresentando-se as principais metas e objetivos a concretizar no futuro, bem como os planos e programas existentes com enfoque especial nos que dizem respeito ao setor industrial. É ainda feita referência a boas práticas nos sistemas de iluminação nos edifícios industriais.

O terceiro capítulo centra-se em exclusivo no tema “Iluminação”, sendo abordadas diferentes questões que vão desde os impactos da iluminação na produtividade, à qualidade e requisitos na iluminação, à conceção prática dos sistemas de iluminação e eficiência energética, e às tecnologias de iluminação. No final deste capítulo é apresentado, de forma sucinta, o enquadramento legislativo europeu e nacional.

No Capítulo 4, apresenta-se a “Avaliação de Sistemas Eficientes de Iluminação em Edifícios Industriais”. É feito o enquadramento geral das soluções em avaliação e indicadas as linhas gerais da metodologia utilizada. É apresentada a caracterização das

soluções globais existentes, por tecnologia e por setor de atividade e a caracterização das correspondentes soluções globais propostas. Segue-se a avaliação das soluções de iluminação eficiente propostas, de acordo como os aspetos de avaliação considerados: técnicos, económicos, ambientais e sociais.

No Capítulo 5, “Conclusões”, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho de projeto, apontadas algumas contribuições e sugeridas pistas de trabalho futuro.

2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA

2.1. Enquadramento Geral

Segundo o Diretor Executivo da Agência Internacional de Energia (IEA, 2015): “O incentivo à implementação de medidas de eficiência energética é uma prioridade urgente. A transição para os sistemas de energia sustentáveis futuros, não deve estabelecer uma relação direta entre o crescimento económico e os gases de efeito de estufa (GEE). A eficiência energética é a solução para alcançar esse objetivo”¹.

O panorama energético global revela duas grandes preocupações: por um lado, a obtenção da energia a preços competitivos e, por outro, os efeitos negativos no ambiente como consequência da procura e consumos energéticos crescentes (EFINERG, 2015).

A preocupação com as questões ambientais e energéticas veio promover a implementação de medidas conducentes à redução de emissões poluentes, incentivando o desenvolvimento de sistemas e equipamentos de elevada eficiência energética.

No contexto global (europeu e mundial), importa referir e destacar o papel de três organismos internacionais, a IEA, EIA e a Comissão Europeia (CE), pelo contributo no que respeita às questões energéticas, nomeadamente através do desenvolvimento de planos estratégicos, da disponibilização de análises dos mercados mundiais de energia e pela definição de estratégias para alcançar um sector energético seguro, competitivo e hipocarbónico (EFINERG, 2015).

No contexto nacional, a política energética está alinhada com as estratégias que vêm sendo definidas pela CE, onde se destacam a Estratégia Energética 2020, a Estratégia Energética 2030 e a Estratégia Energética 2050, que definem as estratégias e metas a alcançar pelos diferentes países da União Europeia (UE).

Na Tabela 2.1 indicam-se os aspetos mais relevantes das diferentes estratégias energéticas a adotar pelos diferentes países da UE (CE, 2016).

¹ Tradução nossa.

Tabela 2.1 – Estratégias Energéticas Europeias.

Estratégia	Prioridades
Estratégia Energética 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Redução dos gases com efeito de estufa (GEE) de pelo menos 20%, em relação ao ano de 1990; • Uma quota de 20% de energia proveniente de fontes renováveis no consumo global; • Redução do consumo energético em 20% através do aumento da eficiência energética.
Estratégia Energética 2030	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de pelo menos 40% das emissões de gases com efeito de estufa até 2030, em comparação com 1990; • Aumento da eficiência energética de pelo menos 27%, a ser revisto até 2020, potencialmente elevando a meta para 30%, até 2030; • Conclusão do mercado interno da energia, atingindo um objetivo de interligação de eletricidade de 15% entre os países da UE até 2030, e a promoção de importantes projetos de infraestruturas.
Estratégia Energética 2050	<ul style="list-style-type: none"> • A UE pretende alcançar uma redução de 80% a 95% dos GEE em 2050, em comparação com os níveis de 1990.

Relativamente a Portugal, em 2010, através da Resolução do Conselho de Ministros nº 29/2010, de 15 de abril (RMC, 2010), é definida a Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020), tendo como horizonte o ano de 2020 e estando enquadrada no âmbito da UE, na vertente referente à energia e às alterações climáticas da Estratégia Energética 2020.

Os objetivos da ENE 2020 são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Objetivos da ENE 2020 (adotado de EFINERG, 2015).

	Objetivos
1	Reduzir a dependência energética de Portugal face ao exterior
2	Cumprir os compromissos para 2020 assumidos por Portugal no contexto europeu
3	Reduzir o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas
4	Consolidar o <i>cluster</i> das energias renováveis em Portugal
5	Continuar a desenvolver os setores associados à promoção da eficiência energética
6	Promover o desenvolvimento sustentável

A ENE 2020 assenta em cinco eixos principais e estabelece um conjunto de prioridades e medidas para a sua concretização (ver Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Definição dos eixos da ENE 2020 (adotado de EFINERG, 2015).

Eixos	Definição	Prioridades
1	Agenda para a competitividade, o crescimento e a independência energética e financeira	A ENE 2020 constitui uma agenda para a competitividade, o crescimento e a independência energética e financeira do país.
2	Aposta nas energias renováveis	Uma aposta nas energias e nas fontes renováveis de forma a obter delas 31% de toda a energia e 60% da eletricidade consumida em Portugal em 2020.
3	Promoção da eficiência energética	Promoção da Eficiência Energética consolidando o objetivo de redução de consumo da energia final em 10% até 2015 e 20% em 2020.
4	Garantia da segurança de abastecimento	Assegurar a garantia da segurança de abastecimento através da diversificação do “mix” energético, quer no que diz respeito às fontes quer às origens do abastecimento.
5	Sustentabilidade económica e ambiental	Sustentabilidade económica e ambiental, promovendo a redução de emissões e a gestão equilibrada dos custos e dos benefícios da sua implementação

Neste âmbito, foram desenvolvidos, ao longo dos anos, planos e programas específicos que visam dinamizar medidas e concretizá-las de forma mais efetiva:

- O Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética – PNAEE;
- O Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis – PNAER;
- O Programa de Eficiência Energética para a Administração Pública – ECO.AP.

Através da Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, de 10 de abril (RMC, 2013), foi realizada a revisão do PNAEE para o período 2013-2016 (Estratégia para a Eficiência Energética – PNAEE 2016) e do PNAER para o período 2013-2020 (Estratégia para as Energias Renováveis – PNAER 2020).

A integração do PNAEE e do PNAER (até agora tratados de forma independente) veio permitir uma ação concertada para o cumprimento dos objetivos nacionais e europeus, minimizando o investimento necessário e aumentando a competitividade nacional. No âmbito desta revisão, as medidas difíceis de quantificar ou com impacto reduzido deram lugar a novas medidas mais eficazes, sendo reforçadas as medidas existentes de menor custo e maior facilidade de implementação (RMC, 2013).

2.2. Enquadramento Legislativo

A legislação desempenha um papel crucial no desenvolvimento das políticas de eficiência energética em Portugal. É apresentada na Tabela 2.4 uma listagem sucinta da legislação portuguesa respeitante à eficiência energética.

Tabela 2.4 – Legislação nacional referente à eficiência energética.

Legislação	Âmbito
Decreto-Lei n.º 71/2008	Regula o SGCIE
Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008	Aprova o PNAEE 2008.
Portaria n.º 1316/2010	Aprova o Regulamento da Estrutura de Gestão do PNAEE.
Decreto-Lei n.º 50/2010	Cria o FEE previsto no PNAEE.
Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010	Aprova a ENE 2020
Portaria n.º 26/2011	Aprova a Regulamento de Gestão do FEE.
Resolução do Conselho de Ministros n.º 2/2011	Lança o ECO.AP

Tabela 2.4 – Legislação nacional referente à eficiência energética (cont.).

Legislação	Âmbito
Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013	Aprova o PNAEE 2016 e o PNAER 2020.
Decreto-Lei n.º 118/2013	Aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços.
Lei n.º 82-A/2014	Aprova as Grandes Opções do Plano para 2015.
Decreto-Lei n.º 68-A/2015	Transpõe a Diretiva relativa da Eficiência Energética (DEE).

2.3. PNAEE 2016

O PNAEE 2016 abrange seis áreas específicas: Transportes, Residencial e Serviços, Indústria, Estado, Comportamentos e Agricultura, contemplando diversas medidas de promoção da eficiência energética para atingir as metas propostas para 2016 e 2020

As áreas abrangidas pelo PNAEE 2016 e os respetivos programas são resumidamente apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Áreas e programas do PNAEE 2016 (RCM, 2013).

Áreas						
	Transportes	Residencial e Serviços	Indústria	Estado	Comportamentos	Agricultura
Programas	Eco Carro	Renove Casa&Escritório	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE)	Eficiência Energética no Estado	Comunicar Eficiência Energética	Eficiência no setor Agrário
	Mobilidade Urbana	Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios				
	Sistema de Eficiência Energética nos Transportes	Solar Térmico				

Na Tabela 2.6 é ilustrada a estimativa de poupança induzida pelo PNAEE em 2016 e 2020. A estimativa da poupança de energia final até 2016 é de 1501 ktep, correspondente a uma redução do consumo energético de aproximadamente 8,2% relativamente à média do consumo verificada no período entre 2001 e 2005, aproximando-se da meta indicativa, definida pela UE de 9% de poupança de energia até 2016 (RCM, 2013). As metas para o horizonte temporal de 2020 permite perspetivar antecipadamente o cumprimento das novas metas assumidas pela UE, de redução de 20% dos consumos de energia primária até 2020, bem como o objetivo geral assumido pelo Governo de redução no consumo de energia primária de 25% e o objetivo específico para a Administração Pública de redução de 30% (RCM, 2013).

Tabela 2.6 – Impactos do PNAEE 2016 por área (RCM, 2013).

Área	Meta 2016 tep		Meta 2020 tep	
	Final	Primária	Final	Primária
Transportes	344 038	343 683	408 414	406 815
Residencial e Serviços	634 265	836 277	857 493	1 098 072
Indústria	365 309	377 221	471 309	521 309
Estado	106 380	153 634	205 425	295 452
Comportamentos	21 313	32 416	21 313	32 416
Agricultura	30 000	30 000	40 000	40 000
TOTAL PNAEE	1 501 305	1 773 231	2 003 954	2 394 064

O PNAEE 2016 é essencialmente executado através de medidas regulatórias, mecanismos de diferenciação fiscal e apoios financeiros provenientes de fundos que disponibiliza verbas para programas de eficiência energética, tais como (RCM, 2013):

- FEE - Fundo de Eficiência Energética;
- PPEC - Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica, promovido pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) no quadro do PNAC;
- FPC - Fundo Português de Carbono, criado pelo Decreto -Lei n.º 71/2006, de 24 de março, destinado a apoiar, entre outros, projetos que conduzam à redução de emissões de gases com efeito de estufa;
- Portugal 2020 e outros instrumentos financeiros comunitários;

As medidas previstas para o setor industrial continuarão a incidir sobre a implementação do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), nomeadamente através do potencial de economias de energia constantes dos Planos de Racionalização do Consumo de Energia (PREn) e que resultam da execução de auditorias energéticas obrigatórias.

As medidas serão desagregadas em:

- Medidas Transversais (apresentadas na Tabela 2.6)
- Medidas Específicas
- Outros Sectores

Em função da execução e da avaliação do SGCIE, é descrito na RCM nº20/2013 que se pretende promover a sua revisão no sentido do alargamento do seu âmbito de aplicação, bem como da melhoria do grau de monitorização dos consumos de energia ou das condições de incentivo para estimular a adesão de empresas em regime voluntário.

Pretende-se, igualmente, melhorar a monitorização da implementação das medidas de eficiência energética através, nomeadamente, da utilização de protocolos de medição e verificação. Com esta revisão do SGCIE procura – se, ainda, dinamizar a adesão das empresas às normas internacionais sobre Sistemas de Gestão de Energia (como, por exemplo, a Norma ISO 50001:2011).

Tabela 2.7 – Medidas transversais – Setor Industrial (RCM, 2013)

Âmbito	Medida/Tecnologia
Motores Elétricos	Otimização de motores Sistemas de bombagem Sistemas de ventilação Sistemas de compressão
Produção de Calor e Frio	Cogeração Sistemas de combustão Recuperação de calor Frio industrial
Iluminação	Iluminação eficiente
Eficiência do Processo Industrial/Outros	Monitorização e controlo Tratamento de efluentes Integração de processos Manutenção de equipamentos consumidores de energia Isolamentos térmicos Transportes Redução da energia reativa

Para além das medidas transversais, foram identificadas, para um conjunto significativo de setores da indústria, um conjunto de Medidas Específicas ou Setoriais que traduzem atuações possíveis, apenas aplicáveis nos respetivos processos produtivos.

2.4. Iluminação Eficiente na Indústria - Boas práticas

Em Portugal, o consumo de eletricidade nos sistemas de iluminação nos diferentes sectores de atividade (indústria, serviços e doméstico) representa aproximadamente 25% do consumo global do país, e cerca de 6% a 7% do consumo global de energia elétrica de uma instalação industrial (AEP, 2015). A utilização de equipamentos mais eficientes nos sistemas de iluminação traduzir-se-á em reduções significativas do consumo de energia elétrica.

Assim, revela-se de grande importância a instalação de equipamentos que, proporcionando os níveis de iluminação necessários e recomendados ao desempenho das diferentes atividades, permitam não só a redução do consumo de eletricidade, mas também a redução dos custos de manutenção associados aos sistemas de iluminação (AEP, 2015).

A Agência Internacional de Energia argumenta que existem potenciais técnicos significativos para a redução do consumo de energia em sistemas de iluminação elétrica através do recurso de lâmpadas de alta eficiência, sistemas de controlo de níveis de iluminação e da melhoria dos projetos de construção dos edifícios (IEA, 2013). O recurso a lâmpadas de descarga e à tecnologia LED (*Light-Emitting Diode*) pode permitir melhorias significativas na eficiência energética dos sistemas de iluminação (Halonen et al., 2010). De facto, a quota de tecnologia LED tem vindo a aumentar de forma consistente e estima-se que, em termos globais, 70% da iluminação será fornecida pela tecnologia LED em 2020 (McKinsey and Company, 2012).

No entanto, e apesar do reconhecimento dos impactos positivos das melhorias do desempenho energético nas instalações industriais existentes, não se encontram na literatura muitos estudos que abordem de forma abrangente esta questão e, em particular, estudos centrados na avaliação de sistemas de iluminação eficientes.

Em IEA, 2006, é feita referência às medidas de eficiência energética implementadas no sistema de iluminação existente na indústria Belga Beerse Metaalwerken NV e apresentados os principais resultados. As medidas implementadas envolveram a

substituição de lâmpadas de mercúrio de alta pressão por fluorescentes tubulares de 26 mm, a substituição de lâmpadas fluorescentes tubulares de 38 mm por fluorescentes tubulares de 26 mm e a substituição de balastros existentes por balastros eletrônicos. Os principais resultados apresentados indicam uma melhoria na qualidade da iluminação, uma redução anual do consumo de eletricidade de 24 919 kWh, uma redução anual de custos de funcionamento de 7 133 euros e uma Taxa Interna de retorno de 20%.

O caso de estudo do grupo empresarial GROB-Werke situado em Mindelheim, Alemanha é apresentado em Voltimum, 2010. As zonas de produção existentes na GROB encontravam-se iluminadas com lâmpadas de descarga de alta pressão (400 luminárias 460W). A solução para a nova zona de produção passou pela utilização de luminárias com lâmpadas T5 com regulação de fluxo (400 luminárias 4x80W). Os resultados obtidos referem uma redução de 35% do consumo de energia com o sistema de iluminação e um tempo de retorno do investimento de 2,5 anos para uma utilização de 4000 horas anuais.

Os impactos positivos do recurso a sistemas de iluminação localizada são ilustrados em Liisa Halonen et al., 2010, através dos resultados obtidos num edifício industrial localizado na Holanda. Na área de montagem, o sistema de iluminação geral existente (luminárias de 2 * 58 W) foi substituído por iluminação localizada suspensa (luminárias de baixo brilho, 2 * 54 W). Embora a potência elétrica da iluminação instalada ter sido reduzida em apenas 7% (de 45 kW para 42 kW), o consumo de eletricidade foi reduzido em 39%, passando de 207 para 127 MWh/ano.

Os impactos da utilização de um sistema de controlo da iluminação artificial no consumo global de energia num edifício industrial são investigados em Wang et al., 2009. O sistema de controlo da iluminação artificial é implementado através de sensores de fotocélulas com base nos níveis de disponibilidade de luz natural e os resultados da simulação efetuada mostram ser possível uma economia de 70% em iluminação e uma redução de 25% das emissões de CO₂.

A maximização da utilização da iluminação natural é também analisada no estudo apresentado em Chen et al., 2014. O programa de simulação *EnergyPlus* foi usado para a análise quantitativa do potencial de redução dos consumos de energia obtida com a utilização dos sistemas de controlo de iluminação artificial integrados num grande edifício industrial em Tianjin, China. Os resultados obtidos indicam potenciais de redução

do consumo de eletricidade de 36,1% para o sistema de controlo *On/Off* e de 41,5% para o sistema de controlo *dimming*.

Um novo método baseado numa rede de sensores para projetar um sistema de controlo de iluminação para um edifício industrial é proposto em Wang et al., 2015. O método proposto foi implementado para o sistema de iluminação de um edifício industrial em Xi'an, China, em articulação com a utilização de claraboias projetadas para o aproveitamento da luz natural. O posicionamento da rede de sensores e a estratégia de controlo do sistema de iluminação artificial foram otimizados com recurso a simulações realizadas com os programas *DIALux* e *Autodesk Ecotect Analysis*. Os dados de consumo de iluminação diária para agosto de 2014 demonstraram que a estratégia do sistema de controlo permitiu economias de energia nos sistemas de iluminação até 80%.

Em termos nacionais, dois exemplos de boas práticas em sistemas de iluminação em edifícios industriais são referidos em Portugal, B.C.S.D., 2005, ambos inseridos no Programa *GreenLight*. Um dos casos de estudo diz respeito à Divisão Fabril de Ovar da Salvador Caetano que, em 2004, procedeu à substituição dos balastros ferromagnéticos por balastros eletrónicos e das lâmpadas de descarga (400W) por lâmpadas fluorescentes equipadas com balastro eletrónico (4x80W). Dos resultados obtidos salienta-se uma redução de consumos de 142.300 kWh por ano e um tempo de amortização inicialmente previsto de 5,1 anos, posteriormente reduzido para 4 anos, em virtude do aumento do preço da eletricidade.

O segundo caso de estudo apresentado em Portugal, B.C.S.D., 2005 refere-se à remodelação dos sistemas de iluminação levada a cabo em três edifícios industriais da empresa Jerónimo Martins. Esta remodelação envolveu a substituição de balastros ferromagnéticos por balastros eletrónicos e a instalação de sensores de movimento e de luminosidade. A análise dos resultados obtidos com o projeto permitem concluir que se obtiveram reduções do consumo de eletricidade do sistema de iluminação entre os 40 e 43% e tempos de amortização entre 1,5 e 1,9 anos.

Um outro projeto de iluminação eficiente em edifícios industriais é relatado em AEP, 2011. Executado no período entre 2009 e 2011, este projeto de iluminação eficiente é um dos vários projetos implementados na PROCALÇADO – Produtora de Componentes para Calçado, S.A e envolveu a substituição integral na zona fabril das luminárias existentes, com lâmpadas fluorescentes lineares T8 e balastro ferromagnético, por iluminação de alto

rendimento de iodetos metálicos e fluorescentes lineares T5, conjuntamente com sistemas de controlo apropriados para cada situação (regulação de fluxo, interruptores crepusculares e sensores de presença). Esta solução de iluminação, com um tempo de amortização de 3,6 anos permite reduções anuais de 17 tep.

3. ILUMINAÇÃO

3.1. Enquadramento

Desempenhando um papel indispensável na vida diária de qualquer ser humano, a iluminação artificial é globalmente responsável por 7,2% dos consumos mundiais de energia (Salata et al., 2014).

De acordo com COP21, 2015, a iluminação artificial é atualmente responsável por 15% do consumo global de eletricidade – um valor superior à eletricidade gerada por todas as centrais nucleares do mundo – e por 5% das emissões mundiais de gases com efeito de estufa.

Na década de 1995-2005, o consumo global de eletricidade em iluminação cresceu 1,5% ao ano, atingindo em 2005 um consumo superior a 2650 TWh, equivalente a 19% do consumo global de eletricidade desse ano. As correspondentes emissões de CO₂ foram estimadas em 1900 milhões de toneladas, cerca de 7% das emissões globais de CO₂ provenientes do consumo e queima de combustíveis fósseis (IEA, 2006).

Em 2005, o consumo global de energia elétrica para iluminação teve uma distribuição de, aproximadamente: 28% para o setor residencial, 48% para o setor de serviços, 16% para o setor industrial e 8% para a iluminação pública outra iluminação exterior (IEA, 2006). Relativamente ao setor industrial, o consumo de eletricidade em iluminação representa um pouco mais de 8,7% do consumo global de eletricidade nesse setor.

De acordo com IEA, 2006, prevê-se que o consumo global de eletricidade para iluminação, com as atuais tendências e políticas socioeconómicas, ultrapasse 4 250 TWh em 2030. Este valor corresponde a um aumento de 60% a uma taxa média anual de 1,9% (ver Figura 3.1).

No entanto, a taxa real de crescimento do consumo global de eletricidade em iluminação dependerá de uma série de fatores, incluindo aqueles que influenciam o recurso à iluminação artificial e a eficiência das tecnologias que forem utilizadas nos sistemas de iluminação (IEA, 2006).

