



***Medidas de Eficiência Energética na
Iluminação Integrando Luz Natural***

Filipe Lopes de Pinho Latourrette Alves

**Licenciado em Engenharia Electrotécnica pela Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto**

**Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestrado
integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de especialização de Energia)**

Porto, Março de 2008



Medidas de Eficiência Energética na Iluminação Integrando Luz Natural

Filipe Lopes de Pinho Latourrette Alves

Licenciado em Engenharia Electrotécnica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestrado integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (Área de especialização de Energia)

Dissertação realizada sob a supervisão de Professor Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro

(O Presidente do Júri, Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva)

Porto, Março de 2008

ABSTRACT

The energy crisis which affects the society nowadays claims for a rational utilization of energy. The lighting systems responsible for big share of the consumed energy become one of the main targets in the search for energy efficiency and the natural light is one of the factors that contribute most for obtaining an energy efficient system.

The current work aims to develop the energy-efficiency field in the specific area of lighting, combining artificial and daylight, proposing a methodology to estimate the potentiality of use of the natural light through the use of automatic control systems. There are still few systematic studies which take into account the influence of the sun in lighting, therefore it is necessary the development of new methodologies, technologies that can be used and technical solutions to assess the economic and energetic impact in lighting, through the integration of daylight.

The first phase consists in the characterization of the existing methods and outside lighting environment and in the evaluation both qualitative and quantitative of the level of natural light inside a compartment. Then the technologies and processes for integration of daylight are identified. On a second phase the proposed method is described, in which a mathematical modeling is explained to calculate the lighting system integrating of the natural light, and then the economic and energy saving benefits are evaluated. Finally is materialized a Case Study.

RESUMO

A crise energética pela qual a sociedade atravessa nos dias de hoje obriga a utilização racional da energia. Os sistemas de iluminação responsáveis por grande parte da energia consumida tornam-se um dos principais alvos na busca da eficiência energética e a luz natural um dos factores que mais contribuem para se obter um sistema energeticamente eficiente.

Propõe-se com o presente trabalho desenvolver a vertente da eficiência energética na área da iluminação, integrando a luz natural, criando para este efeito uma metodologia para estimar a potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controlo integrando a iluminação natural. Sendo ainda poucos os estudos que tomam em consideração da influência do sol na iluminação, justifica-se o desenvolvimento de metodologias, tecnologias que possam ser utilizadas e soluções técnicas que avaliem o impacto económico e energético na iluminação, através da integração da iluminação natural.

Numa fase inicial identifica-se o estado da arte onde se descreve os métodos existentes, caracteriza-se o ambiente exterior de iluminação e avalia-se a nível qualitativo e quantitativo a iluminação natural no interior de um compartimento. Em seguida identificam-se tecnologias e processos para integração da iluminação natural. Numa segunda parte do trabalho descreve-se a metodologia proposta onde se caracteriza a ferramenta de cálculo matemático criada para a simulação e estimativa dos benefícios económicos da utilização das tecnologias de integração da iluminação natural. Por fim materializam-se uns *Casos de Estudo*.

Palavras-chave:

Iluminação natural; Eficiência Energética; *Daylight systems*; Iluminação de interiores; Conforto Visual; Consumo, Energia; *Daylighting*;

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família, em especial aos meus pais e irmã. Por todo o apoio que me deram...

Ao meu Orientador, Professor Cláudio Monteiro, por toda a disponibilidade e por ter aceitado este desafio.

Ao Professor Armínio Teixeira, por toda a ajuda que me deu.

Ao Eng. Paulo Vaz e ao Eng. João Lopes pela informação que me disponibilizaram.

E aos meus amigos...

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABELAS	6
ACRÓNIMOS	6
1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 Enquadramento.....	8
1.2 Motivação e Objectivos.....	11
1.3 Estrutura	12
2. Estado da Arte do Cálculo Luminotécnico.....	14
2.1 Caracterização de Iluminação do Ambiente.....	14
2.1.1 Modelos de Céu Standard	15
2.1.1.1 Céu Encoberto-Padrão da CIE	16
2.1.1.2 Céu Limpo-Padrão da CIE.....	16
2.1.1.3 Céu Intermédio.....	17
2.2 Avaliação Quantitativa da Iluminação Natural	18
2.2.1 Método do Factor de Luz do Dia (FLD)	19
2.2.2 Métodos de Medição do FLD.....	20
2.2.2.1 Método Tradicional.....	21