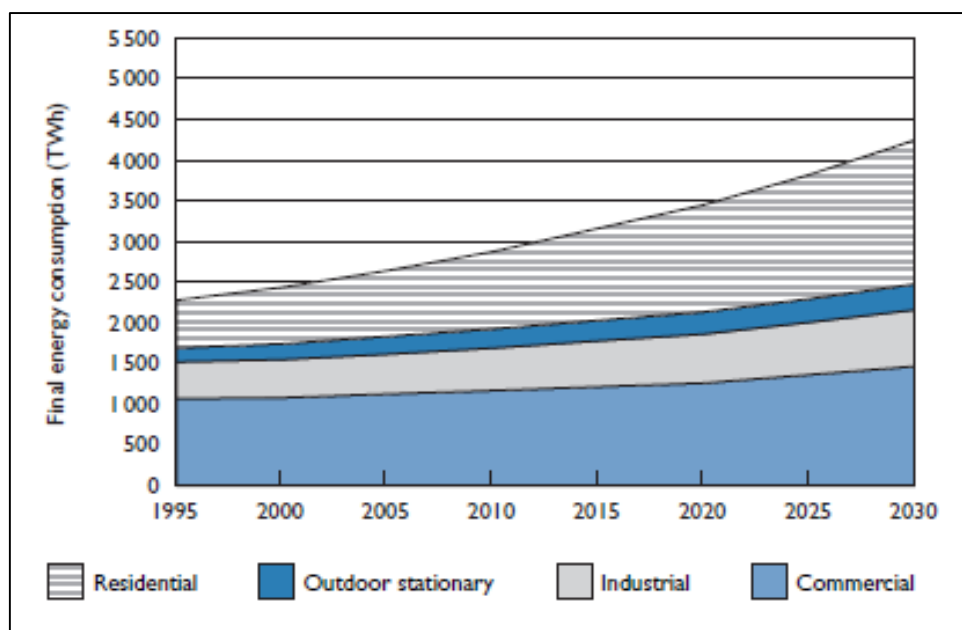


Figura 3.1 – Consumo global de eletricidade em iluminação por setor de utilização (IEA, 2006).

O recurso a tecnologias e procedimentos mais eficientes nos sistemas de iluminação artificial pode, simultaneamente, proporcionar melhores ambientes de vida e de trabalho e contribuir de forma para a redução global do consumo de energia e das emissões de gases com efeito de estufa.

No contexto Europeu, a *LightingEurope* (uma associação industrial que representa 33 fabricantes europeus de iluminação, associações nacionais de iluminação e empresas produtoras de materiais) lançou o “*Strategic Roadmap 2025*”.

Vocacionada para a promoção de práticas eficientes de iluminação em prol do ambiente global, do conforto humano e da saúde e segurança dos consumidores, a *LightingEurope* ilustra em detalhe a nova visão para a próxima década. Com a eficiência energética como um dado adquirido, a *LightingEurope* apresenta os impulsionadores de crescimento para o mercado europeu da iluminação (LE, 2016): uma melhor qualidade da iluminação através da “LEDification”, sistemas de iluminação inteligentes e iluminação centrada no ser humano (*Human centric Lighting*), centrada numa economia circular (ver Figura 3.2).

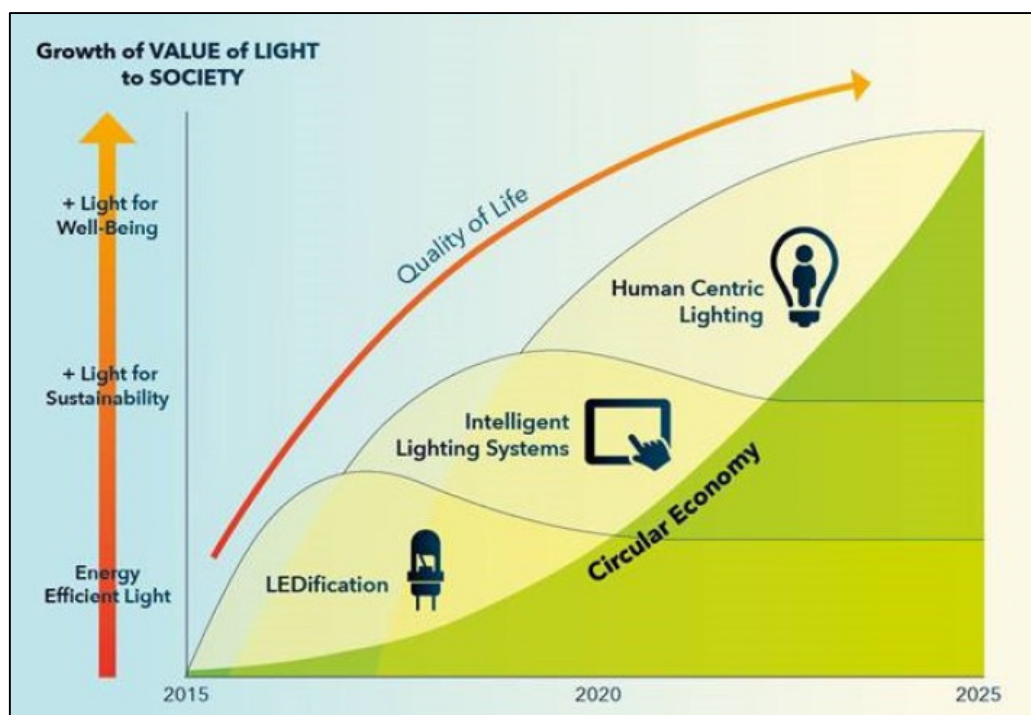


Figura 3.2 – Strategic Roadmap 2015 da LightingEurope (LE, 2016).

3.2. Iluminação e Produtividade

A iluminação industrial abrange uma vasta gama de diferentes interiores e tarefas de trabalho: desde pequenas oficinas a grandes salas de fábricas e desde trabalho de precisão até tarefas industriais pesadas (van Bommel, 2002).

A qualidade da iluminação deve ser sempre suficientemente elevada para garantir um desempenho visual suficiente para as tarefas em causa. Se as condições visuais adequadas para a realização do trabalho não forem garantidas, condicionar-se-á o bem-estar dos colaboradores, reduzindo a produtividade e podendo levar a erros e acidentes. Torna-se crucial que as tarefas visuais sejam realizadas sem esforço.

Atendendo a que mais de 80% de toda a informação que chega o cérebro humano é visual (Licht 2016d), uma correta iluminação tem um papel preponderante nos fatores que condicionam a produtividade: desempenho, erros e acidentes. Ao garantir um espaço bem iluminado e com um ambiente confortável, torna possível induzir nas pessoas mais motivação, focalização e desempenhos mais eficientes, aumentando assim a qualidade de

trabalho e reduzindo o número de erros, com conseqüente diminuição do risco de acidentes.

O potencial aumento dos níveis de iluminação em função da idade dos colaboradores e em função dos turnos noturnos enquadra-se nas questões de produtividade, podendo igualmente induzir o seu aumento.

3.3. Qualidade da Iluminação

Segundo Licht, 2016c, o nível do projeto de iluminação descreve a qualidade da iluminação. “*Good Lighting*” é caracterizada por reunir todas, ou quase todas, as características de qualidade, incluindo novos requisitos como a integração da luz natural e a eficiência energética.

Os requisitos de qualidade da iluminação baseiam-se nas tarefas visuais que são necessárias realizar. Essas tarefas variam com a atividade a desenvolver, sendo que cada situação exige específicas necessidades de iluminação.

As características de qualidade da iluminação podem ser divididas em três requisitos básicos de qualidade, os quais são ponderados diferentemente, dependendo do uso do espaço e do efeito desejado: capacidade visual, conforto visual e ambiente visual (Licht, 2016c).

- Capacidade visual: permite a realização de tarefas visuais mesmo em condições difíceis e por prolongados períodos de tempo, sendo influenciada pelo nível de iluminação e pela limitação do encandeamento;
- Conforto visual: melhora o desempenho das tarefas e a sensação de bem-estar, sendo determinado pela restituição cromática e distribuição do brilho;
- Ambiente visual: afetado pela cor, direção e modelação da luz.

Relativamente à segurança visual, esta é alcançada quando os requisitos de conforto e capacidade visual são cumpridos.

Na Figura 3.3 são apresentados os requisitos e características chaves de qualidade da iluminação.

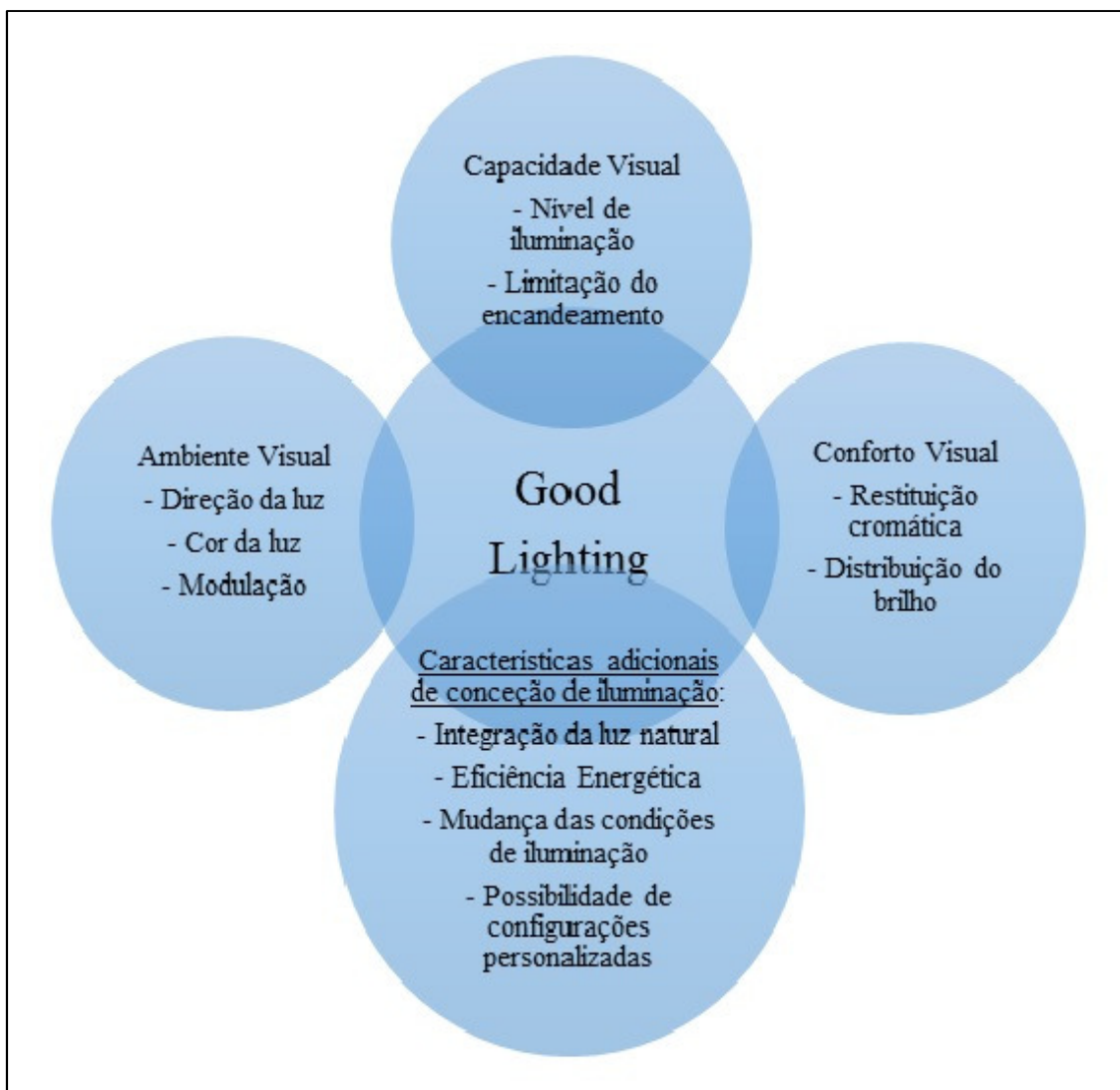


Figura 3.3 – Requisitos de qualidade de iluminação (adotado de Licht, 2016c).

Descrevem-se, de seguida, as características chave e unidades de medida utilizadas para a avaliação da qualidade da iluminação.

- Nível de iluminação (iluminância mantida e uniformidade)

Iluminância (símbolo: E), medido em Lux [lux], indica a quantidade de fluxo luminoso de uma fonte de luz que incide numa determinada superfície. Pode ser medido em planos horizontais e verticais, sendo a sua uniformidade (U_0) medida num plano e expressa como a relação entre iluminância mínima e média.

De acordo com a Norma EN 12464-1, 2011, são definidos valores de iluminância média mantidos (valores abaixo do qual a iluminância não deve descer) e valores mínimos de uniformidade (U_0), em função da definição da área da tarefa.

- Limitação por encandeamento

O encandeamento é definido pela sensação produzida por superfícies brilhantes dentro do campo de visão. Pode ser direto ou indireto, sendo o direto causado pelas luminárias ou outras superfícies com excesso de brilho, incluindo janelas (encandeamento direto) ou indireto, causado pelas reflexões em superfícies brilhantes (encandeamento por reflexão).

De acordo com EN 12646-1, 2011, ambos os encandeamentos, direto e por reflexão reduzem o conforto visual (encandeamento por desconforto) e prejudicam a capacidade visual (encandeamento por incapacidade).

O encandeamento por desconforto causado diretamente pelas luminárias de uma instalação interior é avaliado pelo método UGR (*Unified Glare Rating*), sendo que EN 12646-1, 2011 estabelece valores máximos em função das atividades, como indicado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Exemplo de alguns valores de UGR em função da atividade.

UGR	Atividade
≤ 16	Desenho técnico
≤ 19	Leitura, escrita, formação, reuniões e trabalho realizado nos computadores
≤ 22	Artesanato e indústrias ligeiras
≤ 25	Indústria pesada
≤ 28	Plataformas ferroviárias e átrios

- Distribuição do brilho

Luminância (símbolo: L) é o brilho de uma superfície iluminada ou luminosa percebida pelo olho humano, sendo medida em candelas por unidade de área [cd/m²]. A luminância de uma superfície é definida pelo grau de reflexão e pela iluminância que nela incide. A capacidade e o conforto visual são influenciados pela luminância.

O conforto visual é afetado negativamente da seguinte forma:

- Baixa luminância e excesso de uniformidade permitem criar atmosferas monótonas e desagradáveis;
- Diferenças significativas de luminâncias dentro do mesmo espaço provocam fadiga em resultado da constante necessidade de adaptação;
- Luminância pontual elevada pode provocar encandeamento.

- Índice de restituição cromática

As propriedades de restituição de cor de uma lâmpada indicam a capacidade da luz reproduzir de forma correta as cores dos objetos, sendo avaliada através do índice de restituição cromática (Ra). O índice de restituição varia entre 0 e 100, sendo Ra=100 a classificação mais elevada. Quanto mais baixo o índice, mais pobre são as propriedades de restituição de cor.

Na Norma EN 12464-1, 2011 são definidos valores mínimos para o índice de restituição cromática em função do tipo de área interior, tarefa ou atividade.

- Direção da Luz e modelação

É através da iluminação que se consegue salientar objetos, sendo que as respetivas sombras permitem ver os objetos para além de uma imagem a duas dimensões. A correta distribuição da luz e sombras permite que faces e gestos, superfícies e estruturas possam ser percecionados com precisão (Licht 2016c).

- Cor da luz

A cor da luz da lâmpada indica a cor intrínseca da luz que ela irradia. Esta é determinada pela temperatura de cor (temperatura de cor correlacionada T_{cp}) em Kelvin (k). Na Tabela 3.3 indica-se a definição do tipo de cor e respetiva gama de valores de temperatura de cor.

Tabela 3.2 – Tipo de cor temperatura de cor (EN 12646-1, 2011).

Tipo de Cor	K (Kelvin)
Branco quente	<3300k
Branco neutro	3300k a 5300k
Branco luz do dia	>5300k

Em resumo, a norma EN 12464-1, 2011 especifica os requisitos para soluções de iluminação para a grande maioria dos espaços de trabalho interiores e áreas associadas em termos de quantidade e qualidade da iluminação. Adicionalmente, são dadas recomendações para boas práticas de iluminação.

3.4. Conceção Prática dos Sistemas de Iluminação

A *Lighting Europe* (LE, 2016a) aprecia as atividades correntes por parte da CE no sentido de explorar a possibilidade de definir requisitos de energia para os sistemas de iluminação (*EcoDesign of Lighting Systems*) nos termos da regulamentação da UE. Nesse contexto, a *Lighting Europe* considera que, no estudo “*ENER Lot37 study on lighting systems*”, a rotulagem energética dos sistemas de iluminação é uma das opções políticas a considerar.

Ainda em LE, 2016a, a *Lighting Europe* descreve as principais considerações sobre eficiência energética no projeto de sistemas de iluminação e especifica o esquema para a rotulagem energética de projetos de sistemas de iluminação para os diferentes segmentos do projeto.

O projeto de sistemas de iluminação assegurará a boa qualidade da iluminação e a rotulagem energética do projeto incentivará a utilização de sistemas de iluminação eficientes em termos energéticos que contribuirão para as ambições da UE em matéria de economia de energia.

Num bom projeto de sistemas de iluminação, tanto a “*light quality*” e “*energy use*” são considerados igualmente elementos importantes (ver Figura 3.4).

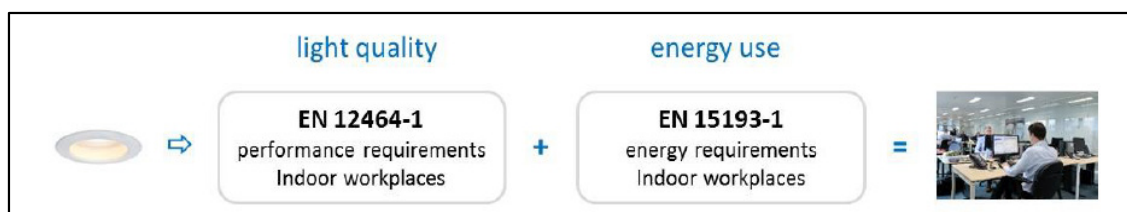


Figura 3.4 – Elementos a considerar num projeto de sistema de iluminação (LE, 2016a).

Apresentam-se de seguida os parâmetros a ter em conta na conceção prática de sistemas de iluminação, com base nas características de qualidade da iluminação.

- Definição do conceito e tipo de iluminação

O tipo de iluminação a adotar depende do tipo de tarefa ou atividade a desenvolver, sendo possível a combinação de diferentes tipos de iluminação, podendo ser geral (totalidade do espaço), localizada (área específica) e local (área de trabalho). Podem adotar-se soluções de luz direta, indireta e combinações de ambas, permitindo criar diferentes atmosferas e ambientes.

Na indústria, existem, geralmente, condicionantes específicas ao tipo e conceito de iluminação adotar (adotado de SSLHB, 2009):

- Direções de visão variadas;
- Sombras provocadas por obstáculos;
- Utilização de cores com elevada restituição cromática;
- Acessibilidade para a realização de manutenção;
- Equipamentos com partes rotativas;
- Operações em condições extremas de temperatura e humidade;
- Exposição a atmosferas que podem ser corrosivas, explosivas ou sujas, podendo ter de suportar jatos de água e vibrações.

- Definição dos componentes

- Luminária, lâmpadas e acessórios elétricos

Em função dos requisitos de iluminação, da iluminação da tarefa, da escolha da lâmpada e dos requisitos mecânicos e elétricos, é determinada o tipo de luminária. A conceção e produção das luminárias devem ter em consideração determinadas características (Licht 2016d):

- Operação económica (elevados fatores de utilização);
- Qualidade e funcionalidade da iluminação;
- Fiabilidade mecânica e elétrica (VDE, ENEC);

- Elevado tempo de vida (materiais, acabamentos e design compacto);
- Controlo de qualidade na produção;
- Simples instalação e fácil manutenção;
- Certificação;

Em particular para o setor industrial, a definição das luminárias deverá ter em consideração os seguintes aspetos:

- Índice de proteção da luminária (IPxx e IKxx)

O código IP define-se como o índice de proteção, sendo o primeiro dígito referente à proteção contra corpos sólidos e o segundo referente à proteção contra corpos líquidos. O código IK corresponde ao índice de proteção contra impactos mecânicos (Joules). Para ambos os índices, existem diferentes graus de proteção, como mostrado nas tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 – Índice de proteção da luminária IPxx (adotado de SSLHB, 2009).

Índice de Proteção (IPxx)			
Primeiro número	Grau de proteção corpos sólidos	Segundo número	Grau de proteção corpos líquidos
0	(não protegido)	0	(não protegido)
1	Diâmetro \geq 50mm	1	Gotas de água verticais
2	Diâmetro \geq 12,5mm	2	Gotas de água (15° de inclinação)
3	Diâmetro \geq 2,5mm	3	Chuva
4	Diâmetro \geq 1,0mm	4	Projeção de água
5	Protegidos contra poeiras	5	Jatos
6	Estanques à poeira	6	Jatos fortes
X	Omisso	7	Imersão temporária
		8	Imersão prolongada

Tabela 3.4 – Índice de proteção contra impactos mecânicos IKxx (adotado de SSLHB, 2009).

Índice de proteção contra impactos mecânicos (IKxx)	
Código IK	Energia do Impacto em Joule
00	Nenhuma Proteção
01	0,15 Joule
02	0,2 Joule
03	0,35 Joule
04	0,5 Joule
05	0,7Joule
06	1 Joule
07	2 Joule
08	5 Joule
09	10 Joule
10	20 Joule

O índice de proteção da luminária terá particular impacto na acumulação de sujeira e no intervalo de limpeza (manutenção) das luminárias, sendo que os índices de proteção superiores (exemplo, IP40) permitem intervalos de limpeza mais longos, em comparação com luminárias com baixa proteção (IP20).

Este índice terá ainda impacto no cálculo do fator de manutenção, conforme se verá posteriormente, permitindo reduzir o nível de iluminância inicial, e com isto obter uma poupança de energia.

– Classes de proteção contra choques elétricos

Conforme outros dispositivos elétricos, a luminária deve ser projetada para proteger os utilizadores contra choques elétrico, estando divididos em três classes de proteção: classe I, classe II e classe III.