2.2.2.2 Método Alternativo 1	22
2.2.2.3 Método Alternativo 2	23
2.2.2.4 Método Alternativo 3	24
2.3 Aspectos Qualitativos da Iluminação Natural	25
2.3.1 Desempenho Visual	25
2.3.2 Conforto Visual	26
2.3.3 Encandeamento Devido à Luz Natural	28
2.3.4 Luz Solar Directa	29
3. Tecnologias de Integração da Iluminação Natural	30
3.1 Sistemas Automáticos de Controlo	31
3.1.1 Sistema Digital de Regulação de Fluxo Luminoso	31
3.1.2 Sistema Automático ON/OFF com sensor de presença	33
3.2 Condução de Luz	34
3.2.1 Poço ou Prisma de Iluminação	34
3.2.2 Átrio	35
3.2.3 Prateleiras de Luz	36
3.2.4 Sistema de Tubo Reflector	38
3.2.5 Sistema de Fibras Ópticas	40
3.3.5 Heliostatos	42
4. Metodologia de Integração da Iluminação Natural	43

4.1 Ambiente Exterior	45
4.2 Necessidades e Caracterização do Ambiente Interior	45
4.3 Funcionalidades das TIIN	46
4.4 Cálculo do Factor de Luz do Dia (FLD)	46
4.4.1 Condições de Validade das Medições.....	48
4.4.2 Factor de Luz do Dia Médio (FLDM)	49
4.5 Eficiência Energética das TIIN.....	51
4.5.1 Sensor Fotoeléctrico com Regulação	52
4.5.2 Sensores de Presença ON/OFF.....	58
4.5.3 Condução de Luz	58
5. Casos de Estudo.....	59
5.1 Sensor Fotoeléctrico com Regulação	60
5.1.1 Local de Estudo	60
5.1.2 Características Interiores	61
5.1.3 Resultados do Cálculo Luminotécnico.....	62
5.1.4 Estudo Económico.....	65
5.2 Controlo Automático ON /OFF Sensor de Presença	67
5.3 Condutores de Luz.....	67
5.4 Exemplos de Casos Práticos Já Realizados	68
5.4.1 Escritório da fábrica EADS-CASA	68

5.4.2 Edifício de escritórios da torre AGBAR	69
6. Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento	71
Bibliografia e Referências	74
Anexos	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Consumos de Energia desagregados por utilização: Serviços.....	10
Figura 2 – Distribuição Europeia de radiação solar.....	14
Figura 3 – Modelos de Referência para a caracterização de céus[14].....	15
Figura 4 – Ilustração do Céu Encoberto-Padrão da CIE [6].	16
Figura 5 - Ilustração do Céu Limpo-Padrão da CIE [6].	17
Figura 6 – Componentes do FLD [22].....	20
Figura 7 – Método tradicional [6].....	21
Figura 8 – Método alternativo 1 [6].....	22
Figura 9 - Método alternativo 2 [6].....	23
Figura 10 – Método alternativo 3 [6].....	24
Figura 11 – Limites do conforto visual [40].....	28
Figura 12 – Posição adequada para um ecrã [40].....	29
Figura 13 – Ilustração de um sistema de regulação automático.....	32
Figura 14 – Ilustração da aplicação do sensor fotoelétrico.....	33
Figura 15 – Poço de iluminação no centro do volume.....	34
Figura 16 – Átrio numa praça de alimentação.....	35
Figura 17 – Corte esquemático de uma prateleira.....	36
Figura 18 – Tipologias de prateleiras de luz.....	37
Figura 19 – Ilustração detalhada de um tubo reflector	38
Figura 20 – Exemplo de aplicações.....	39
Figura 21 – Ilustração de um sistema de fibras ópticas.....	40
Figura 22 – Sistema de fibras ópticas com difusores.....	41
Figura 23 – Ilustração dos difusores.....	41
Figura 24 – Exemplos ilustrativos do heliostato.....	42
Figura 25 – Fluxograma da metodologia proposta.....	44
Figura 26 – Ilustração do ângulo de céu visível.....	45
Figura 27 – Ilustração do cálculo do FLD [40].....	48
Figura 28 – Ilustração do significado físico do FLDM.....	49
Figura 29 – Ilustração do factor de transmissão luminosa.....	50
Figura 30 – Relação entre poupança energética e o FLD.....	51
Figura 31 – Divisão por áreas.....	52
Figura 32 – Disponibilidade de luz exterior em função da latitude [2].....	55
Figura 33 – Sala de projectos.....	60
Figura 34 – Ilustração da sala através do DIALux.....	61
Figura 35 – Esquema do sistema de regulação [2].....	68
Figura 36 - Esquema do sistema de regulação [2].....	69
Figura 37 - Poupança energética.	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Factores de transmissão luminosa [40].....	50
Tabela 2 – Características da Sala.....	53
Tabela 3 – Leitura da Figura 32.....	56
Tabela 4 – Cálculo da Energia consumida.....	57
Tabela 5 – Características da Sala.....	62
Tabela 6 – Valores base para o cálculo luminotécnico.....	63
Tabela 7 – Leitura da Figura 32.....	63
Tabela 8 – Cálculo da Energia consumida.....	64
Tabela 9 – Investimento.....	65
Tabela 10 – Resultados económicos.....	66

ACRÓNIMOS

BRE - *Building Research Establishment*

CIE - *Commission Internationale d'Éclairage*

DSI –*Digital Serial Interface*

TIIN – Tecnologias de Integração da Iluminação Natural

FLD – Factor de Luz do Dia

MTF – Método de Transferência de Fluxo

LFT – Luminância de Fundo da Tarefa

FRC – Factor de Restituição do Contraste

FEI – Factor de Encandeamento Incapacitador

FAT – Factor da Adaptação Transiente

SDRFL – Sistemas Digitais de Regulação de Fluxo Luminoso

1. Introdução

Enquadramento, objectivos, motivação e estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento

A luz natural foi sempre utilizada como principal fonte de iluminação. A sua grande rival surgiu em 1938 com o aparecimento da primeira lâmpada fluorescente com aplicações práticas que, devido ao seu grande aumento a nível de eficiência e por se tornar numa fonte de luz previsível, passou a competir com a luz do Sol. Desde então começou-se a considerar a luz eléctrica como uma fonte primária, enquanto a luz natural, com este desenvolvimento e aperfeiçoamento das fontes de iluminação artificiais, deixou de ter a relevância que tinha nos projectos de iluminação.

Porém, desde 1973 que o interesse pelo aproveitamento da iluminação natural renasceu, como resultado das várias crises petrolíferas cujos efeitos se reflectiram na necessidade de racionalização dos consumos energéticos. A importância crescente dos aspectos ligados à ecologia e ao ambiente, a procura de uma eficiência energética mais apurada e ao desenvolvimento sustentado, têm contribuído igualmente para que a iluminação natural tenha vindo, progressivamente, a reassumir um papel preponderante. Desta forma, a luz natural passa a ser novamente considerada, nos dias de hoje, como uma fonte de iluminação importantíssima. Entre os elementos tecnológicos que estão a tornar possível esta retoma de espaço destacam-se: o surgimento de sistemas automáticos de controlo, sistemas de condução da iluminação natural e o uso da electrónica.

O aproveitamento da iluminação natural pode contribuir significativamente não só para o conforto visual e para o bem-estar dos seus ocupantes, mas também para a sua eficiência energética. Deste modo, deverá ser uma preocupação fundamental dos projectistas a integração de estratégias e medidas mais adequadas de aproveitamento da luz natural.

A eficiência energética representa a capacidade de transformação da menor quantidade de energia possível para a geração da máxima quantidade de trabalho possível, no que resulta nos sistemas de iluminação, na quantidade utilizada na produção de luz visível e é medida através da relação lúmen/watt (lm/W). Como referido, o conceito de eficiência energética em iluminação torna-se inadequado a menos que o sistema de iluminação forneça as condições adequadas para a realiza-

ção da tarefa visual, isto é, a adopção de tecnologias energeticamente eficientes não deve prejudicar o conforto e a satisfação do usuário nem o perfeito desenvolvimento da tarefa visual.

De uma forma resumida, um sistema de iluminação energeticamente eficiente pode ser obtido através da minimização de duas variáveis: o tempo de utilização e a potência instalada. O aproveitamento da iluminação natural através da utilização de sistemas de controlo da iluminação artificial pode minimizar o seu tempo de utilização. Na minimização do tempo de utilização de um sistema de iluminação, deve-se considerar sempre o utilizador, pois este tem importância fundamental no processo, podendo apagar ou não lâmpadas inutilmente acesas, ou mesmo alterar os cenários de controlo mediante a utilização do compartimento. A minimização da potência instalada é obtida através da utilização de componentes do sistema de iluminação artificial energeticamente eficientes como lâmpadas com alta eficiência luminosa e balastros com alto factor de potência, bem como a sua manutenção frequente.

O processo de aproveitamento da iluminação natural, cujo objectivo principal consiste em proporcionar um ambiente visual interior adequado, constitui também, um dos principais factores condicionantes da qualidade ambiental das instalações. Considera-se que o ambiente visual interior é adequado quando permite assegurar as necessidades de conforto visual e a execução das diferentes tarefas visuais, uma vez que a luz é também um “marcador temporal” do nosso relógio biológico e um estímulo que influencia o nosso estado anímico, tanto de um ponto de vista psicológico como fisiológico. Mediante uma iluminação adequada as pessoas são capazes de executar mais e melhor o seu trabalho podendo melhorar o seu estado de alerta, sono e bem-estar. Desta forma, as recomendações e normas de iluminação devem ser baseadas não só nas necessidades físicas mas também nas necessidades biológicas do ser humano.

No que diz respeito aos consumos energéticos, Portugal é o país com maior intensidade energética na União Europeia a Quinze, ou seja, é o país que incorpora maior consumo de Energia Final¹, para produzir uma unidade de produto interno [10].