– Zonas de risco explosão

Existindo o risco de explosão em quase todas as indústrias de processos, a utilização de luminárias com proteção contra explosão (Luminárias Atex) é obrigatória em áreas que comportem este risco.

- Temperatura ambiente máxima

A temperatura máxima ambiente é definida como a temperatura exterior à luminária sendo afetada pelas condições do meio ambiente (calor ou frio), não devendo ser excedida. Para locais com temperaturas excessivas, verifica-se que o tempo de vida dos balastos eletrónicos de lâmpadas fluorescentes reduz-se significativamente, sendo necessário prever balastos eletrónicos especiais.

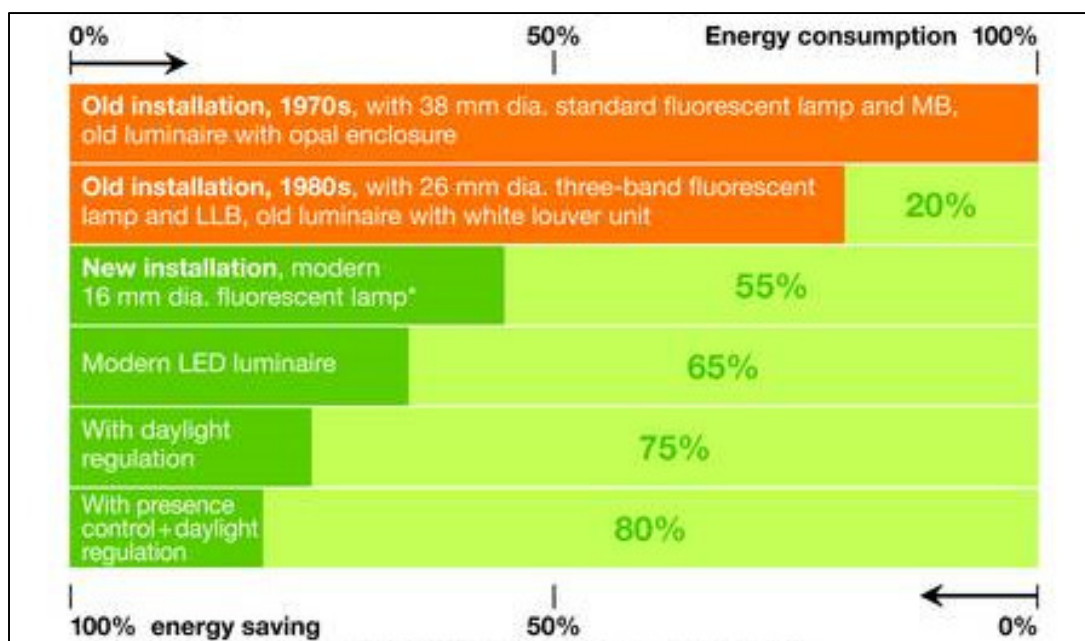
- Sistemas de controlo (luz natural, ocupação, manual)

As soluções de iluminação cada vez comportam mais a utilização de sistemas de controlo, garantindo o conforto das pessoas e permitindo poupanças de energia. Em termos de conceção, estes devem ser adotados aos requisitos e ser ergonomicamente corretos.

Em função do tipo de sistema, os componentes podem variar de um simples interruptor ou sensor, até sistemas complexos com controladores, atuadores e consolas centrais. Em termos de configurações dos sistemas, estes podem permitir:

- Regulação dependente de sensores de presença/movimento e de sensores de regulação em função de luz natural;
- Cenários em função de calendários e horários;
- Programação de cenários de iluminação em função de diferentes atividades;
- Controlo personalizado da iluminação;
- Controlo total da iluminação através de aplicações web;
- Integração em sistemas centralizados de gestão de edifícios.

Em função do tipo de sistema implementado e do incremento de diferentes tipos de controlos, poderá obter-se potenciais poupanças de energia (ver Figura 3.5). A utilização de regulação em função de luz natural e da aplicação de sensores de presença permitem maximizar as poupanças, garantindo máximo conforto e interação com o utilizador.



*Lâmpada fluorescente em operação com balastro eletrônico de perdas muito reduzidas, luminárias “direta” ou “direta/indireta”, de elevada eficiência e com tecnologias de controlo ótico atuais.

Figura 3.5 – Potenciais poupanças em função do tipo de sistema de controlo a instalar na iluminação interior (Licht, 2016c).

- Definição de parâmetros do cálculo luminotécnico
 - Definição refletâncias

Para a maioria das superfícies dos espaços interiores são recomendadas os valores de refletâncias dados na Tabela 3.5 (EN 12464-1, 2011).

Tabela 3.5 – Valores de refletância em função do tipo de superfície

Tipo de superfície	Valores de refletância
Teto	0,7 a 0,9
Paredes	0,5 a 0,8
Chão	0,2 a 0,4

Nota: A refletância da maioria dos objetos (tipo mobília, maquinaria, etc.) deve estar na gama de 0,2 a 0,7.

- Definição de área de tarefa, área envolvente e área de fundo

Define-se a área de tarefa como a área na qual é realizada a tarefa visual. A área envolvente é definida como uma faixa de 0,5m envolvendo a área de tarefa dentro do campo de visão. A área de fundo corresponde a uma faixa de 3 metros envolvendo a área envolvente.

Para as áreas de trabalho onde o tamanho e/ou a localização da área da tarefa é/são desconhecidas, toda a área pode ser definida como área de tarefa ou toda a área deve ser iluminada uniformemente ($U_0 \geq 0,40$) com um nível de iluminância especificado pelo projetista (ver Figura 3.6).

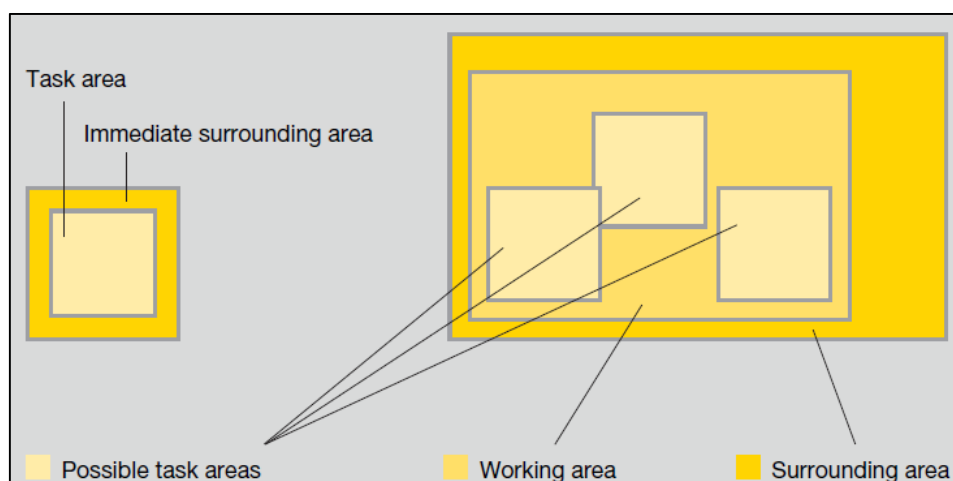


Figura 3.6 – Áreas de tarefa, de trabalho e envolvente (Licht, 2016d).

A EN12464-1 define valores de uniformidade de iluminância (U_0) para a área de tarefa, bem como para as áreas envolvente e de fundo, respectivamente 0,4 e 0,1.

- Plano de uso

A superfície utilizada para validar os níveis de iluminância corresponde ao plano de cálculo. Para os escritórios, esse plano será considerado à altura de 0,75m, para os espaços de trabalho e, para as áreas de circulação, será considerado a 0,1m acima de chão.

Para a indústria, deverá ser verificada a altura das áreas de tarefa em função da atividade a desenvolver, sendo que existem múltiplos espaços de trabalho em função da localização e tamanho.

– Fator de Manutenção

A redução do fluxo luminoso ao longo da vida operacional de uma instalação de iluminação está associada à idade das lâmpadas, luminárias e à sujidade dos espaços. Desta forma, as normas definem valores médios mantidos abaixo dos quais a iluminância não deve baixar. As instalações são concebidas com um valor inicial de iluminância superior por forma a garantir o valor mantido ao longo do tempo definido.

A aplicação do FM garante esse valor inicial, sendo este definido pela razão entre a iluminância mantida e a iluminância no momento de instalação. O FM é definido por múltiplos fatores (Tabela 3.6) e determinado da seguinte forma:

$$FM = LLMF \times LSF \times LMF \times RMF$$

Tabela 3.6 – Caracterização dos fatores de manutenção (adotado de Licht, 2016e).

Fator	Designação	Caracterização
LMFF	Fator de manutenção dos lumens da lâmpada	Razão entre o fluxo luminoso depois de um número de horas de utilização e o fluxo luminoso inicial. Em geral, Os valores de LLMF são disponibilizados pelos fabricantes e podem ser consultados nas respetivas normas.
LSF	Fator de sobrevivência da lâmpada	Probabilidade de um conjunto de lâmpadas ainda funcionar após um determinado número de horas de funcionamento.
LMF	Fator de manutenção da luminária	Em função do tamanho e natureza das partículas poluentes existentes no ar, é possível prever a partir do <i>design</i> das luminárias e das lâmpadas utilizadas a taxa de redução da luz num determinado período de tempo (<i>vide</i> Figura 3.6). Os fatores de manutenção para diferentes tipos de luminárias, bem como acumulação de sujidade prevista, em função do tempo decorrido entre cada operação de limpeza podem ser consultados na CIE 97.
RMF	Fator de manutenção do espaço	Pode-se definir pela relação entre a utilidade num dado momento e a utilidade após a última limpeza das superfícies do espaço. Este fator depende ainda do tamanho do espaço, da reflexão das superfícies, da distribuição do fluxo luminoso e do tipo e quantidade de sujidade no ar (<i>vide</i> Figura 3.6). Para casos mais simples, os valores padrão para o RMF podem ser encontrados na CIE 97.

Em função dos múltiplos fatores que permitem obter o FM, é possível otimizar os intervalos de manutenção do sistema de iluminação através de cada componente, e com

isto o investimento e os custos de operação, através da utilização adequada de lâmpadas, luminárias e balastos (Licht, 2016e).

Desta forma e, conforme referido inicialmente, o FM terá significativo impacto na eficiência energética do sistema de iluminação e nos custos associados.

- Custos de Investimento nos sistemas de Iluminação

Os custos de investimento dos sistemas de iluminação têm papel chave na conceção dos sistemas de iluminação. Na Tabela 3.7 são definidos os principais tipos de custos e parâmetros associados a este tipo de investimentos.

Tabela 3.7 – Custos associados aos sistemas de iluminação (Licht, 2016a).

Tipo de custos	Parâmetros
Financeiros	Aquisição dos equipamentos
	Instalação
Operacionais	Consumo de Energia
	Manutenção

Na Figura 3.7 apresenta-se a distribuição percentual dos custos associados aos sistemas de iluminação, sendo evidente o peso preponderante do consumo energético ao longo da vida útil do sistema de iluminação.

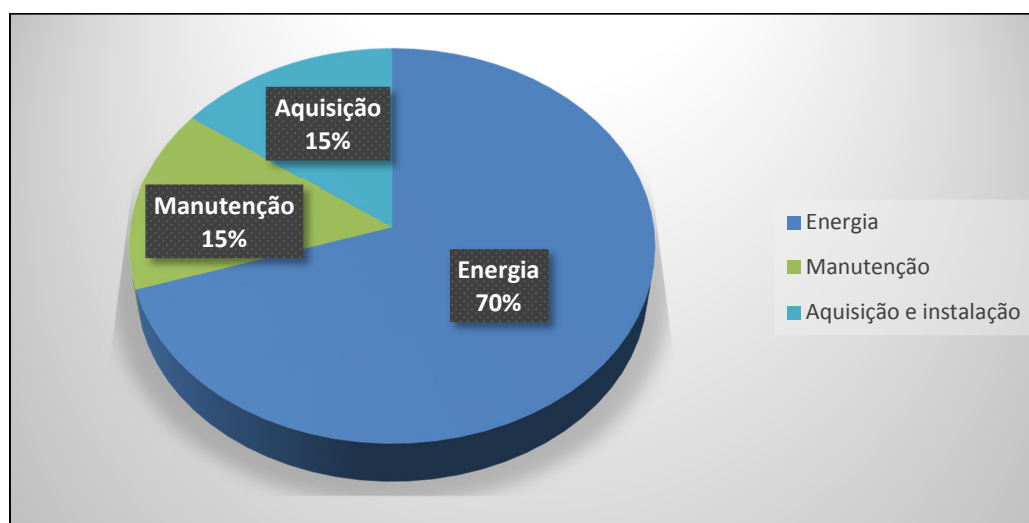


Figura 3.7 – Custos num sistema de iluminação (adotado de Licht, 2016a).

3.5. Eficiência Energética na Iluminação

A legislação portuguesa (Portaria n.º 349D, 2013) refere que os “sistemas de iluminação a instalar em edifícios de comércio e serviços devem cumprir requisitos gerais e específicos para os parâmetros de iluminação, de acordo com as normas europeias EN 12464-1 e EN 15193, bem como requisitos para a densidade de potência e requisitos de controlo, de regulação de fluxo e de monitorização e gestão”.

A identificação de oportunidades de eficiência energética na iluminação pode ser realizada com auxílio da informação presente na Figura 3.8.

Consequentemente, a análise e implementação de diferentes oportunidades tem como princípio a redução de consumos e consequente otimização dos sistemas em termos operacionais e energéticos.



Figura 3.8 – Oportunidades de eficiência energética na iluminação (adotado de ACEEE, 2010).

3.6. Tecnologias de Iluminação

Apresenta-se na Figura 3.9 a categorização das diferentes tecnologias de iluminação existentes atualmente no mercado.

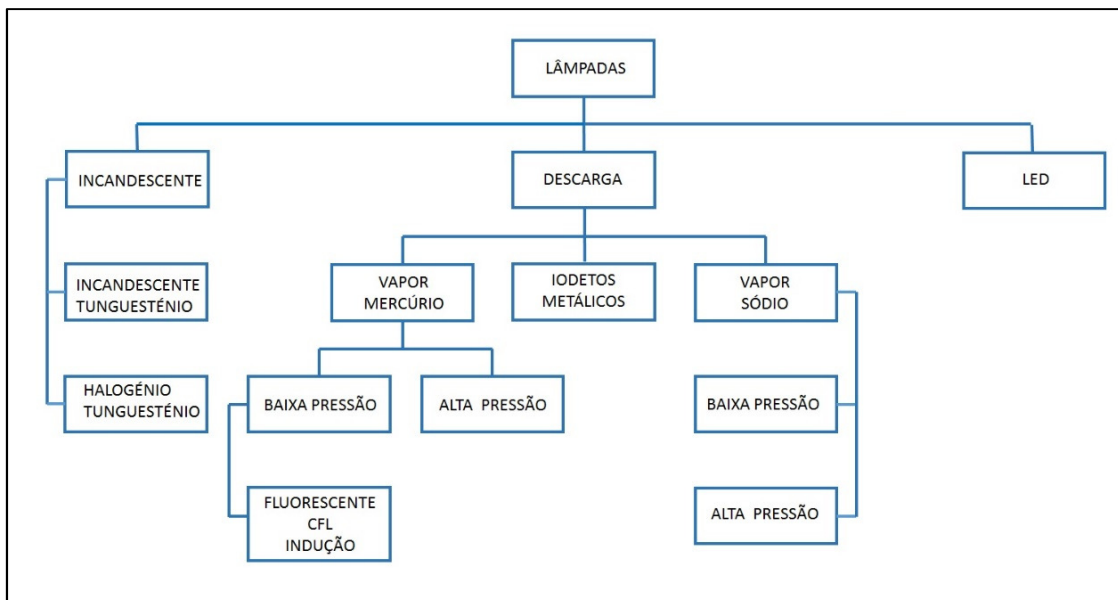


Figura 3.9 – Tecnologias de iluminação (baseado em CEIC, 2011).

Na Tabela 3.8 apresentam-se as principais características das diferentes tecnologias em função de diferentes parâmetros, entre os quais gama de potências, eficácia, utilização de balastos, temperatura de cor, índice de restituição cromática e tempo de vida útil. Um gráfico comparativo da eficácia (lm/W) das diferentes tecnologias de iluminação encontra-se na Figura 3.10, onde se pode observar que as lâmpadas lineares fluorescentes e os LED's se encontram entre as tecnologias mais eficazes. As principais vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias são identificadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.8 – Características das tecnologias de iluminação (adotado de SSLHB, 2009).

Tecnologia	Gama de Potências (W)	Eficácia (lm/W)	Balastro	Temperatura de Cor (K)	Índice de Restituição Cromática (Ra)	Tempo de vida útil (h) (1)
Incandescente	1-1000	8 - 14	Não	2500 - 2700	100	1000
Halogéneo	4-2000	15 - 25	Não (2)	2700 - 3200	100	1500 - 5000
Fluorescente T8 e T5	13-120	20 - 96	Sim	2700 - 7500	50 - 95	8000 - 19000

Tabela 3.8 – Características das tecnologias de iluminação (cont.).

Tecnologia	Gama de Potências (W)	Eficácia (lm/W)	Balastro	Temperatura de Cor (K)	Índice de Restituição Cromática (Ra)	Tempo de vida útil (h) (1)
Indução	55-165	47 - 80	Sim	2550 - 4000	80	60 000+
Descarga IM (Iodetos Metálicos)	20 - 2050	60 - 98	Sim	3000 - 6000	60 - 93	2000-10000
Descarga SAP (Sódio de Alta Pressão)	45-1040	40 - 142	Sim	1900 - 2500	19-83	6000 - 20000
Descarga VM (Vapor de Mercúrio)	60 - 1040	33 - 57	Sim	3200 - 3900	40 - 50	8000 - 10000
Descarga SBP (Sódio de Baixa Pressão)	26 - 180	70 - 180	Sim	N/A	N/A	15000 - 20000
LED	1- 5	30 - 100	Sim	2685 - 6500	40 - 85	15000 - 60000 (3)

1 - A vida útil da lâmpada pode ser limitada pela depreciação dos lumens.

2 - Muitas lâmpadas de halogéneo são projetadas para funcionar a tensão reduzida, pelo que será necessário utilizar um transformador ou outro dispositivo que permita obter essa tensão.

3 - Para vida útil da lâmpada, tanto falhas elétricas e a manutenção do fluxo luminoso deve ser considerada nos padrões de medição, p. B10 / L70 (10% de falhas e 70% de depreciação dos lumens ao longo da vida útil da lâmpada)

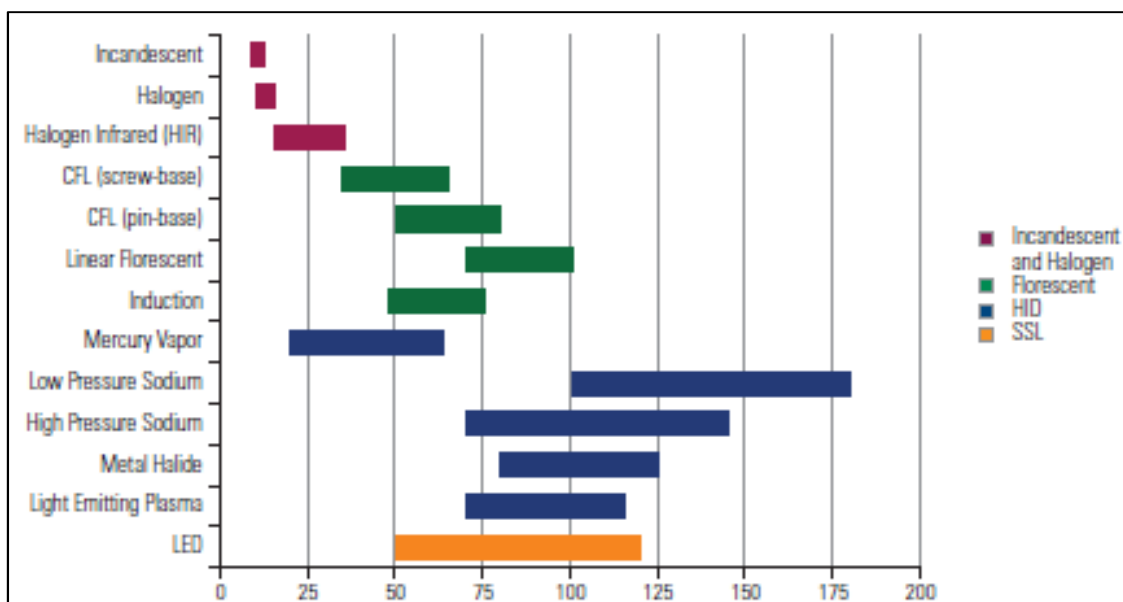


Figura 3.10 – Eficácia das diferentes tecnologias (Simonson, 2012).

Tabela 3.9 – Vantagens e desvantagens de cada tecnologia de iluminação (adotado de Simonson, 2012).

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Incandescente	Espetro total, totalmente regulável, custo reduzido	Baixa eficácia; tempo de vida reduzida; 80-90% de energia emitida como calor
Halógeno	Poupança de energia relativamente às incandescentes, luz branca, elevado tempo de vida, substituição direta de incandescentes	Custo mais elevado do que as incandescentes comuns; regulação pode reduzir tempo de vida
Fluorescente T8 e T5	Mais eficiente que muitas lâmpadas, disponível em muitos “brancos”, regulável através de balastos eletrónicos	Comutações reduzem tempo de vida; necessidade de balastos; funcionamento deficiente a baixas temperaturas; tubos contêm mercúrio (1-100mg)
Indução	Tempo de vida elevado sem alterações com comutações frequentes, funcionamento a baixas temperaturas	Custo mais elevado, menos eficiente que as fluorescentes, grandes dimensões, podem causar rádio interferências, tubos contêm 1-100mg mercúrio
Descarga IM	Luz branca nítida, elevada eficácia, boa restituição de cor, funciona com balastos eletrónicos	Regulação não eficaz, emite UV com quebra de vidro exterior, necessidade de balastos, contêm 5-1000mg de mercúrio e outros metais pesados
Descarga SAP	Mais eficiente fonte de descarga, atrai menos insetos que outras fontes	Reduzida restituição cromática, ciclos de ligado e desligado no fim do tempo de vida, não regulável, contêm 5-100mg de mercúrio e outros metais pesados
Descarga VM	Tempo de vida elevado	Reduzida eficácia, contém mercúrio
Descarga SBP	Mais eficiente fonte de luz comercial, não atrai insetos, não contém mercúrio	Completamente monocromática, não permite perceção de cor, tempo de vida mais reduzido que sódio de alta pressão, dificuldade no controlo ótico
LED	Tempo de vida elevado, elevada eficácia, pode ser regulável, excelente qualidade de cor	Custos iniciais elevados, sensíveis à temperatura, necessidade de dissipadores de calor, cor e qualidade variável

3.7. Enquadramento Legislativo e Normativo

Apresenta-se nas tabelas 3.10 a 3.13 um resumo da legislação nacional e europeia, Normas Guias e Relatórios Técnicos relativo à iluminação.