¹ Refere-se à entregue ao consumidor, na forma de Electricidade, Gás Natural e GPL.

Um dos principais sectores responsável pelo consumo de energia primária em Portugal é o dos edifícios, com cerca de 35%, sendo um terço desse consumo em edifícios não residenciais, como, por exemplo, escritórios, instalações industriais, escolas, hospitais ou hotéis. A maneira como é utilizada a energia de que dispomos é uma questão chave no processo de crescimento económico e por isso, o aumento da eficiência energética das operações nas empresas é imprescindível para se atingirem os objectivos do novo modelo de desenvolvimento, tanto pela diminuição da intensidade energética global, como pelo aumento dos correspondentes resultados económicos.

Na Figura 1 pode-se observar a relevância da Iluminação num dos principais sectores de consumo de energia eléctrica, o de serviços. Por esta razão, a vertente da luminotecnia nunca foi alvo de tanta preocupação e estudo.

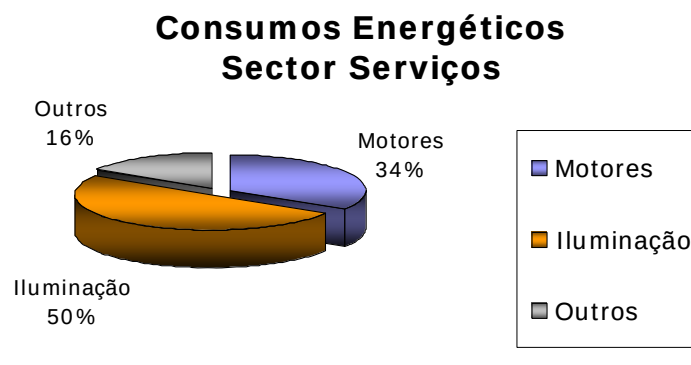


Figura 1- Consumos de Energia desagregados por utilização: Serviços [29]

1.2 Motivação e Objectivos

Torna-se então essencial reequacionar o papel da iluminação natural no âmbito das instalações face aos desenvolvimentos tecnológicos mais recentes, às exigências crescentes ao nível do projecto energeticamente consciente e face ao nível do conforto ambiental. Devido à dificuldade existente para quantificar as vantagens das TIIN é necessário o desenvolvimento de metodologias e ferramentas de simulação que sejam capazes de estimar os seus benefícios assim como avaliar a sua eficiência energética.

Neste sentido, pretende-se no presente trabalho caracterizar quantitativamente e qualitativamente a luz natural, assim como identificar e caracterizar tecnicamente as tecnologias que permitam o seu aproveitamento.

As principais contribuições do autor para este trabalho são:

- Desenvolvimento de uma metodologia genérica capaz de quantificar o impacto da luz natural no interior de um compartimento, para a integração das TIIN;
- Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo matemático para a simulação e estimativa dos benefícios energéticos e económicos da utilização das TIIN.

1.3 Estrutura

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, constituindo a presente introdução o primeiro desses capítulos.

No capítulo 2 descreve-se o estado da arte do cálculo Luminotécnico, onde se caracteriza todo o ambiente exterior e interior no que diz respeito à luz natural e apresenta-se os tipos de abordagem que existem assim como os métodos para a quantificação da luz natural. Por fim, procede-se a uma avaliação qualitativa e quantitativa e identifica-se as necessidades da iluminação. Este capítulo é importante para compreender as abordagens e os métodos adoptados para o cálculo luminotécnico.

No terceiro capítulo identifica-se e caracteriza-se algumas TIIN, subdivididas em dois grupos, os sistemas automáticos de controlo e os sistemas de condução de luz natural. A metodologia de avaliação apresentada actua sobre estas TIIN aqui apresentadas.

No capítulo 4 apresenta-se a metodologia proposta, referida anteriormente, para a integração da iluminação natural nos sistemas artificiais. Esta metodologia foi desenvolvida e implementada em *software*, constituindo este o contributo principal apresentado pelo autor desta dissertação.

O capítulo 5 contém uns casos de estudo, aplicações práticas, onde se podem verificar e comparar os resultados, tanto a nível das poupanças energéticas como económicas, da aplicação de diferentes soluções através da metodologia criada, assim como a apresentação de exemplos de casos de estudo já realizados.

Finalmente, na última parte, que compreende o capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões do trabalho e identifica-se algumas perspectivas de desenvolvimentos futuros.

São ainda incluídos 2 anexos. No anexo A e para melhor compreensão dos textos, conceitos e metodologias, considerou-se algumas bases gerais e termos utilizados na luminotecnia.

No anexo B inclui-se um gráfico que contém informações complementares referentes aos casos de estudo.

2. Estado da Arte do Cálculo Luminotécnico

Caracterização do Ambiente exterior e interior. Identificação das necessidades de iluminação.

2.1 Caracterização de Iluminação do Ambiente

A caracterização da componente de iluminação do ambiente exterior é de grande importância para o conhecimento, compreensão e previsão dos fenómenos climáticos. As características (quantitativas e qualitativas) da luz natural são variáveis com a latitude, estação do ano, período do dia e com as condições meteorológicas locais. O carácter dinâmico da iluminação natural, essencialmente ligado à variação das condições de nebulosidade, constitui uma das características que mais dificulta a sua previsão.

Apesar de Portugal ser o país da Europa com maior número de horas de sol, como se pode verificar na Figura 2, os primeiros estudos sistemáticos de iluminação natural são originários de países do Norte da Europa [12]. Torna-se assim compreensível que os primeiros métodos analíticos de previsão tivessem como base as condições de céu encoberto, que são as mais frequentes naquelas regiões [12]. Na sequência desses estudos, a quantificação da iluminação natural passou a ser efectuada com recurso a um parâmetro denominado *Factor de Luz do Dia (FLD)* que, desde então, se tornou no parâmetro de uso generalizado para quantificar as condições interiores da iluminação natural. Este factor assim como o modelo de céu adoptado irão ser caracterizados e descritos em seguida.

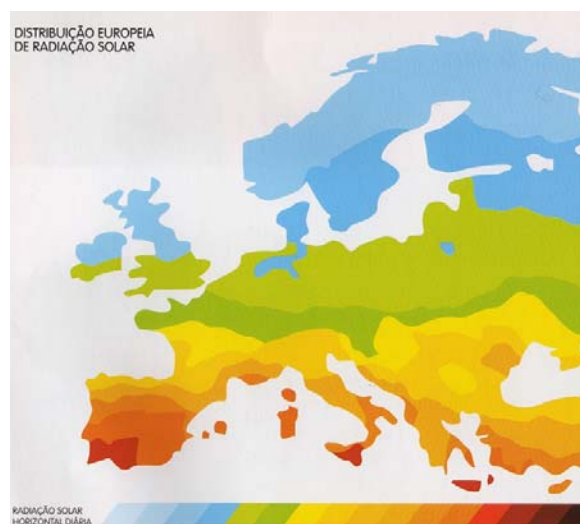


Figura 2 – Distribuição de radiação solar [36].

2.1.1 Modelos de Céu Standard

A CIE (*Commission Internationale d'Éclairage*) recomenda a utilização de três modelos de referência para a distribuição de luminâncias do céu [14] para melhor compreensão nos estudos de iluminação natural. Os 3 tipos ou modelos de céu considerados são:

- Céu Encoberto Padrão da CIE;
- Céu Limpo Padrão da CIE;
- Céu Intermédio.

Na Figura 3 indica-se os modelos analíticos recomendados pela CIE, e a sua correspondência às situações reais. Na caracterização que se segue dos tipos de modelo que existem não se irá descrever a quantificação da luminância nem as vantagens e desvantagens da aplicabilidade dos modelos. Apenas será aprofundado posteriormente, o céu encoberto padrão, pois será o adoptado para a metodologia.

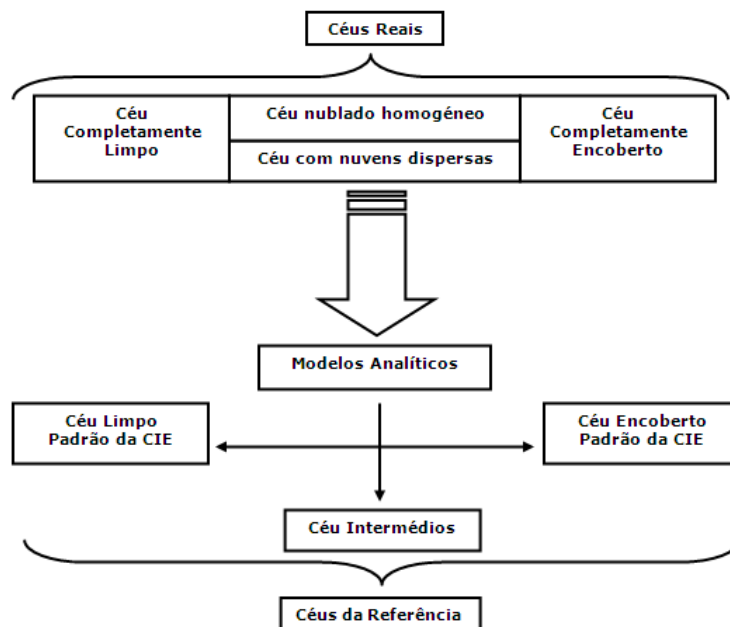


Figura 3 – Modelos de Referência para a caracterização de céus, recomendados pela CIE [14]

2.1.1.1 Céu Encoberto-Padrão da CIE

A representatividade do FLD (Factor de Luz do Dia), restringe-se às condições de nebulosidade de um Céu Encoberto-Padrão da CIE [14], cuja distribuição teórica de luminâncias apenas traduz com rigor as condições de céus completamente encobertos por nuvens espessas e escuras. Este modelo corresponde a um céu com nuvens claras, escondendo o sol. A grande vantagem deste modelo de céu é o facto de a simetria à volta da direcção zenital indicar que a orientação de clarabóias verticais não tem efeito no nível de iluminância interior [40].