Tabela 3.10 – Legislação nacional.

Legislação	Âmbito
Declaração de retificação n.º 03/2014, de 31 de janeiro	Retifica a Portaria n.º 349- D/2013, de 02 de dezembro.
Portaria n.º 349-D/2013, de 02 de dezembro	Requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios.
Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e de Comércio e Serviços (RECS).
Decreto-Lei n.º 327/2001, de 18 de dezembro	Estabelece as disposições aplicáveis à eficiência energética das fontes de iluminação fluorescentes;

Tabela 3.11 – Legislação europeia.

Legislação	Âmbito
Diretiva 2009/125/EC, <i>Energy-related Products Directive</i>	Substitui a diretiva 2005/32/EC e cria um quadro para definir os requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia.
Diretiva 2010/31/UE, <i>Energy Performance Buildings Directive</i>	Visa melhorar o desempenho energético dos edifícios. Neste âmbito, a iluminação energeticamente eficiente pode ajudar a obter um elevado nível de classificação que irá aumentar o valor do edifício de uma forma económica.
Diretiva 2010/30/UE, <i>Energy Efficiency Label Directive</i>	Relativa à indicação do consumo de energia e de outros recursos por parte dos produtos relacionados com a energia, por meio de rotulagem e outras indicações uniformes relativas aos produtos.
Diretiva 2011/65/UE, <i>Restriction of Hazardous Substances Directive</i>	Relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrónicos.
Diretiva 2012/27/UE, <i>Energy Efficiency Directive</i>	Altera as Diretivas 2009/125/CE e 2010/30/UE e revoga as Diretivas 2004/8/CE e 2006/32/CE.
Diretiva 2012/19/UE, <i>Waste Electrical and Electronic Equipment Directive</i>	Sobre o tratamento de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos, requerendo a recolha para reciclagem de todos os tipos de lâmpada e respetivas luminárias e equipamentos de controlo (exceto incandescentes e de halogéneo).

Tabela 3.12 – Normas europeias.

Norma	Âmbito
EN 12464-1:2011	Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.
EN 15193:2007	Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting.
EN 12193:2007	Light and lighting - Sports lighting.
EN 12464-2:2014	Light and lighting - Lighting of work places - Part 2: Outdoor work places.
EN 12665, 2011	Light and Lighting – Basic Terms and Criteria for Specifying Lighting Requirements.

Tabela 3.13 – Resumo de guias e relatórios técnicos

Tipo de Documento	Âmbito
Guias	<p>CELMA (<i>the Federation of National Manufacturers Associations for Luminaires and Electrotechnical Components for Luminaires in the European Union</i>) - Guia de Balastros</p> <p>De forma a identificar os consumidores de energia da comunidade dos balastros, foi desenvolvido pela CELMA um sistema de classificação.</p> <p>Os balastros Classe D não são permitidos desde 21 maio 2002 e os balastros de Classe C desde 21 de novembro de 2005. As classes D e C correspondem às fases de proibição “I” e II” da Diretiva 2000/55/EC referente a Balastros.</p> <p>A1: Balastros eletrónicos reguláveis; A2: Balastros eletrónicos de perdas reduzidas; A3: Balastros eletrónicos; B1: Balastros magnéticos de perdas muito reduzidas; B2: Balastros magnéticos de perdas reduzidas; C: Balastros magnéticos de perdas moderadas; D: Balastros magnéticos de perdas muito elevadas.</p>
Relatórios Técnicos	<p><i>Guide on the Maintenance of Indoor Electric Lighting Systems</i> (CIE 97, 2005).</p>

4. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS EFICIENTES DE ILUMINAÇÃO EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS

Neste trabalho pretendeu-se analisar e avaliar soluções de iluminação eficiente para edifícios industriais de diferentes setores de atividade. A avaliação foi efetuada tendo por base dados reais, de soluções de iluminação existentes em diferentes edifícios industriais de empresas distintas, referentes aos anos de 2014, 2015 e 2016.

Com base nos elementos disponibilizados e recolhidos nos diferentes edifícios industriais envolvidos, procedeu-se à análise e compilação dos dados por diferentes áreas de trabalho, definindo-se assim a **solução global existente** para cada instalação industrial (empresa).

Em função das soluções globais existentes, para cada uma das indústrias consideradas, foram definidas **soluções globais propostas** de acordo com os critérios de qualidade e os parâmetros de conceção dos sistemas de iluminação. Todas as soluções globais propostas são soluções técnico-económicas de elevada eficiência energética e que permitem cumprir os requisitos definidos pelos clientes, nomeadamente, níveis de iluminação, características de instalação dos equipamentos, características de IP, IK e classe de proteção.

Por questões de confidencialidade, não se procederá à identificação das indústrias cujos edifícios estiveram envolvidos nesta avaliação nem à indicação dos equipamentos/marcas propostas nas diferentes soluções.

4.1. Enquadramento das Soluções Globais Existentes e Propostas

Por forma a elucidar o termo “solução global existente e solução global proposta”, é importante referir que as indústrias avaliadas neste projeto podem ter afetos vários edifícios industriais que contemplam diferentes áreas, sejam administrativas e sociais (exemplos: átrios e halls, gabinetes, refeitórios, balneários, wc, corredores, etc.), áreas técnicas (anexos, equipamentos técnicos, etc.), de armazenamento e áreas de produção, como exemplificado no diagrama da Figura 4.1.

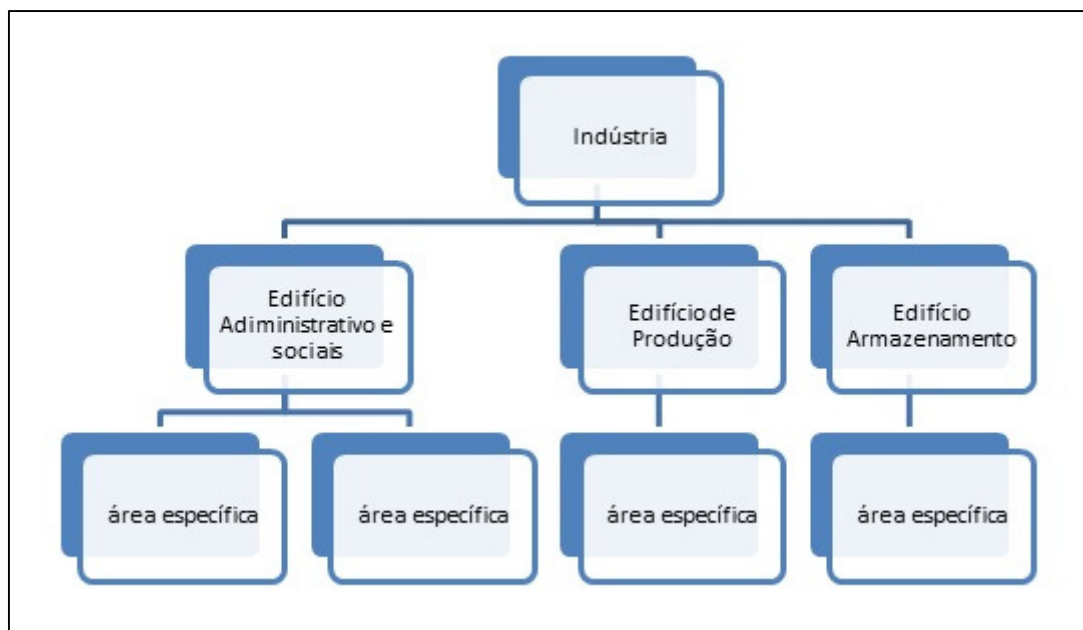


Figura 4.1 – Esquema exemplificativo das indústrias avaliadas.

Para a definição da solução global existente em cada uma das instalações industriais envolvidas neste projeto, procedeu-se à caracterização e análise das diferentes áreas existentes em cada edifício, de acordo com os elementos constantes Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Elementos usados na caracterização das diferentes áreas dos edifícios.

Áreas dos Edifícios Industriais	Elementos disponibilizados e recolhidos
Características Estruturais	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensões • Tipo de teto • Caracterização dos tetos, paredes e chão • Caracterização dos <i>layout's</i> • Entrada de luz natural • Instalações elétricas
Características dos Sistemas de iluminação	<ul style="list-style-type: none"> • Altura de instalação das luminárias • <i>Layout</i> das luminárias existentes • Tipo de luminárias existentes, fixação e consumos • Aferição de níveis de iluminação existentes • Índices de proteção (IP e IK)
Características Funcionais	<ul style="list-style-type: none"> • Horários e calendário de funcionamento • Zonas de atuação de movimento e presença • Custo do kWh

Em função da análise e caracterização de cada área específica, foi necessário proceder à definição da solução a propor, com base nos critérios e parâmetros de conceção referidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Critérios e parâmetros de conceção da solução a propor por área específica.

Critérios	Parâmetros
Qualidade	<ul style="list-style-type: none"> • Nível de iluminância • Uniformidade • UGR • IRC
Conceção prática	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de tecnologia • Tipo de sistema e conceito de iluminação • Requisitos das luminárias (IP e IK) • Fatores de reflexão das superfícies • Fator de Manutenção • Sistemas de controlo • Instalação elétrica existentes

Na Tabela 4.3 apresenta-se, resumidamente, a metodologia usada na conceção das soluções de iluminação, que inclui os diferentes procedimentos seguidos.

Tabela 4.3 – Metodologia usada na conceção das soluções de iluminação.

Listagem dos procedimentos
Realização dos cálculos luminotécnicos (com recurso ao software Dialux)
Caracterização das soluções existente e proposta de acordo com os diferentes parâmetros
Cálculo dos custos associados com a solução proposta
Análise comparativa da solução existente com a nova solução
Verificação dos requisitos definidos (Tabela 4.2)
Reconfiguração da solução proposta se e quando necessário

Por fim, para cada indústria avaliada, procedeu-se à compilação dos dados dados respeitantes às soluções globais existentes e às respetivas soluções globais propostas, em função do ano, setor de atividade e parâmetros técnicos essenciais.

4.2. Caracterização Geral das Indústrias

Fez-se uma caracterização das indústrias avaliadas em função do número de indústrias avaliadas em cada um dos anos considerados (Figura 4.2) e em função dos respectivos setores de atividade (Figura 4.3). Os setores de atividade foram definidos em função dos setores de atividade utilizados em DGEG, 2014.

Neste estudo foram analisadas vinte e sete indústrias distintas, sendo que 14,8% dessas indústrias são processos referentes ao ano de 2014, 59,2% referentes as 2015 e 25,9% ao ano de 2016.

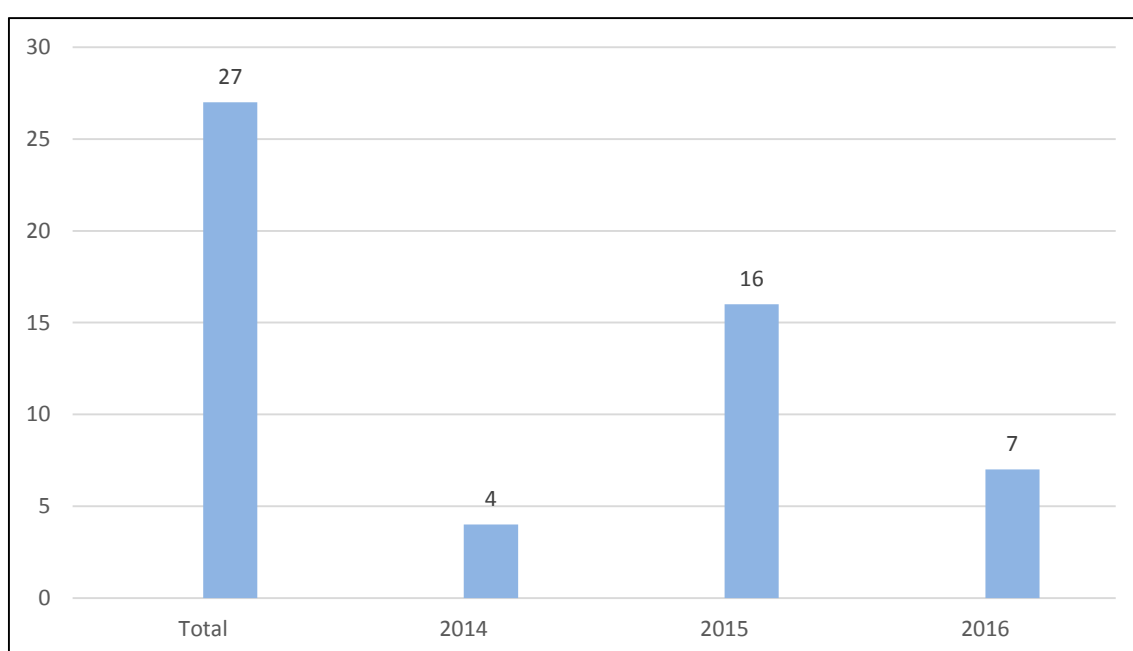


Figura 4.2 – Número total de indústrias avaliadas por ano.

Da análise da Figura 4.3, é possível constatar que o setor de atividade mais representativo neste projeto é o setor das metalo-electro-mecânicas com oito indústrias, representando cerca de 29,6% do total de indústrias avaliadas. Os setores menos representativos, com apenas uma (indústria, são os setores de alimentação, bebidas e tabaco, borracha, papel e artigos de papel e vidro e artigos de vidro.

Assim, sempre que a análise incidir em função dos setores de atividade, as oito indústrias do setor das metalo-electro-mecânicas terão um papel determinante em alguns dos dados apresentados.

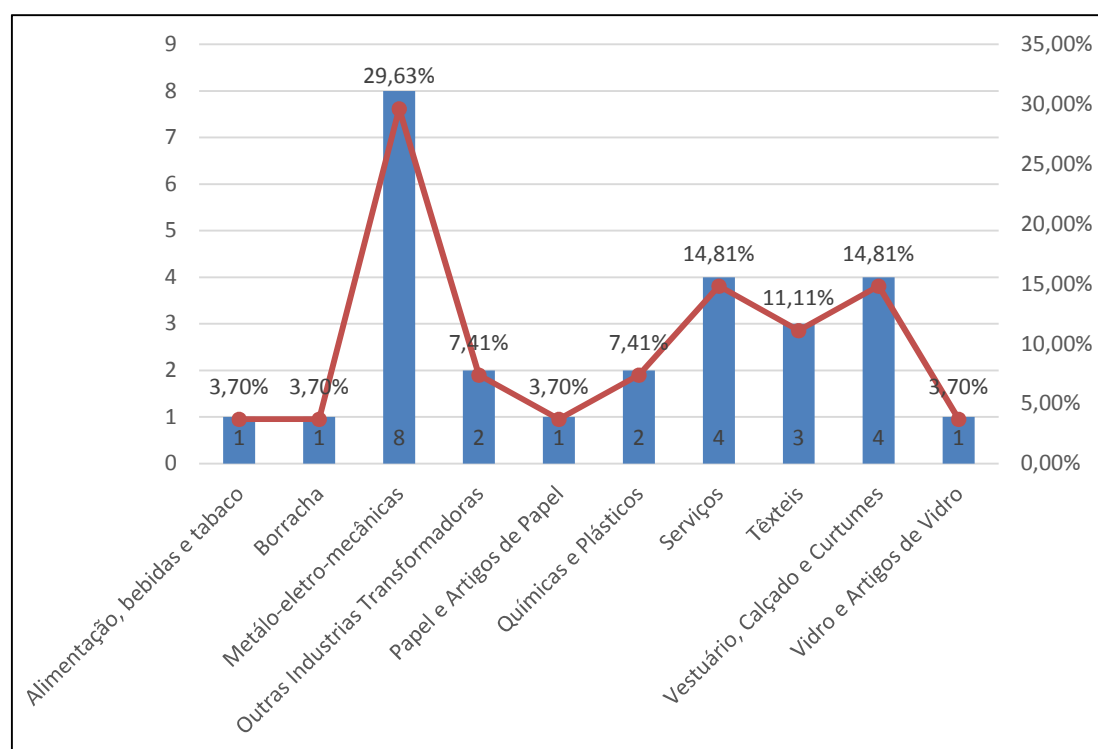


Figura 4.3 – Número total de indústrias por setor de atividade.

Para a identificação das indústrias/soluções (uma vez que, como referido, não é possível usar a sua identificação real) optou-se pelo recurso ao abecedário, como mostrado na Tabela 4.4. A identificação é feita de acordo com o setor de atividade e o ano de avaliação. Na Tabela 4.4 são ainda indicadas as tecnologias existentes nas soluções de iluminação existentes e as tecnologias usadas nas correspondentes soluções propostas.

Tabela 4.4 – Identificação das soluções.

Solução	Sector de atividade	Ano	Tecnologia existente	Tecnologia nova
A	Vidro e Artigos de Vidro	2014	Fluorescente T8; Descarga IM; Incandescente	Fluorescente T5; Incandescente
B	Vestuário, Calçado e Curtumes	2014	Fluorescente T8	Fluorescente T5
C	Vestuário, Calçado e Curtumes	2014	Fluorescente T8; Descarga SAP	Fluorescente T5
D	Vestuário, Calçado e Curtumes	2014	Fluorescente T8; Fluorescente Compacta; Descarga VM	Fluorescente T5; Fluorescente Compacta
E	Serviços	2015	Fluorescente T8; Fluorescente Compacta; Descarga SAP e VM; Incandescente	Led; Fluorescente T5)

Tabela 4.4 – Identificação das soluções (cont.).

Solução	Setor de atividade	Ano	Tecnologia existente	Tecnologia nova
F	Outras Industrias	2015	Descarga VM	Fluorescente T5
G	Metálo-eleto-mecânicas	2015	Fluorescente T5	Led
H	Metálo-eleto-mecânicas	2015	Descarga IM	Fluorescente T5
I	Têxteis	2015	Fluorescente T8; Fluorescente Compacta; Descarga IM; Hologéneo	Led
J	Serviços	2015	Fluorescente T8; Descarga SAP	Fluorescente T5
K	Têxteis	2015	Fluorescente T8; Descarga IM	Fluorescente T5
L	Alimentação, bebidas e tabaco	2015	Fluorescente T8	Fluorescente T5; Led
M	Metálo-eleto-mecânicas	2015	Fluorescente T8	Fluorescente T5
N	Vestuário, Calçado e Curtumes	2015	Fluorescente T8 e T5; Fluorescente Compacta; Descarga IM; Incandescente	Led; Fluorescente T5, Fluorescente Compacta
O	Outras Industrias	2015	Fluorescente T8 e T5; Fluorescente Compacta; Descarga IM	Led
P	Metálo-eleto-mecânicas	2015	Fluorescente T8	Fluorescente T5
Q	Metálo-eleto-mecânicas	2015	Fluorescente T8	Fluorescente T5
R	Têxteis	2015	Fluorescente T8	Fluorescente T5
S	Químicas e Plásticos	2015	Fluorescente T8; Fluorescente Compacta; Descarga SAP; Incandescente	Fluorescente T5; Fluorescente Compacta; Led
T	Papel e Artigos de Papel	2015	Descarga VM	Led
U	Metálo-eleto-mecânicas	2016	Fluorescente T8; Descarga IM	Led
V	Borracha	2016	Fluorescente T8; Fluorescente Compacta	Fluorescente T5; Fluorescente Compacta
W	Metálo-eleto-mecânicas	2016	Fluorescente T8	Led
X	Químicas e Plásticos	2016	Descarga IM	Led + Sistema de Controlo da Iluminação
Y	Metálo-eleto-mecânicas	2016	Fluorescente T8 e T5; Led; Descarga IM	Led
Z	Serviços	2016	Fluorescente T5	Led
AA	Serviços	2016	Fluorescente T5	Led

4.3. Caracterização das Soluções Globais Existentes

Para a caracterização das soluções globais existentes procedeu-se à recolha de diversos elementos, como número total de lâmpadas por tecnologia, potência total instalada por solução e custo anual de energia por solução.

4.3.1 Número Total de Lâmpadas

Dos dados apresentados na Figura 4.4, é possível constatar que a tecnologia de iluminação predominante nas soluções globais existentes é a lâmpada T8 com aproximadamente 68,3% do total de lâmpadas. As lâmpadas T5 e as de descarga representam 13,7% do total, e as tecnologias de halogéneo, incandescente e LED's são quase inexistentes.