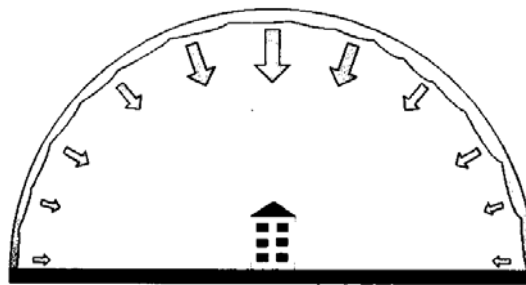


Figura 4 – Ilustração do Céu Encoberto-Padrão da CIE [6].

2.1.1.2 Céu Limpo-Padrão da CIE

No Céu Limpo-Padrão da CIE os valores de luminância variam em função de parâmetros geométricos e da posição do sol (ver Figura 5). Oferece a possibilidade de estudar o jogo de sombras e de luz, assim como os riscos de encandeamento directo devido à penetração da luz solar directa nos edifícios.

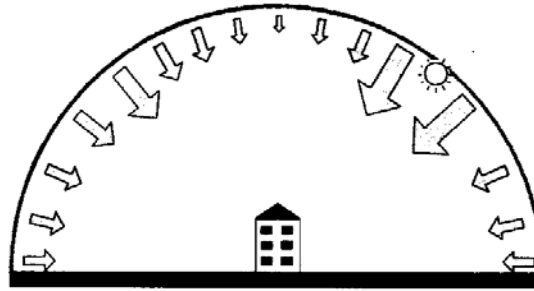


Figura 5 - Ilustração do Céu Limpo-Padrão da CIE [6].

2.1.1.3 Céu Intermédio

A CIE define céu intermédio, como sendo o céu (ou céus) para o qual a iluminação de uma determinada porção de céu, para uma dada posição do Sol e sob condições meteorológicas intermédias, possui um valor intermédio entre céus limpo e encoberto. Essa luminância depende da altura do Sol do mesmo modo que o céu limpo padrão da CIE, e exclui-se a luminância proveniente do círculo solar e da sua auréola. Porém, a CIE não recomenda nenhum dos modelos actualmente existentes.

2.2 Avaliação Quantitativa da Iluminação Natural

Pretende-se abordar os principais aspectos e técnicas utilizadas na quantificação da luz natural nos espaços interiores e o seu efeito no conforto visual.

Toda a luz natural é proveniente do sol, contudo é habitual fazer-se a distinção entre a luz proveniente directamente do Sol (radiação solar directa ou luz do Sol) e da luz difusa proveniente de um hemisfério de céu (luz do céu). Como referido no capítulo anterior, os céus totalmente encobertos e os céus totalmente limpos pretendem traduzir as duas situações extremas de nebulosidade, embora a ocorrência de cada tipo de céu varie consoante a latitude e as especificidades climáticas e microclimáticas de cada local [6]. Em Portugal, o ambiente exterior caracteriza-se, em termos médios, por uma predominância de céus limpos com pouca nebulosidade [16].

De um modo geral, nas instalações que se pretende analisar, podem atribuir-se duas funções básicas à iluminação natural: a iluminação ambiente e a iluminação das tarefas visuais. Os requisitos qualitativos e quantitativos para cada uma destas funções podem ser diversos, consoante os espaços a iluminar e o tipo de tarefas visuais a realizar.

Os aspectos quantitativos da iluminação natural dependem do período do dia e do ano, das características geométricas do local e dos compartimentos, das dimensões e características espectrofotométricas dos vãos envidraçados, do grau e características reflectométricas das obstruções exteriores e ainda das características reflectométricas dos materiais superficiais interiores [6].

Existem diversos métodos de análise das condições de iluminação natural nos edifícios e todos esses métodos (excluindo os métodos simplificados) permitem o cálculo da iluminação natural num ponto de um plano no interior de um determinado compartimento [19]. Em seguida será evidenciado o método de análise adoptado para a quantificação da luz natural, o método do FLD.

2.2.1 Método do Factor de Luz do Dia (FLD)

Este método (FLD), também designado por método do fluxo repartido, teve origem na Grã-Bretanha com os estudos de Waldram [12] que foram posterior e sucessivamente desenvolvidos por várias equipas no BRE (*Building Research Establishment*). O método do FLD é recomendado pela CIE como método de referência para análise das condições interiores de iluminação natural [20,21] e irá ser descrito detalhadamente no capítulo 4.