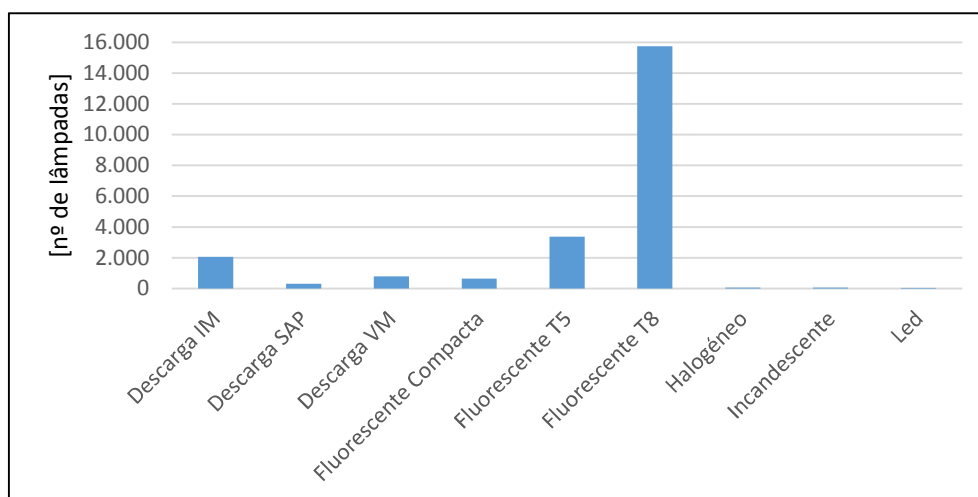


Figura 4.4 – Número total de lâmpadas por tecnologia nas soluções existentes.

Na Figura 4.5, apresenta-se a percentagem total de lâmpadas por tecnologia e por setor de atividade. Apenas em três setores de atividade a lâmpada T8 não se apresenta como a tecnologia predominante. Nos setores dos serviços, químicas e plásticos e papel e artigos de papel, é possível verificar diferentes tecnologias: fluorescente T5, descarga IM (iodetos metálicos) e descarga VM (vapor de mercúrio), respetivamente.

A prevalência da tecnologia T8 no número total de lâmpadas nas soluções de iluminação existentes pode ser justificada com a inclusão, nesta avaliação, das áreas administrativas e sociais. Se os elementos recolhidos a partir dos edifícios industriais

apenas incluíssem as áreas produtivas, seria expectável uma alteração das tecnologias preponderantes.

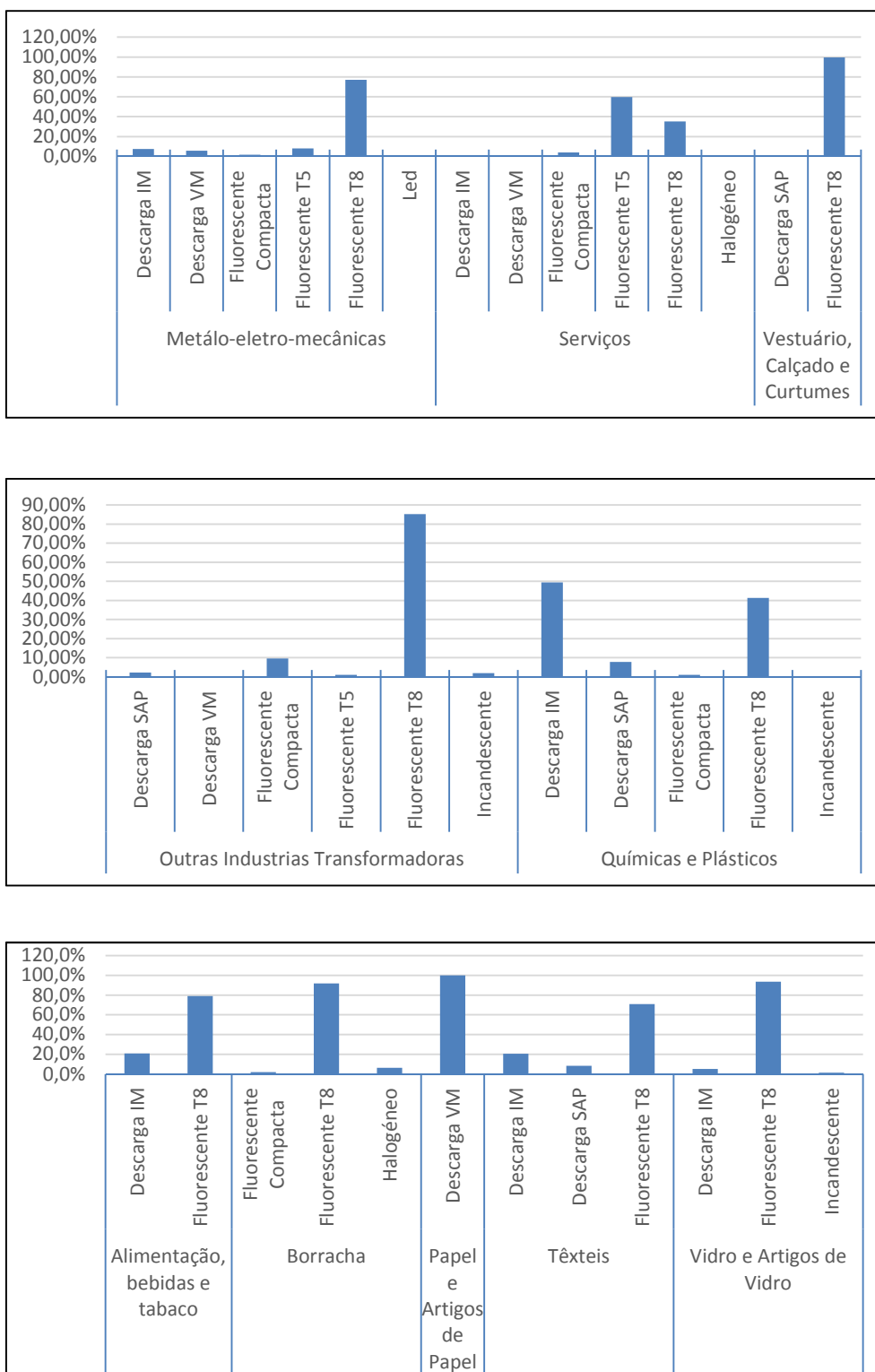


Figura 4.5 – Percentagem total de lâmpadas por tecnologia e por setor de atividade.

4.3.2 Potência Total Instalada

Apresentam-se na Figura 4.6 os valores de potência total instalada nas soluções de iluminação existentes, por ordem decrescente do seu valor. No que se refere ao parâmetro potência total instalada, é importante referir que os sistemas de iluminação contemplam a potência das lâmpadas e do balastro/transformador associado.

Observa-se que existem sete soluções com valores superiores a 100.000W de potência total instalada, sendo o valor mais elevado o da solução X (261.580W), estando as restantes soluções entre 4.430W e 98.481W.

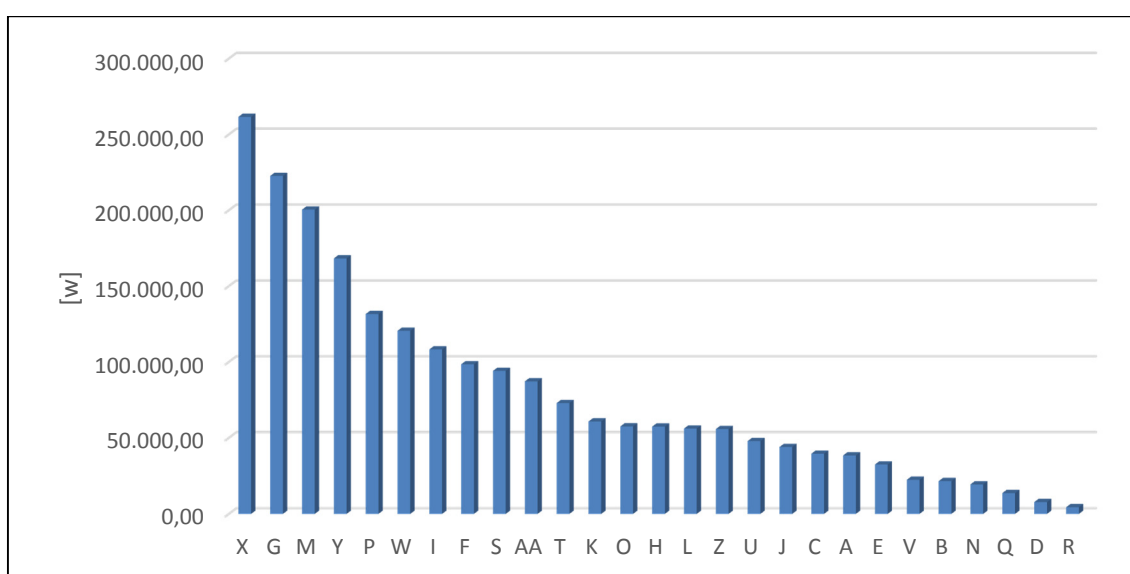


Figura 4.6 – Potência total instalada [W] por solução existente.

4.3.3 Custo Anual de Energia

Relativamente ao custo anual de energia para as soluções gerais existentes, é possível observar que os valores estão em linha com a potência total instalada (ver Figura 4.7), com algumas exceções. Por exemplo, verifica-se que a potência instalada na solução G é muito superior à potência instalada na solução I, no entanto no custo de energia elétrica verifica-se uma inversão. Tal pode significar que, apesar de um valor de potência instalado menor, a solução I apresenta valores de consumo de eletricidade superiores, dependente da utilização média diária e com o custo do kWh (de acordo com a opção contratual).

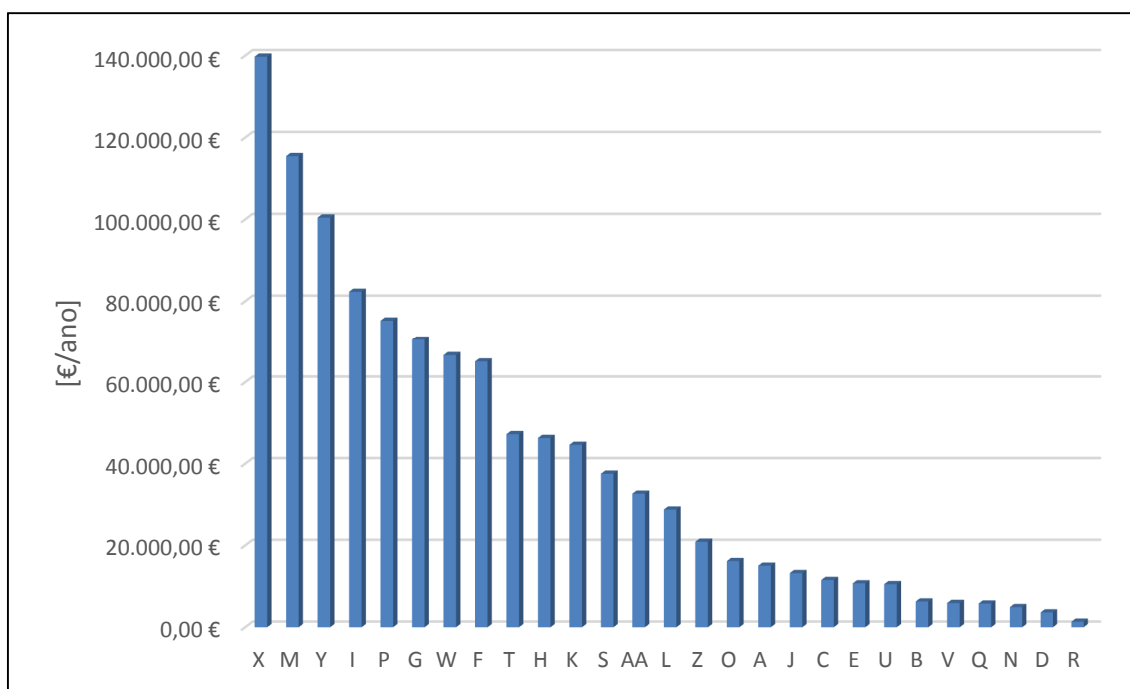


Figura 4.7 – Custo anual de energia [€/ano] por solução existente.

4.4. Caracterização das Soluções Globais Propostas

As soluções globais propostas são soluções técnico-económicas de elevado desempenho energético e foram definidas tendo em consideração as características das diferentes áreas dos edifícios (de acordo com os elementos constantes na Tabela 4.1) e os critérios e parâmetros de conceção para cada área específica (apresentados na Tabela 4.2).

4.4.1 Número Total de Lâmpadas por Tecnologia

O número total de lâmpadas por tecnologia nas soluções propostas é apresentado na Figura 4.8. A tecnologia T5 é, nas soluções propostas, a tecnologia usada em maior número, representando 56% do total de lâmpadas, seguida da tecnologia LED, com e sem sistema de controlo, com um peso de aproximadamente 42,5%. As lâmpadas fluorescentes compactas e incandescentes correspondem apenas a 1,3% nas soluções propostas.

Na Figura 4.9 apresenta-se a percentagem total de lâmpadas das soluções propostas por tecnologia e por ano de referência.

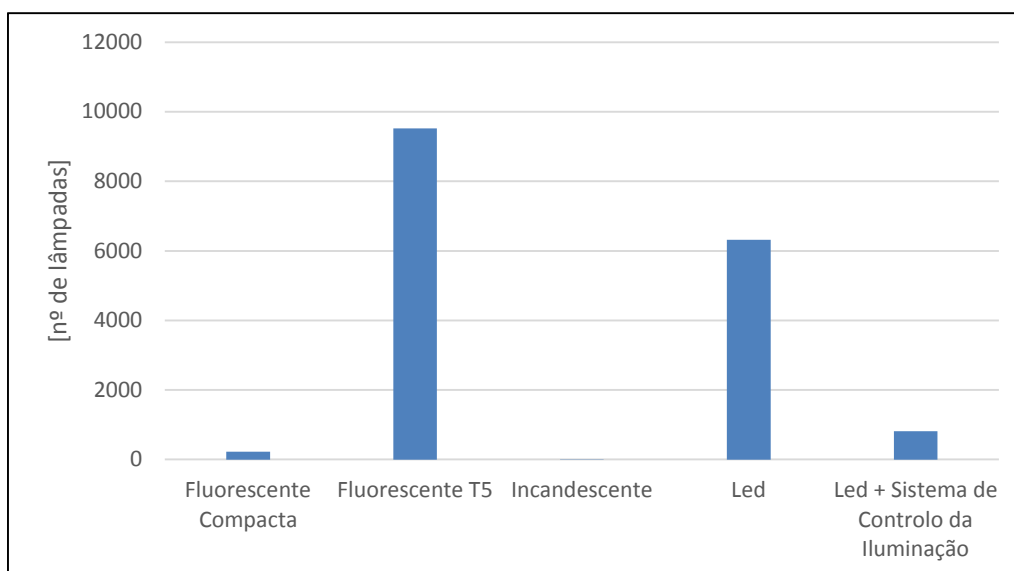


Figura 4.8 – Número total de lâmpadas das soluções propostas por tecnologia.

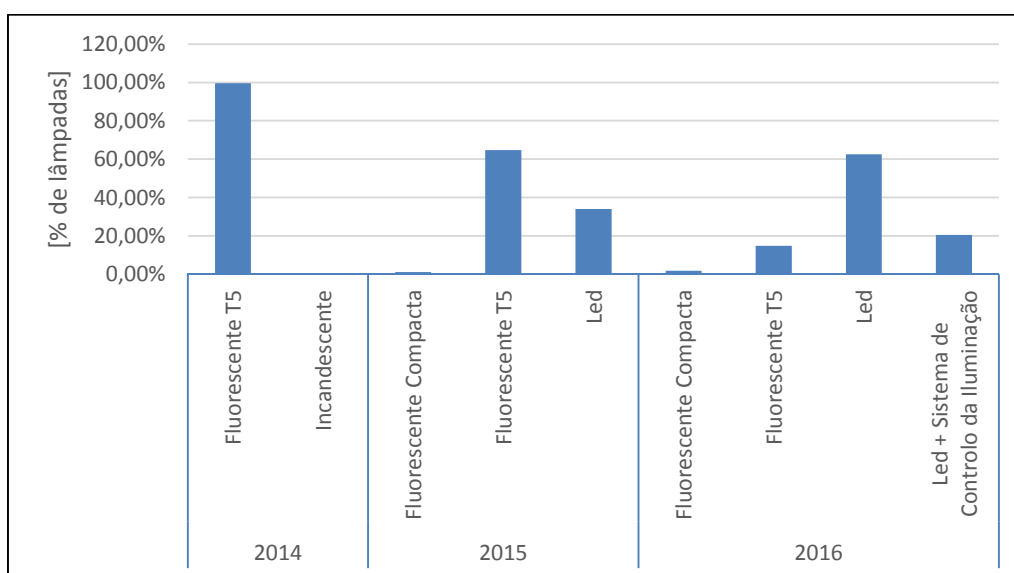


Figura 4.9 – Percentagem total de lâmpadas das soluções propostas por tecnologia e por ano de referência.

Da análise da Figura 4.9 pode concluir-se que a tecnologia T5 é a tecnologia mais usada nas soluções de iluminação propostas no ano de 2014. A partir do ano de 2015, que a tecnologia LED mostra-se gradualmente mais presente, passando a ser a tecnologia mais usada nas soluções propostas no ano de 2016. Este resultado é consistente com a evolução técnico/económica da tecnologia LED (menor potência necessária para maior fluxo luminoso e redução do custo por lúmen ao longo dos anos).

4.4.2 Potência Total Instalada

Na Figura 4.10 é apresentada a informação referente à potência total instalada por solução proposta.

Observa-se que os valores de potência total instalada estão quase todos abaixo de 60.000W, existindo duas soluções que apresentam valores muito superiores aos das restantes, correspondendo às soluções G e M, com valores de 163.944W e 92.956W respetivamente. Estas soluções já apresentavam dos valores mais elevados de potência instalada nas soluções existentes.

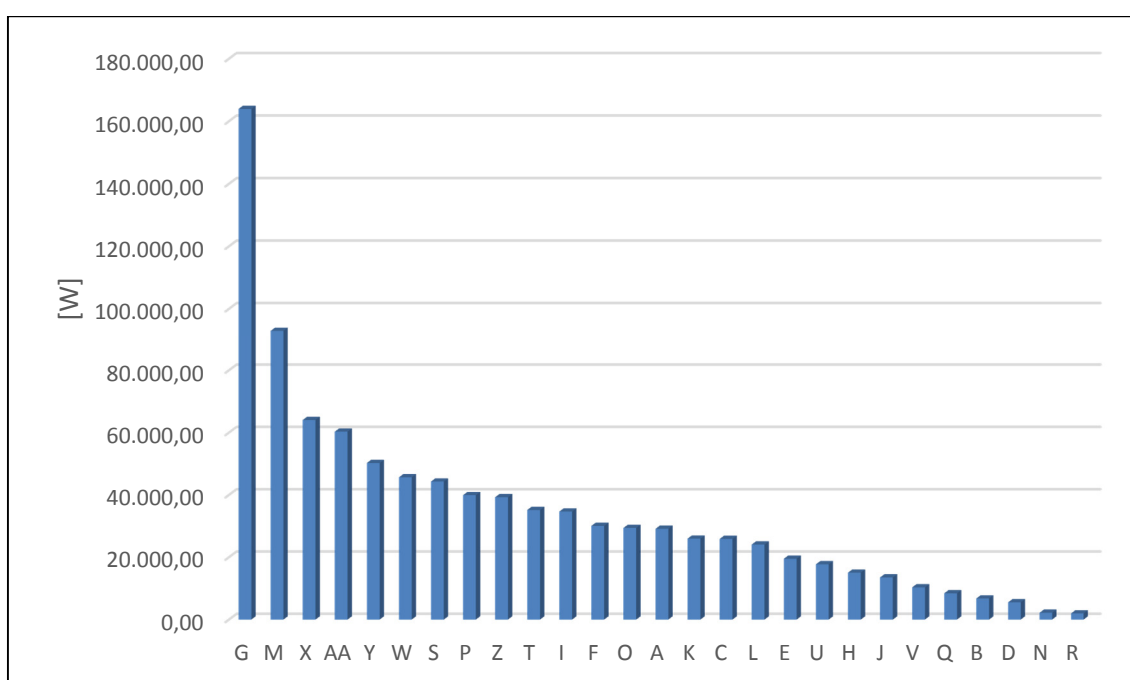


Figura 4.10 – Potência total instalada [W] por solução proposta.

4.4.3 Custo Anual de Energia

O custo anual de energia por solução proposta é apresentado na Figura 4.11. estando em concordância com a potência total instalada. O facto de nem sempre a soluções com maior valor de potência instalada corresponder maiores valores de custo anuais de energia estará relacionado com as horas médias de utilização diária das soluções de iluminação (consumo elétrico anual) e com o custo do kWh (de acordo com a opção contratual).

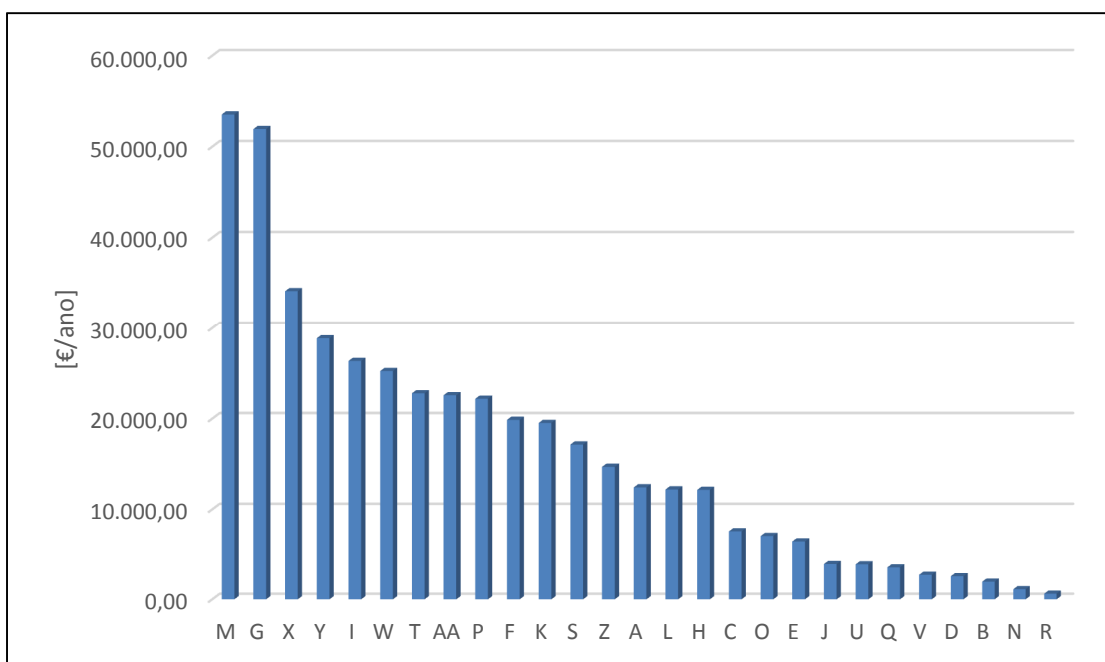


Figura 4.11 – Custo anual de energia [€/ano] por solução proposta.