O factor de luz do dia é o quociente entre a iluminância natural interior recebida num ponto do plano de referência (geralmente no plano de trabalho ou ao nível do pavimento) e a iluminância exterior simultânea sobre uma superfície horizontal num ponto sem obstruções. Estes valores de iluminância são valores recebidos do mesmo céu, cuja repartição de luminância se supõe ser conhecida, excluindo-se a luz directa proveniente do sol. O FLD exprime-se geralmente em percentagem, na seguinte forma:

$$FLD(\%) = \frac{E_{int.}}{E_{ext.}} \times 100 \quad (2.1)$$

Em que:

- E_{int} é a iluminância interior num ponto de um plano (lux);
- E_{ext} é a iluminância exterior simultânea num plano horizontal (lux).

Os métodos mais habituais de cálculo, mencionados no ponto seguinte, consideram que o FLD total num ponto de um plano é o resultado da soma de três componentes (ver Equação 2.2) [6]:

- a componente directa (CD);
- a componente reflectida exterior (CRE);
- a componente reflectida interior.

$$FLD(\%) = CD(\%) + CRE(\%) + CRI(\%) \quad (2.2)$$

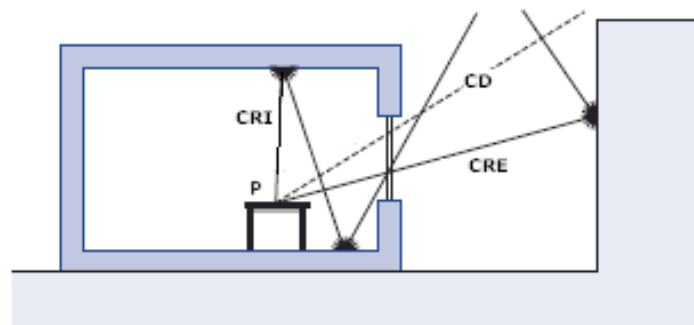


Figura 6 – Componentes do FLD [22]

2.2.2 Métodos de Medição do FLD

Os aspectos quantitativos da iluminação relacionam-se essencialmente com os valores das iluminâncias disponíveis ao longo dos planos de trabalho. Com isto, o que se pretende neste ponto é fazer a descrição dos principais procedimentos de monitorização para caracterização dos aspectos quantitativos da iluminação natural. A descrição que se segue diz respeito ao método do factor de luz do dia, uma vez que será o método proposto para a metodologia de integração da iluminação natural.

2.2.2.1 Método tradicional

Conforme ilustrado na Figura 7, o método mais utilizado para a medição do FLD consiste na utilização de dois sensores, ou luxímetros, um colocado no interior do compartimento, no ponto de medição, e o outro colocado horizontalmente no exterior do edifício. Estas duas medições devem ser efectuadas em simultâneo. Como referido anteriormente, o FLD é obtido pela Equação 2.3.

$$FLD(\%) = \frac{E_{int.}}{E_{ext.}} \times 100 \quad (2.3)$$

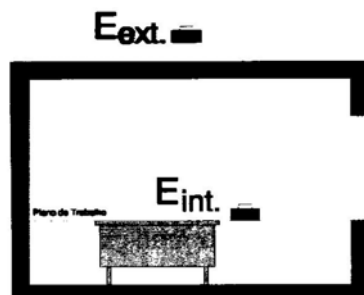


Figura 7 – Método tradicional [6]

2.2.2.2 Método Alternativo 1

Para casos particulares, onde por exemplo, se a medição estiver sujeita a obstruções que influenciem o valor da iluminância, têm vindo a ser sugeridas metodologias alternativas tendo em vista obviar este problema.

Um dos métodos alternativos consiste em utilizar um sensor exterior obstruído, de modo a receber luz proveniente apenas de metade do hemisfério. Desta forma, para obter o valor do FLD, o quociente entre as iluminâncias interior e exterior deverá ser multiplicado por 0,5.

$$FLD(\%) = \frac{E_{int.}}{E'_{ext.}} \times 0,5 \times 100 \quad (2.4)$$

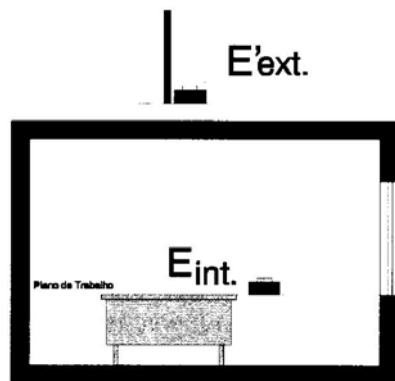


Figura 8 – Método alternativo 1 [6]