4.5. Avaliação das Medidas de Iluminação Eficiente

As medidas de iluminação eficiente que foram implementadas nas soluções globais propostas por indústria foram avaliadas tendo em consideração múltiplos aspetos de avaliação (técnicos, económicos, ambientais e sociais).

4.5.1 Avaliação Técnica

Para a avaliação técnica foram definidos três indicadores para a avaliação das medidas, descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Indicadores de avaliação técnica.

Indicador	Objetivo
Consumo anual de energia [kWh/ano]	Análise comparativa da energia consumida nas soluções globais existentes e respetivas soluções globais propostas
Número de lâmpadas [unidades]	Análise comparativa do número de lâmpadas das soluções globais existentes e respetivas soluções globais propostas
Potência total instalada [W]	Análise comparativa da potência instalada nas soluções globais existentes e respetivas soluções globais propostas

4.5.1.1 Consumo Anual de Energia

Na Figura 4.12 são apresentados os valores correspondentes à redução do consumo anual de eletricidade por solução proposta.

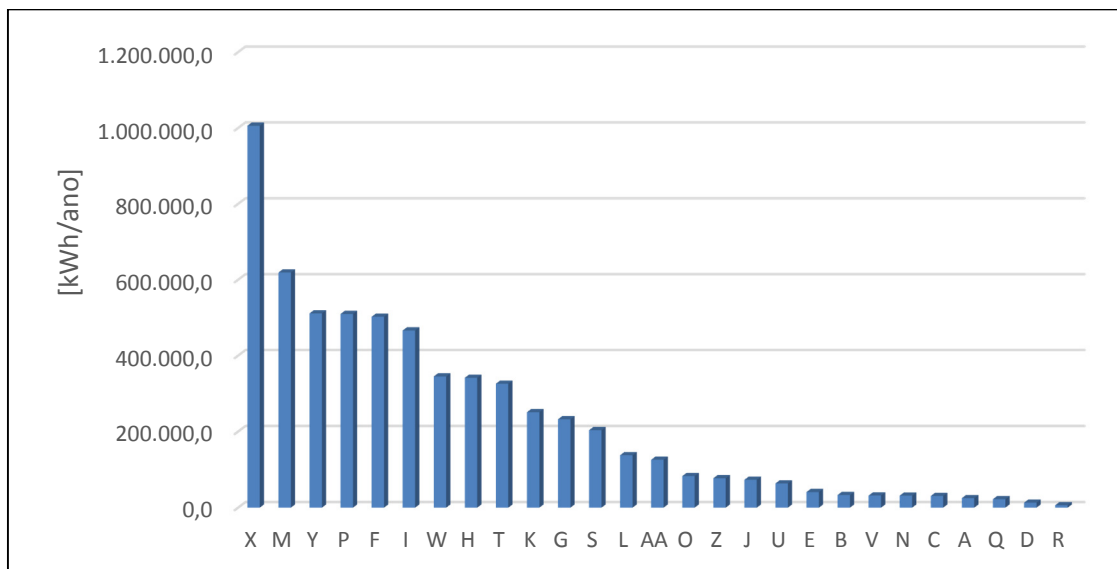


Figura 4.12 – Redução do consumo anual de energia [kWh/ano] por solução proposta.

A percentagem de redução total do consumo [kWh/ano] por solução e setor de atividade é apresentada na Figuras 4.13.

Tendo em consideração a informação disponibilizada na Tabela 4.4 e os dados fornecidos na Figura 4.13 pode verificar-se que os valores de redução de consumo de energia se situam entre 17,3% e 77,2% para a utilização da tecnologia T5, de 30,8% a 73,8% para a tecnologia LED e 75,6% para a tecnologia LED com sistemas de controlo da iluminação.

Da análise dos resultados obtidos, é possível concluir que a tecnologia T5 ainda constitui uma boa opção para a obtenção de sistemas de iluminação eficientes, apesar da tecnologia LED se encontrar na dianteira em termos de eficiência energética. É importante referir que a utilização de sistemas de controlo, juntamente com as tecnologias LED pode, em algumas situações, garantir ganhos mais elevados de eficiência.

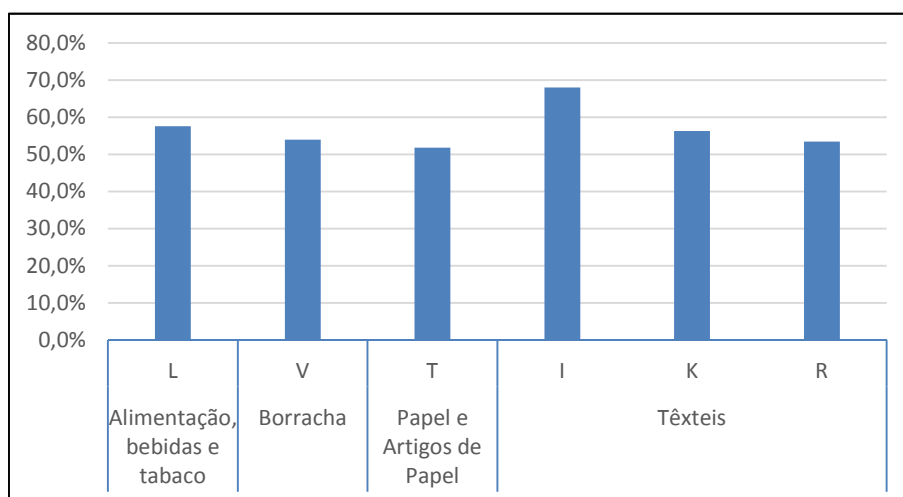
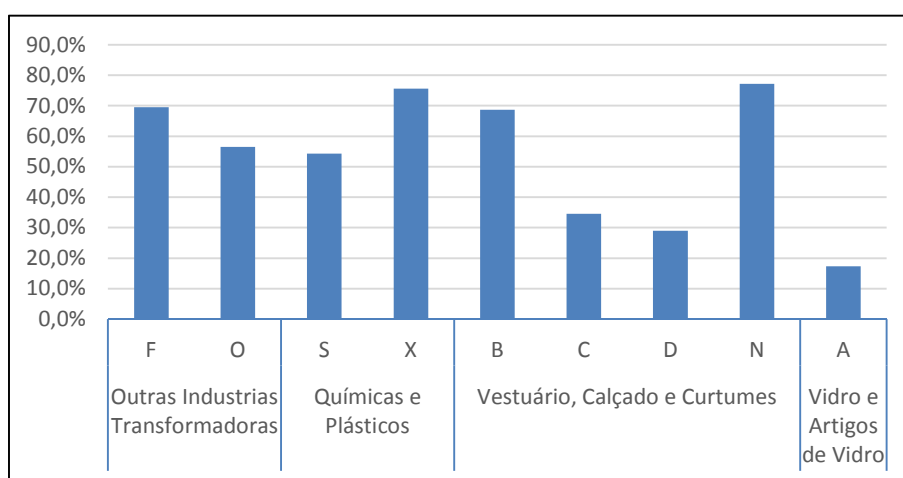
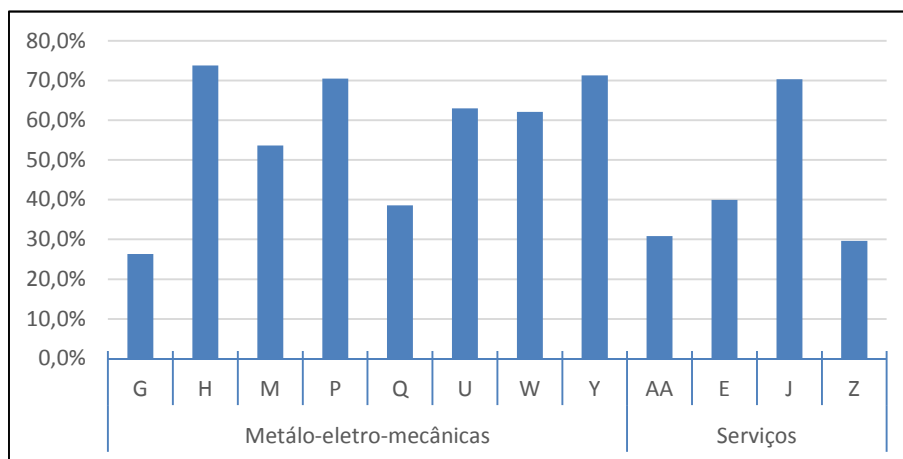


Figura 4.13 – Percentagem de redução total do consumo [kWh/ano] por solução proposta e por setor de atividade.

4.5.1.2 Número Total de Lâmpadas

A redução do número total de lâmpadas utilizadas em cada uma das soluções propostas é apresentado na Figura 4.14.

Como se pode constatar, existem soluções onde se regista um aumento do número de lâmpadas, face à correspondente solução existente. Este facto deve-se à utilização de luminárias industriais com tecnologia T5 de duas a quatro lâmpadas para substituir luminárias com apenas uma lâmpada (vapor de mercúrio, vapor de sódio ou iodetos metálicos). As soluções onde existe um aumento do número de lâmpadas dizem respeito a instalações industriais onde as áreas de armazenamento e de produção são dominantes.

Nos restantes casos, a redução do número de lâmpadas nas soluções propostas face às soluções existentes é considerável e está alinhada com a redução dos valores da potência instalada e do consumo anual de eletricidade.

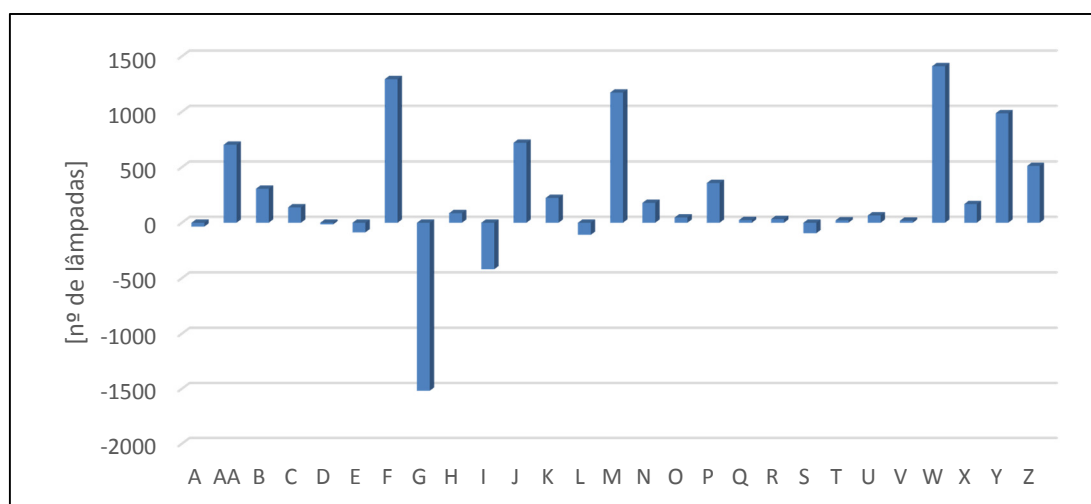


Figura 4.14 – Redução do número de lâmpadas por solução.

4.5.1.3 Potência Total Instalada

A percentagem de redução de potência total instalada por solução proposta é fornecida na Figura 4.15. A redução total de potência obtida com as novas soluções foi em média, de 54%.

Da análise dos dados da Figura 4.15 é possível constatar que existem oito soluções globais com valores de redução de potência instalada inferiores a 40%, estando as restantes soluções globais propostas com valores de redução acima dos 50%, com exceção

da solução O. Existem dezoito soluções (que correspondem a 66,6% do total de soluções propostas) do total de soluções com valores de redução superiores a 50%. O valor de redução total de potência mais elevado é de 90%, correspondendo à solução N.

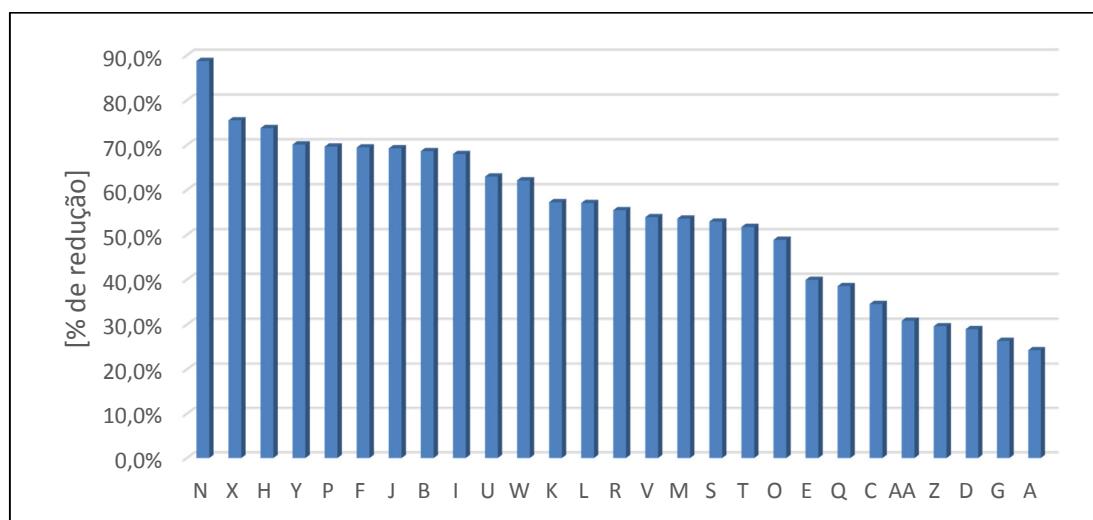


Figura 4.15 – Percentagem de redução de potência total por solução proposta.

4.5.2 Avaliação Económica

No que se refere à avaliação da atratividade económica das soluções de iluminação, sob o ponto de vista do investidor, foram considerados os sete indicadores apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Indicadores de avaliação económica.

Indicador	Descrição
Custo anual energia [€]	Custo anual de energia das soluções globais existentes e respetivas soluções globais propostas
Custo anual de manutenção [€]	Custo anual de manutenção das soluções globais existentes e respetivas soluções globais propostas
Investimento total [€]	Investimento total das soluções globais propostas
Payback [anos]	Quociente do investimento sobre o custo anual de redução da energia e de redução da manutenção.
VAL [€]	Diferença entre as entradas (poupança de eletricidade e em despesas de manutenção resultantes da adoção de um sistema de iluminação mais eficiente) e as saídas (valor do investimento na tecnologia de iluminação mais eficiente) de fluxos monetários (cash-flow), atualizados durante a vida útil do sistema de iluminação considerado.
TIR [%]	Taxa que aplicada na expressão do VAL torna o resultado nulo.
SIR	Rácio entre poupança e investimento

4.5.2.1 Custo Anual de Energia

A redução dos custos anuais de energia apresenta o valor mais elevado na solução X, com 105.627,7€/ano, sem considerar a evolução dos preços de eletricidade. Considerando ainda esta hipótese, os valores de redução do custo anual de energia atingem o valor mais baixo na solução R, com um valor de 719,67€/ano. A Figura 4.16 apresenta a poupança média anual de energia por solução, considerando os custos de eletricidade vigentes no ano do projeto.

Em termos médios, as soluções permitem gerar uma redução de 23.760,0€/ano.

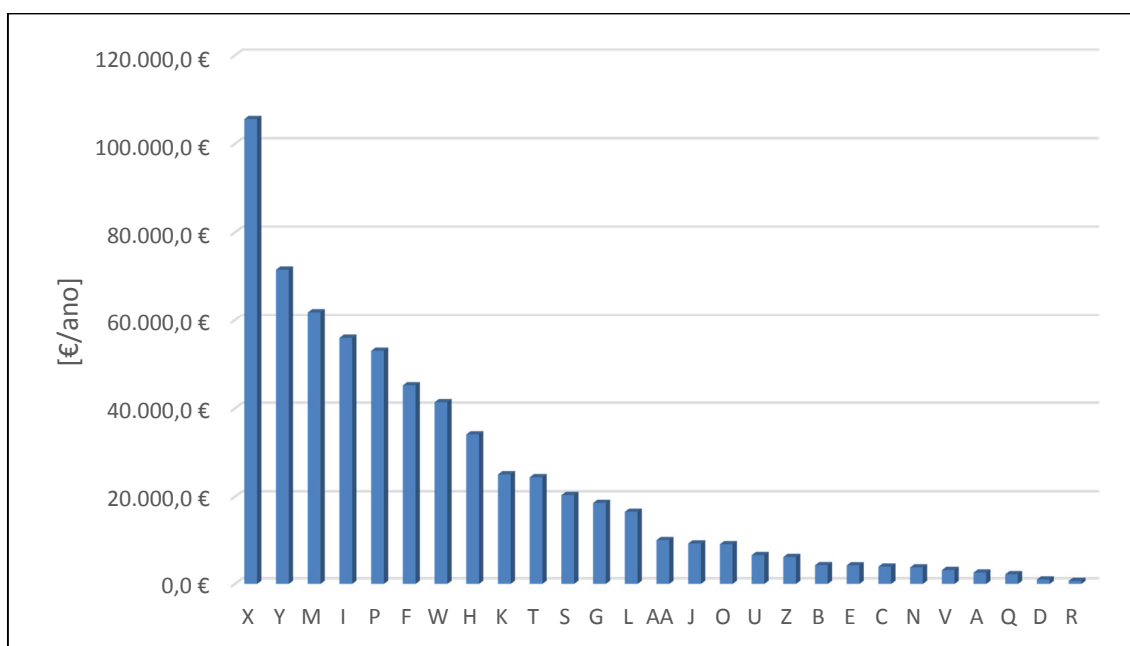


Figura 4.16 – Redução do custo anual de energia [€/ano] por solução proposta.

4.5.2.2 Custo Anual de Manutenção

A poupança anual gerada nos custos de manutenção das soluções de iluminação, varia entre 19,8€ e 28.974,6€, destacando-se os sistemas de iluminação propostos nas soluções X, P e T, correspondendo respetivamente aos setores das Químicas e Plásticos, metaló-electro-mecânicas e Têxteis (Figura 4.17). A solução X apresenta o valor mais elevado de redução do custo de manutenção, estando associado a utilização de uma solução com LED's e de sistema de controlo.

De referir que existe uma solução (G) que apresenta um aumento no custo médio de manutenção dos sistemas, estando em concordância com o aumento verificado no nº de lâmpadas proposto para essa solução, verificado no ponto 4.5.1.2.

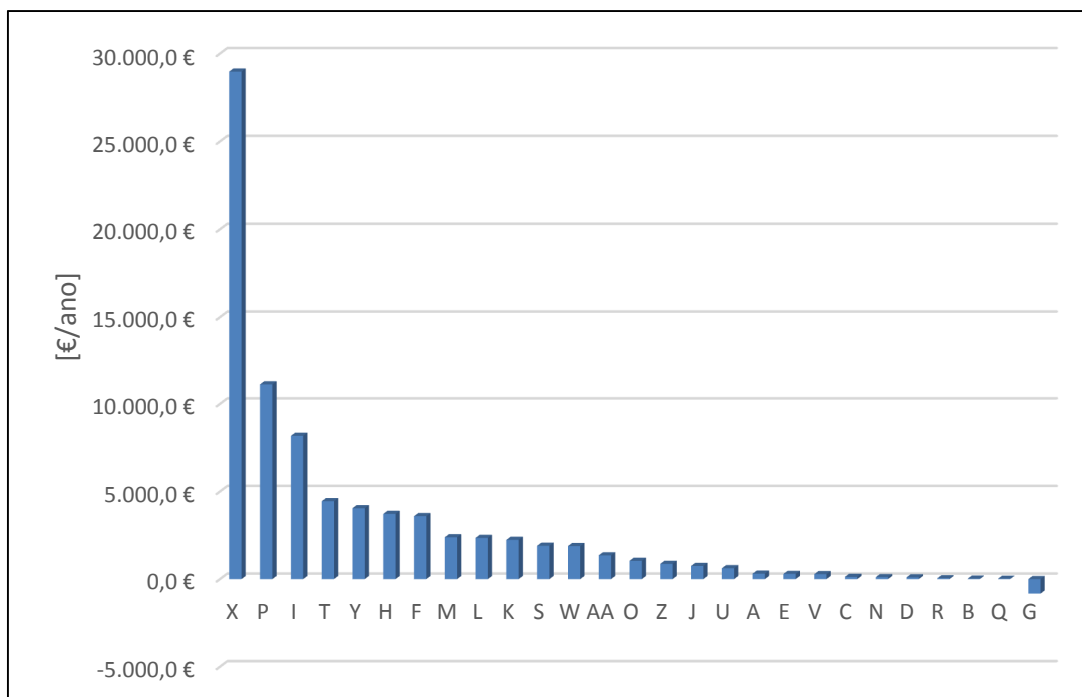


Figura 4.17 - Poupança anual de manutenção [€/ano] por solução

4.5.2.3 Investimento Total

Os valores de investimento por solução de iluminação são apresentados na Figura 4.18, devendo ser considerados com a devida reserva, dado que se referem à data da proposta das soluções, podendo ter sido alvo de descontos adicionais.

A maior parte das soluções propostas corresponde a investimentos inferiores a 100.000€, havendo apenas nove soluções com valores superiores. Em quatro das soluções propostas os valores de investimento variam entre os 191.000€ e os 364.402€. A proposta de investimento em sistemas de iluminação com valores mais elevados pertence ao sector da química e plásticos (solução X) e refere-se ao custo das luminárias Led e do respetivo sistema de controlo.

Finalmente, o investimento médio das soluções apresentadas é de 89.116,25€, considerando os preços à data das soluções.

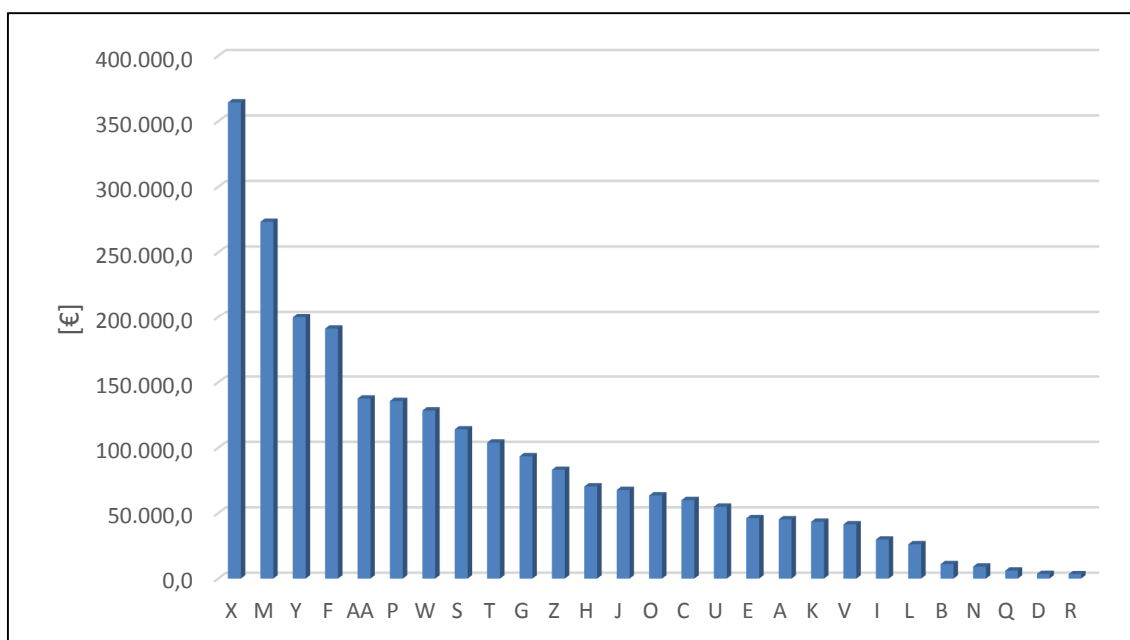


Figura 4.18 – Investimento total [€] por solução

4.5.2.4 Payback Simples

O *payback* simples é o número de anos necessário para recuperar o investimento inicial nos sistemas de iluminação, através da poupança energética e da redução de custos de manutenção inerentemente gerados com a sua implementação. Apesar de ser considerado uma boa ferramenta de análise para as soluções de investimento em iluminação, este indicador não tem em linha de conta o custo de oportunidade associado ao valor investido, tendo, sido, por isso, calculados, adicionalmente, o VAL e o SIR de cada solução.

Para o cálculo deste indicador considerou-se um aumento médio anual do custo da eletricidade de 2%. Os valores calculados para cada solução são ilustrados na Figura 4.19.

Sob este ponto de vista, as soluções G, V, E, C e A não são atrativos para o investidor uma vez que não apresentam um retorno do investimento viável.

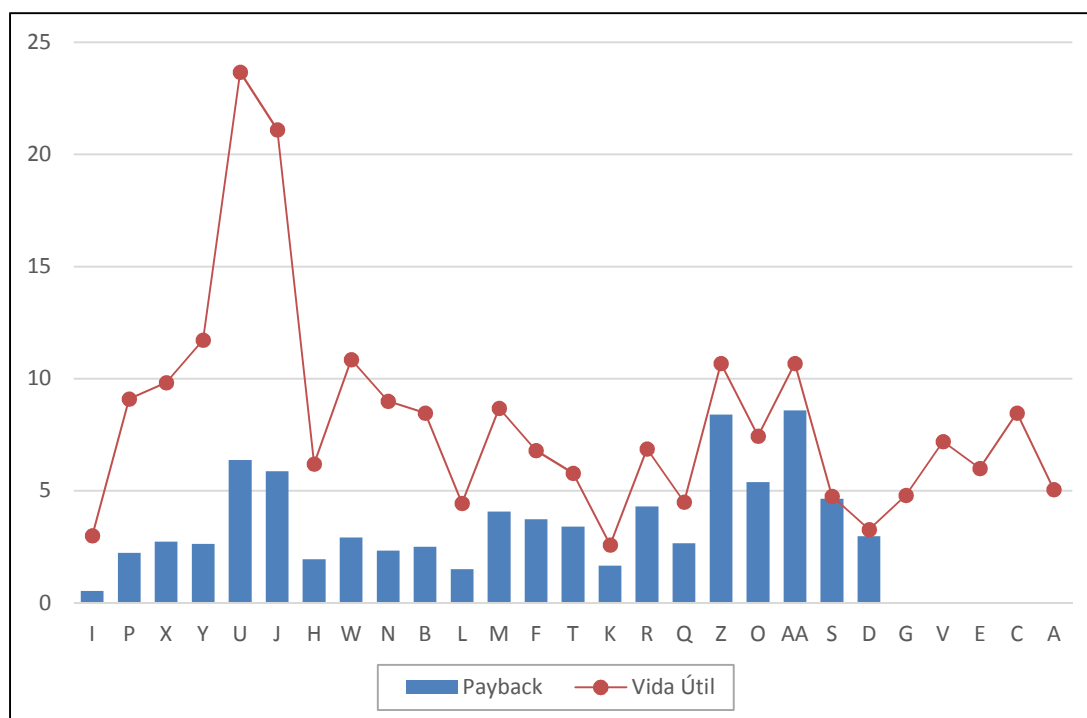


Figura 4.19 – *Payback* simples e vida útil [anos] por solução proposta.

4.5.2.5 Valor Atual Líquido

O VAL é uma medida que permite ultrapassar uma das limitações inerentes à utilização do *payback* simples como indicador de avaliação económica, dado que tem em consideração o facto de os influxos e efluxos monetários ocorrerem em momentos distintos no tempo, pois considera o valor atual dos *cash-flows* futuros.

A avaliação dos sistemas de iluminação de acordo com o VAL depende do sinal do seu resultado. Assim, se este for positivo, o projeto é viável; se for nulo, existe uma elevada probabilidade do projeto ser inviável; se for negativo o projeto é inviável. Quanto maior a taxa de atualização utilizada no cálculo do VAL, menor será o VAL obtido, uma vez que se está a exigir uma maior rendibilidade ao projeto em análise.

A fórmula utilizada para o cálculo do VAL é dada por:

$$VAL = -C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{C_f}{(1+d)^j} \quad , \quad (1)$$

onde C_f é o cash-flow no período j ; C_0 é o investimento no ano zero; d é a taxa de atualização do capital para o mesmo período; n é a vida útil do sistema de iluminação.

As soluções de iluminação foram avaliadas considerando taxas de atualização que revelam custos de oportunidade do investimento menos elevadas (2%) e mais elevadas (5%), bem como um aumento médio anual do custo da eletricidade de 2%. Os valores calculados para o VAL para as diferentes soluções encontram-se na Figura 4.20.

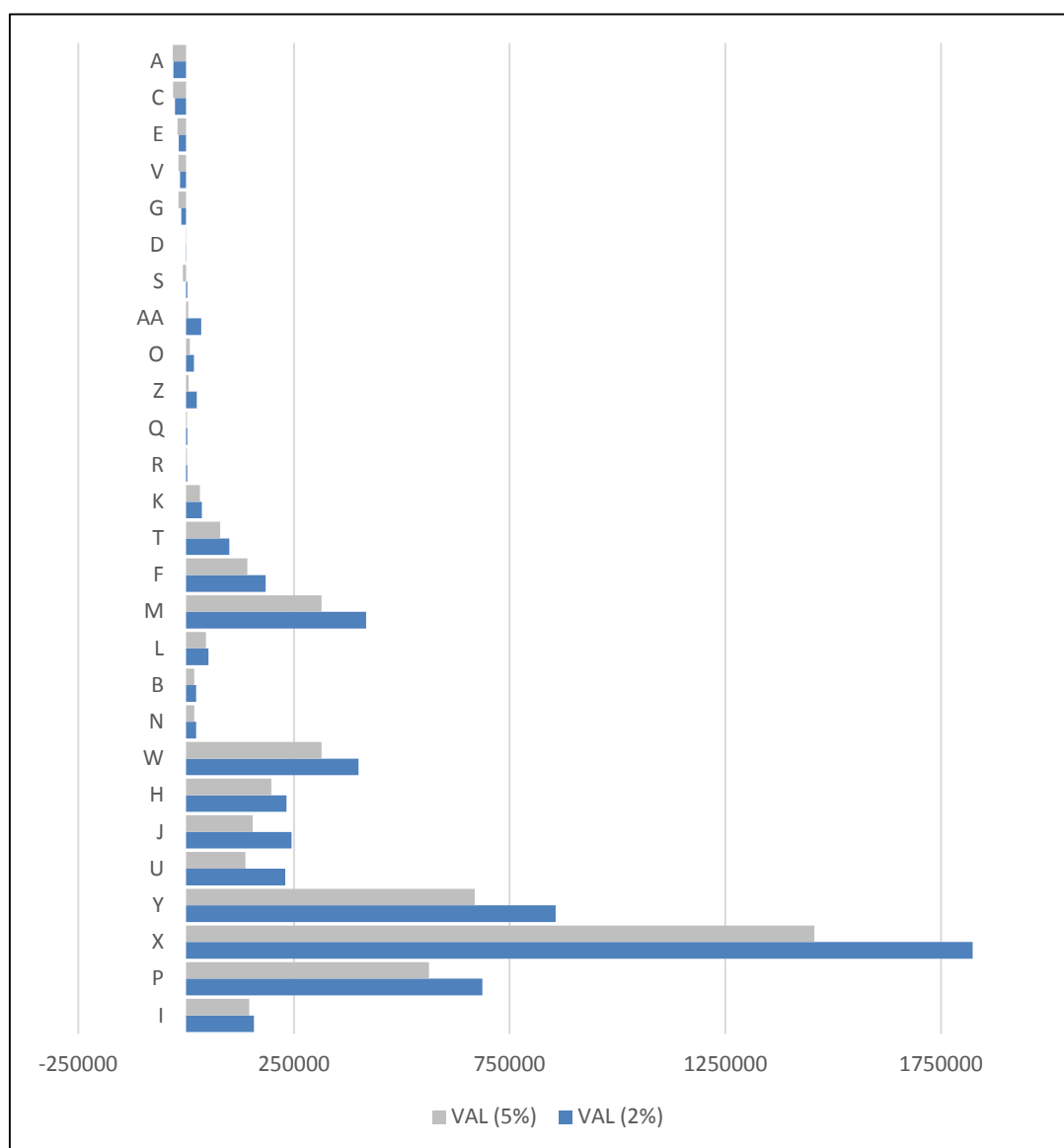


Figura 4.20 – VAL com taxas de atualização de 2% e 5% [€] por solução proposta.

Das soluções analisadas, a solução S é sensível à variação da taxa de atualização, deixando de ser viável se for considerado um custo de oportunidade do capital de 5%. As soluções D, G, V, E, C e A são inviáveis, de acordo com este critério.

4.5.2.6 Taxa Interna de Rentabilidade

A avaliação através da TIR permite analisar o interesse do investimento nos sistemas de iluminação, de acordo com os parâmetros de avaliação do mercado financeiro, o que não acontece com o VAL e com o SIR.

A fórmula utilizada para o cálculo do TIR é dada por:

$$TIR = -C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+d^*)^j} = 0 \quad (2)$$

onde d^* é a taxa aplicada na expressão anula o VAL.

A obtenção de uma TIR superior à taxa de atualização considerada no cálculo do VAL ($d_{min} = 2\%$ e $d_{max} = 5\%$) significa que a solução consegue gerar uma taxa de retorno superior ao custo de oportunidade do capital, pelo que, em princípio, a solução será, neste caso, economicamente viável. Na Figura 4.21 apresentam-se os diferentes valores obtidos para a TIR das diferentes soluções propostas.

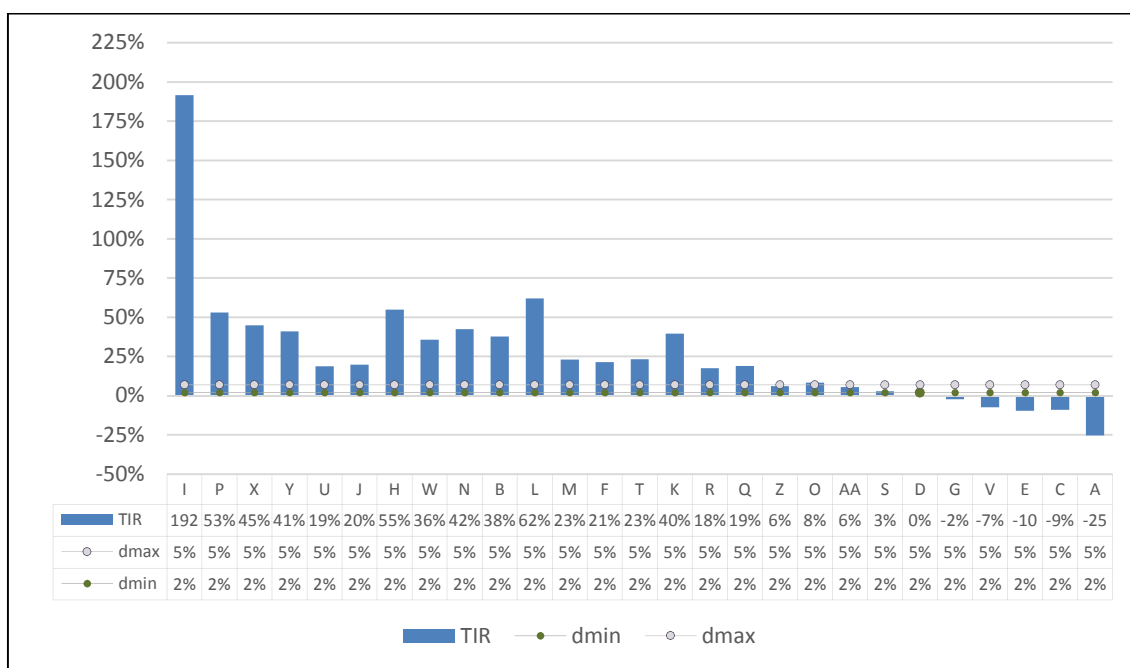


Figura 4.21 – TIR [%] por solução proposta.

Relativamente às soluções analisados, as soluções AA e Z apresentam uma TIR ligeiramente acima do limiar de 5% (custo de oportunidade do capital numa situação mais pessimista). A solução S apresenta uma TIR de 3%, ligeiramente acima da taxa de

atualização mais baixa (custo de oportunidade do capital numa situação mais otimista). As soluções D, G, V, E, C e A não são viáveis quando se compara a TIR obtida com qualquer das taxas de atualização consideradas.

4.5.2.7 Savings to Invest Ratio (Rácio entre poupança e investimento)

O SIR é uma medida de desempenho económico que relaciona a poupança atualizada atribuída à alternativa de cada solução com os custos adicionais de investimento associados a essa alternativa. Enquanto o VAL avalia o desempenho absoluto de cada solução de iluminação, o SIR avalia o desempenho relativo. Para o cálculo do SIR utiliza-se a expressão:

$$SIR = (\sum_{j=1}^n \frac{cf}{(1+d)^j})/C_0, \quad (3)$$

Considera-se que uma alternativa de solução é economicamente viável quando o SIR é maior que 1, pois nesse caso as poupanças são maiores que os custos de investimento.

Na Figura 4.22 apresentam-se os diferentes valores obtidos para o SIR das diferentes soluções propostas.

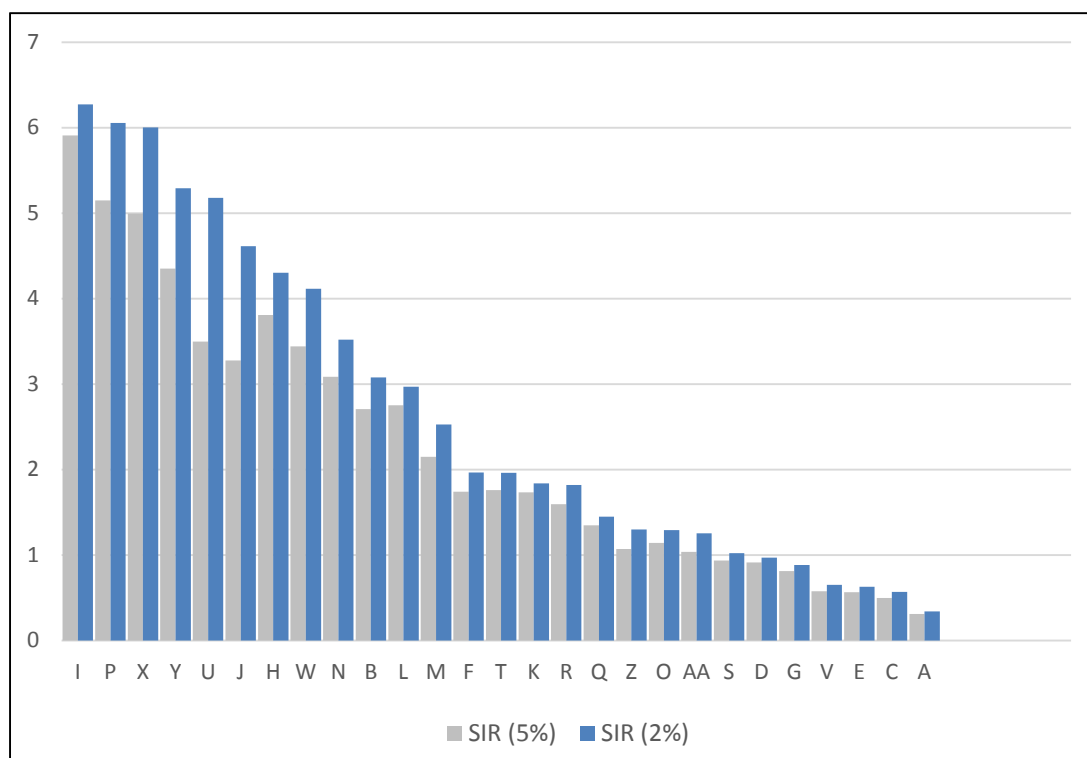


Figura 4.22 – SIR com taxas de atualização de 2% e 5% por solução proposta.

Há pelo menos uma solução (S) sensível à taxa de atualização, apresentando um SIR superior a 1 (com uma taxa de atualização de 2%) e inferior a 1 (com uma taxa de atualização de 5%). As restantes soluções mal classificadas de acordo com o SIR obtêm um VAL negativo (considerando as duas taxas de atualização do VAL) e períodos de retorno inviáveis, como seria de esperar. Não há nenhuma solução mal classificada de acordo com o SIR que considere a substituição da tecnologia existente por LED.

Há uma elevada correlação entre os valores obtidos para o SIR e para a TIR (0,71) e para o SIR e o VAL (0,67).

A Figura 4.23 ilustra a gama de variação dos indicadores económico-financeiros para a melhor e para a pior solução, de acordo com o SIR.

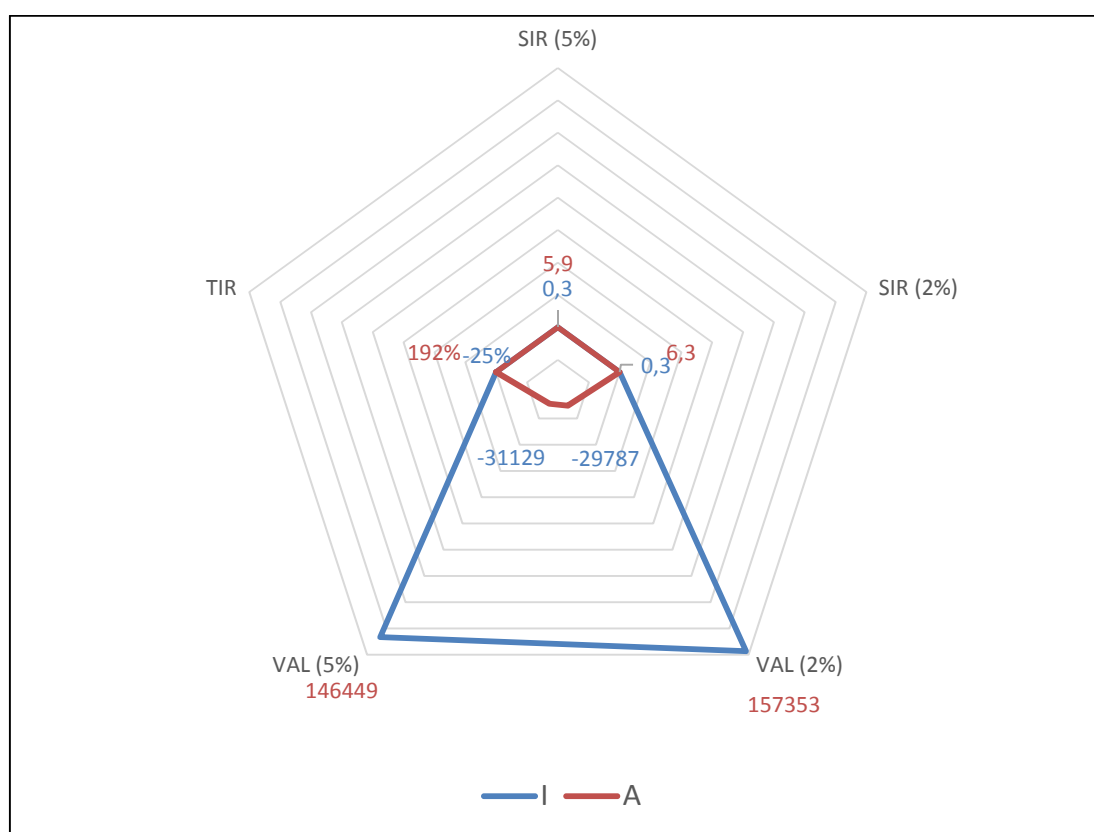


Figura 4.23 – Indicadores económico-financeiros obtidos para as soluções com o maior e o pior SIR

4.5.3 Avaliação Ambiental

No que se refere aos aspetos ambientais foi definido apenas um indicador conforme apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Indicador de avaliação ambiental.

Indicador	Objetivo
CO ₂ [kgCO ₂ /ano];	Análise comparativa do dióxido de carbono das soluções globais existentes e respectivas soluções globais propostas;

Nota: fator de conversão 0,369 [kgCO₂/kWh]

4.5.3.1 Emissões de CO₂

Os valores apresentados na Figura 4.24 estão diretamente relacionados com a redução do consumo energético obtido nas diferentes soluções globais propostas. Os valores de redução de emissões de CO₂ variam de 2.414,0 a 371.205,8 kgCO₂/ano.

Em termos médios, as soluções evitariam, caso fossem implementadas todas as soluções apresentadas, um valor na ordem de 83.536,3 kgCO₂/ano.

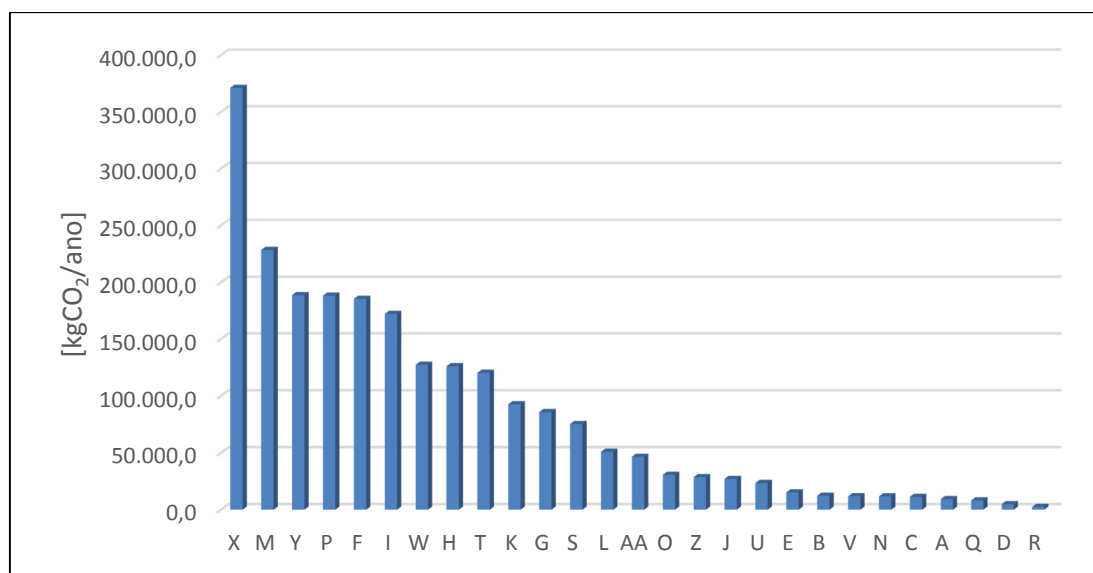


Figura 4.24 – Redução total de CO₂ [kgCO₂/ano] por solução proposta.

4.5.4 Avaliação Social

No que se refere à avaliação social, foi definido um indicador que vai permitir avaliar esse aspeto, como indicado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Indicador de avaliação social.

Indicador	Dados analisados (condicionantes)	Impactos nas soluções globais propostas
Aceitação da Solução	Níveis de iluminação existentes muito reduzidos	No caso dos níveis de iluminação existentes serem muito reduzidos, poderá implicar um aumento adicional global da solução a propor
	Limitações físicas de montagem (tetos)	Não sendo possível alterar o tipo de teto existente, este irá condicionar a luminária a propor
	Limitação técnica da instalação (alteração das instalações elétricas)	A não possibilidade de alterar as instalações elétricas pode ter impactos significativos na otimização da solução a propor em termos energéticos
	Limitação no reposicionamento das luminárias (recolocar as luminárias sem mexer na instalação)	A limitação do reposicionamento das luminárias sem alterar a instalação elétrica, pode condicionar os parâmetros de uniformidade e encandeamento
	Limitações em função do <i>layout</i> existente (máquinas, espaços de trabalho, etc)	Não sendo possível alterar o <i>layout</i> existente, a solução a propor deverá ser adaptada ao <i>layout</i> .

4.5.4.1 Aceitação da Solução

A aceitação da solução será avaliada através das condicionantes definidas na Tabela 4.8.

Foi definida uma escala de avaliação de 0 a 5 para todas as soluções propostas, sendo que cada condicionante foi ponderada com o valor de um (1) para o caso de verificar-se essa condicionante, e de zero (0) para o caso de não ser condicionante.

Em função da ponderação de todas as condicionantes, é possível avaliar a aceitação da solução proposta de acordo com a escala de ponderação apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Escala de ponderação e respetiva avaliação.

Escala Ponderação	Avaliação Condicionamento	Aceitação Social
0	Condicionamento reduzido	Sem impacto
1		
2	Condicionamento médio	Impacto moderado
3		
4	Condicionamento elevado	Impacto elevado
5		

Da análise dos valores obtidos, verifica-se que existem duas soluções extremas, uma com classificação de cinco e outra com classificação de zero.

Em termos globais, quer em número quer em percentagem, verifica-se que existem 6 soluções (22,2%) sem impacto na aceitação social, 15 soluções (55,6%) com impacto na aceitação social e 6 soluções (22,2%) com muito impacto na aceitação social (ver Figura 4.25).

Em conclusão, verifica-se que em termos de aceitação social existe uma grande parte das soluções que foram condicionadas, estando de acordo com a multiplicidade de áreas que foram analisadas em cada indústria, e as características específicas de uma instalação industrial.

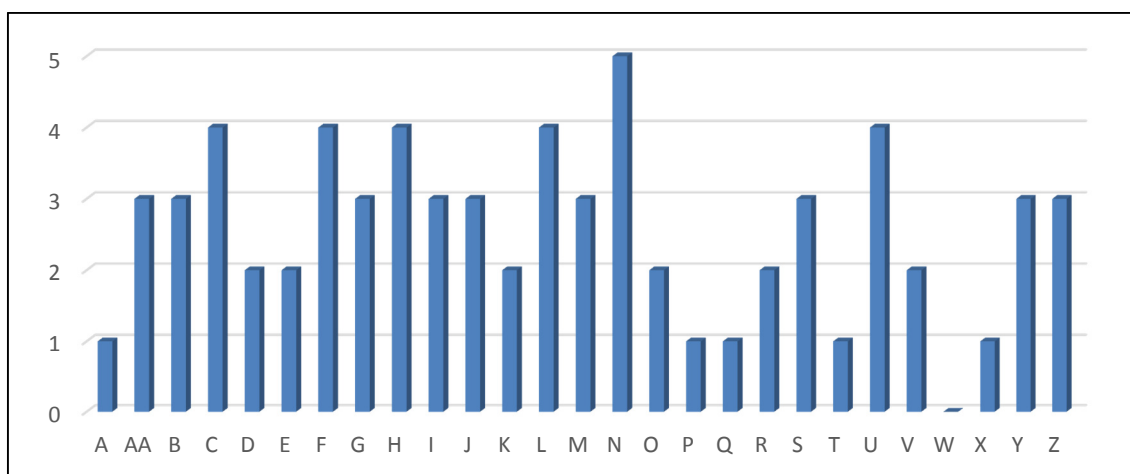


Figura 4.25 – Avaliação das soluções globais propostas em função da aceitação social.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste projeto foi proceder à avaliação do impacto resultante da adoção de medidas de iluminação eficientes em edifícios industriais. Procedeu-se à recolha de dados reais, respeitantes a sistemas de iluminação existentes em diferentes edifícios industriais, num horizonte temporal recente (2014–2016), tendo em consideração múltiplos aspetos de avaliação (técnicos, económicos, ambientais e sociais).

Neste âmbito, foram definidos diferentes indicadores para cada um dos aspetos de avaliação propostos para a análise dos sistemas de iluminação eficientes, permitindo efetuar uma análise custo-benefício de cada solução proposta.

Inicialmente, foi realizada a caracterização das soluções de iluminação existentes nas instalações industriais analisadas e, posteriormente procedeu-se à proposta de soluções de iluminação energeticamente eficientes, tendo em consideração todos os requisitos de qualidade e conceção exigidos para este tipo de sistemas.

Em termos técnicos, verificou-se a prevalência da proposta de soluções com recurso às tecnologias fluorescente T5 e LED's, tendo-se registado uma progressiva preferência por esta última tecnologia de iluminação, em particular nas soluções propostas em 2016. Esta situação deve-se à evolução registada na tecnologia LED, quer em termos do aumento da eficiência (lm/W) quer no que se refere à redução dos custos por lumens.

Após a análise de 27 propostas de sistemas de iluminação eficiente, com recurso a tecnologias de iluminação distintas, foi possível antecipar um potencial de poupança global de 6.112.413 kWh/ano, apesar das especificidade e heterogeneidade das áreas existentes nos vários edifícios industriais.

O valor de redução de consumo estimado tem associado uma redução de custos na ordem de 641.521,1€/ano, para o consumo de energia, e de 79.942,0€/ano, para os custos de manutenção.

Em geral, as soluções tidas como inviáveis de acordo com os indicadores económicos considerados (SIR, VAL, *payback* e TIR), contemplam a substituição das tecnologias existentes por tecnologias fluorescentes T5 e CFL.

As soluções que propõem a substituição de lâmpadas T5 por LED, são pouco atrativas do ponto de vista económico, dado que apresentam uma TIR ligeiramente acima do limiar de 5% (custo de oportunidade do capital numa situação mais pessimista).

Apesar da importância dos sistemas de controlo na iluminação, quer seja no conforto visual, quer na redução dos consumos ou na preservação do ambiente de trabalho, foi apenas avaliada uma proposta que envolve este tipo de solução, em 2016. Após a ordenação das 27 soluções por rácio entre poupança e investimento, esta proposta obteve a terceira melhor posição, com uma TIR de 43%, um *payback* de 2,73 anos e um VAL entre 1.456.349€ e 1.822.814€, considerando taxas de atualização de 5% e 2%, respetivamente. Ainda de acordo com a ordenação proposta, não há nenhum projeto com um rácio entre poupança e investimento inferior a um que envolva a substituição da tecnologia existente por LED.

Em termos ambientais, as vinte e sete soluções avaliadas permitiriam reduzir as emissões de CO₂ em 2.255.480,4 [kgCO₂] por ano, caso fossem implementadas.

No que se refere aos aspetos sociais, os condicionantes definidos para a aceitação social das soluções de iluminação propostas são importantes para aferir a respetiva exequibilidade e operacionalidade. Em termos globais, 21 das 27 soluções analisadas teriam impacto na aceitação social (com 6 das soluções a indicar um impacto muito significativo). No que respeita a este eixo de avaliação, há, assim, um desafio adicional que se coloca à implementação deste tipo de sistemas, explicado pela diversidade de áreas existentes em cada edifício industrial, com características muito específicas.

Apesar da literatura científica em iluminação em edifícios ser prolífera, foi possível constatar que há uma escassez de estudos publicados em soluções de iluminação para edifícios industriais.

Assim, este estudo procurou contribuir para o estado da arte, ressaltando a importância do desempenho energético de sistemas de iluminação eficientes em edifícios industriais, propondo uma análise custo-benefício com recurso a dados de soluções reais, com base em eixos de avaliação distintos, podendo ser adotada como referência em outros sistemas de iluminação a ser implementados noutros setores, nomeadamente no setor residencial.

A avaliação económico-financeira dos projetos de iluminação energeticamente eficientes procurou explorar estratégias de investimento mais conservadoras (custos de oportunidade mais elevados espelhados numa taxa de atualização de 5%) e agressivas (custos de oportunidade mais reduzidos refletidos numa taxa de atualização de 2%), tendo em consideração perspetivas de avaliação distintas, i.e. o VAL para aferir o mérito absoluto de cada projeto; o SIR para analisar o mérito relativo (tendo sido útil para ordenar os projetos em termos de viabilidade); a TIR para situar o interesse dos projetos na escala de avaliação do mercado financeiro e, finalmente, o *payback* para avaliar o tempo de retorno de cada projeto.

No futuro, pretende-se alargar o âmbito de análise das tecnologias de iluminação propostas, com recurso a outro tipo de ferramentas que permita avaliar as diferentes fases do ciclo de vida destes sistemas, desde a sua produção, instalação, até à respetiva deposição. Em Oliveira et al. (2017) e em Coelho et al. (2017) apresentamos os resultados preliminares de uma avaliação multidimensional de diferentes projetos de iluminação no setor industrial, propostos no âmbito do PPEC, com base nos dados reais aqui apresentados. A exploração dos *trade-offs* entre os diferentes eixos de avaliação considerados poderá ser realizada com base em modelos de programação matemática multiobjetivo, permitindo auxiliar os decisores de política na escolha das soluções de iluminação eficientes a apoiar, consentâneas com distintos objetivos de política energética.

O espectro de avaliação económico-social das soluções de iluminação poderá ser alargado de modo a contemplar o impacto das medidas adotadas no Produto Interno Bruto do país e na criação de emprego.

Seria igualmente interessante avaliar o impacto da utilização de tecnologia LED nas soluções propostas antes do aumento da taxa de penetração desta tecnologia, no ano 2014, bem como avaliar projetos respeitantes à iluminação exterior afeta aos edifícios industriais, contribuindo para uma análise mais completa e abrangente.

Finalmente, será importante avaliar, nos edifícios em que as soluções de iluminação propostas foram efetivamente implementadas, eventuais desvios da realidade em relação às projeções aqui efetuadas, com recurso a instrumentos de verificação e de medição, passíveis de aferir os níveis de iluminação, consumos, redução de custos de manutenção, com vista a aumentar o grau de credibilidade de projeções futuras.

REFERÊNCIAS

ACEEE (2010). Lighting the Way to Best Practices – ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.

<http://aceee.org/files/proceedings/2010/data/papers/2111.pdf> (acedido em agosto 2016).

ADENE (2015). Agência para a Energia, Energy Efficiency trends and policies in Portugal. <http://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-portugal.pdf> (acedido em agosto 2016).

AEP (2011). Associação Empresarial de Portugal. Casos de Excelência de Práticas Ambientais e de Eficiência e Racionalização Energéticas nas Empresas Portuguesas.

AEP (2015). Associação Empresarial de Portugal. Efinerg 2 – Eficiência Energética na Indústria - Plano Setorial de Melhoria da Eficiência Energética em PME. Impressão e Reprodução de Suportes Gravados, junho de 2015.

APREN (2016). Associação para as Energias Renováveis, Estratégia Nacional para a Energia 2020. <http://www.apren.pt/pt/dadostecnicos/index.php?id=206&cat=197> (acedido em agosto 2016).

CEIC (2011). Clean Energy Innovation Centre, Commercial and Industrial Building Lighting Efficiency. http://www.led4life.net/wp-content/uploads/2012/05/Uni-NewcastleT16_Building_lighting_efficiency_v0.9-1.pdf (acedido em agosto, 2016).

Chen, Y., Liu, J., Pei, J., Cao, X., Chen, Q., and Jiang, Y. (2014). Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential. *Energy and Buildings*, 73, 184-191.

Coelho, Dulce, Henriques, Carla and Cardoso, Hugo (2017). Impacts of Energy Efficient Lighting Systems in Industrial Buildings – An IO LCA Approach. 3rd International Conference on Energy and Environment: bringing together Engineering and Economics, Porto, Portugal, 29-30 June, 2017 (aceite).

COP21 (2015). Global Lighting Challenge Launched at COP21. <http://www.globallightingchallenge.org/Latest/Global%20Lighting%20Challenge%20Launched%20at%20COP21> (acedido em fevereiro 2017).

DGEG (2014). Direção Geral de Energia e Geologia, Documento Metodológico – Balanço Energético – Versão 1.0. www.dgeg.pt (acedido em agosto 2016).

DGEG (2014a). Direção Geral de Energia e Geologia, Indicadores Energéticos da Direção de Serviços de Planeamento Energético e Estatística. www.dgeg.pt (acedido em agosto 2016).

EC (2016). European Commission, Energy Strategy: Secure, competitive, and sustainable energy. <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy> (acedido em dezembro 2016).

EFINERG (2015). Eficiência Energética na Indústria, Estratégia de Eficiência Energética em PME. <http://efinerg.aeportugal.pt/documents/EFINERG2> (acedido em junho 2016).

EIA (2016). U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2016. <http://www.eia.gov/outlooks/ieo> (acedido em novembro 2016).

EIA (2016a). U.S. Energy Information Administration, Electricity Explained: Use of Electricity. http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=electricity_use (acedido em janeiro 2017).

EN 12464-1 (2011). European Standard – European Committee for Standardization (CEN), Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.

ERSE (2017). Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica.. <http://www.erse.pt/pt/planodepromocaodaeficiencianoconsumoppec> (acedido em fevereiro 2017).

Halonen, L., Tetri, E. and Bhusal, P., (2010). “Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings”, Aalto, Finland: Aalto University.

Henriques, C. O., D. Coelho and H. Cardoso (2017). A Multidimensional Assessment of Efficient Lighting Technologies in the Industrial Sector. ES2DE 2017 IEEE International Conference in Energy and Sustainability in Small Developing Economies, 10 - 13 July, 2017, Madeira, Portugal (submetido).

IEA (2006). International Energy Agency. LIGHT'S LABOUR'S LOST. Policies for Energy efficient Lighting. OECD/IEA, Paris, 2006.

IEA (2012). International Energy Agency. Energy Management Programmes for Industry. Gaining through saving. IEA Publications, Paris, France, April 2012.

IEA (2013). International Energy Agency. Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities to 2050. OECD/IEA, Paris, 2013.

IEA (2015). International Energy Agency. Energy Efficiency Market Report 2015. Market Trends and Medium-Term Prospects.

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MediumTermEnergyefficiencyMarketReport2015.pdf> (acedido em outubro 2016).

IEA (2016). International Energy Agency. Energy Efficiency – Lighting: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/subtopics/lighting/> (acedido em agosto 2016).

LE (2016). LIGHTINGEUROPE the voice of the lighting industry, Strategic Roadmap 2025. <http://www.lightingeurope.org/strategic-roadmap> (acedido em dezembro 2016).

LE (2016a). LIGHTINGEUROPE the voice of the lighting industry, LIGHTINGEUROPE position on Lighting System Design Energy Label as policy option in the ENER Lot 37 study on lighting systems. http://www.lightingeurope.org/uploads/files/LightingEurope-Position_on_energy_label_for_lighting_system_design-July_2016_.pdf (acedido em dezembro, 2016).

Licht (2016a). Lighting Cost. <http://en.licht.de/en/lighting-for-professionals/lighting-design/lighting-costs/> (acedido em junho 2016).

Licht (2016b). Lighting Quality Features. <http://en.licht.de/en/lighting-know-how/lighting-quality/lighting-quality-features/> (acedido em junho 2016).

Licht (2016c). Lighting with Artificial Light, http://en.licht.de/fileadmin/shop-downloads/1608_1w01_E_Artificial_Light_web.pdf (acedido em junho 2016).

Licht (2016d). Industry and Trade, the licht.de series of publications. http://en.licht.de/fileadmin/shop-downloads/lichtwissen05_industry_trade.pdf, (acedido em junho 2016).

Licht (2016e). Guide to DIN EN 12464-1, the licht.de series of publications. <http://en.licht.de/fileadmin/shop-downloads/Guide-DIN-EN-12464-1.pdf> (acedido em junho 2016).

Liisa Halonen, Eino Tetri and Pramod Bhusal (2010). Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings. Espoo, Finland: Department of Electrical Engineering, Aalto University.

McKinsey and Company (2012). “Lighting the way: Perspectives on the global lighting market”, Second edition, August 2012.

Portaria n.º 349D (2013). Portaria n.º 349D/2013, de 2 de dezembro. Diário da República, 1.ª série — N.º 233 — 2 de dezembro de 2013.

Portugal, B. C. S. D. (2005). Manual de boas práticas de eficiência energética. Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável/Universidade de Coimbra.

RCM n.º 20 (2013). Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, de 10 de abril. Diário da República, 1.ª série — N.º 70.

RCM n.º 29 (2010). Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, de 15 de abril. Diário da República, 1.ª série — N.º 73.

Salata, F., de Lieto Vollaro, A., and Ferraro, A. (2014). An economic perspective on the reliability of lighting systems in building with highly efficient energy: A case study. *Energy Conversion and Management*, 84, 623-632.

Simonson, Kevin (2012). Commercial and Industrial Lighting Buyers' Guide Center for Energy Innovation, September 2012. Obtido em: http://www.lpea.com/pdf/rebates/CI_lighting_buyers_guide.pdf.

Simson, R., Fadejev, J., Kurnitski, J., Kesti, J., and Lautso, P. (2016). Assessment of Retrofit Measures for Industrial Halls: Energy Efficiency and Renovation Budget Estimation. *Energy Procedia*, 96, 124-133.

SSLHB (2009). The SLL Lighting Handbook, The Society of Light and Lighting. Obtido em: <http://www.cibse.org/Society-of-Light-and-Lighting-SLL/Lighting-Publications>.

van Bommel, I. W., van den Beld, I. G., and van Ooyen, I. M. (2002). Industrial lighting and productivity. Philips Lighting, The Netherlands, 20.

Voltimum (2010). Voltimum Portugal. Case Study – Exemplo de instalação de Iluminação. <http://www.voltimum.pt/artigos/projectos/case-study-exemplo-de-instalacao-de-iluminacao> (acedido em dezembro 2016).

Wang, L., Li, H., Zou, X., and Shen, X. (2015). Lighting system design based on a sensor network for energy savings in large industrial buildings. *Energy and Buildings*, 105, 226-235.

Wang, X., Kendrick, C., and Ogden, R. (2009). Influences of lighting control and natural ventilation on energy use and overheating for a day-lit industrial building. In *Proceedings of Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, pp. 1650-1654.