2.2.2.3 Método Alternativo 2

Um outro método alternativo consiste em substituir a medição da iluminância horizontal exterior pela iluminância vertical, utilizando um sensor colocado verticalmente na face exterior do vidro do vão envidraçado (por exemplo) e obstruindo-o da luz reflectida pelo solo (ver Figura 9). Neste método a expressão vem afectada por uma constante relativa à relação entre iluminância vertical (E_v) e a iluminância horizontal (E_H), devido a um hemisfério de céu encoberto e desobstruído, que é dada por $E_v = 0,396 E_H$ [6]. Assim resulta:

$$FLD(\%) = \frac{E_{int.}}{E_{Vext.}} \times 0,396 \times 100 \quad (2.5)$$

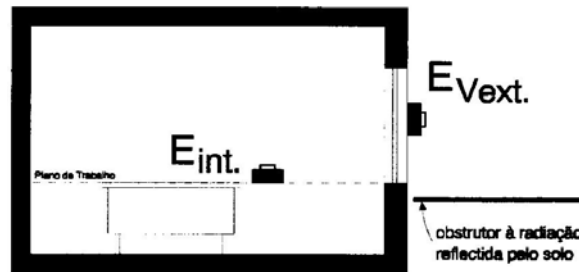


Figura 9 - Método alternativo 2 [6]

Nos dois métodos anteriores, os sensores exteriores devem ser obstruídos por ecrãs de cor negra de grandes dimensões (pelo menos 10 vezes maior que a dimensão do diâmetro do sensor) [6].

2.2.2.4 Método Alternativo 3

Por último, um processo de medição alternativo do FLD que consiste em substituir a medição da iluminância exterior pela medição de uma luminância. A luminância pode ser medida em frente a uma janela (aberta) com uma inclinação de 42° em relação ao horizonte (ver Figura 10). Este método é particularmente indicado para situações em que existam obstruções exteriores significativas [6]. Assim tem-se:

$$E_{ext.} = L_{42^0} \times \pi \quad (2.6)$$

Onde:

$$FLD(\%) = \frac{E_{int.}}{L_{42^0} \times \pi} \times 100 \quad (2.7)$$

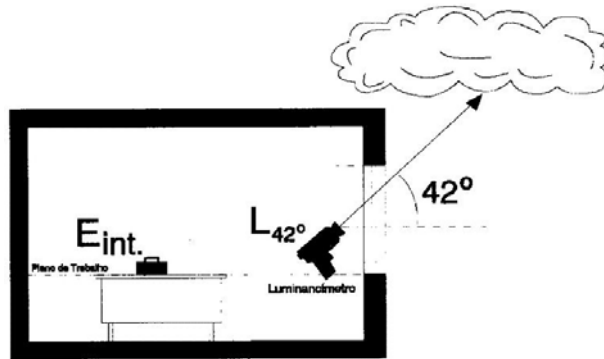


Figura 10 – Método alternativo 3 [6]

Como nem sempre é possível efectuar estas medições aqui referidas, irá ser descrito no capítulo 4 uma outra forma para determinar o valor de FLD, a estimativa do FLDM (factor de luz do dia médio).

2.3 Aspectos Qualitativos da Iluminação Natural

É importante caracterizar os aspectos qualitativos, pois estão relacionados com a restituição do contraste e com a distribuição das luminâncias. Estes aspectos irão influenciar o desempenho e conforto visual dos ocupantes na realização dessas tarefas [23]. Esta caracterização pode ser efectuada mediante a avaliação do desempenho visual, do conforto visual e das impressões não visuais [24].

2.3.1 Desempenho Visual

O desempenho visual é “a velocidade e a precisão com que uma determinada tarefa visual é executada” [21] e depende, essencialmente, da visibilidade das tarefas visuais. Pode ser caracterizado mediante: i) Parâmetros independentes, como a dificuldade da tarefa visual, o nível de exigência da tarefa e da idade do observador; e ii) Parâmetros de iluminação, como a Luminância de Fundo da Tarefa (LFT), o Factor de Restituição do Contraste (FRC), o Factor de Encandeamento Incapacitador (FEI) e o Factor da Adaptação Transiente (FAT) [6].

O parâmetro mais útil na avaliação do desempenho visual é a luminância de fundo da tarefa (LFT). Embora a LFT seja um melhor indicador daquilo que o olho humano “vê” em comparação com a Luminância de Tarefa (LT), e embora o cálculo das iluminâncias não seja possível para tarefas visuais especulares, frequentemente, as medições de luminâncias são substituídas por medições de iluminâncias das tarefas por questões de ordem prática [25].

Outro dos parâmetros fundamentais na avaliação do ambiente qualitativo luminoso é o contraste [6]. Define-se contraste de um objecto como sendo uma medida de diferença em luminância entre esse objecto¹ (tarefa visual) e as suas zonas imediatamente próximas ou o fundo [130]. O contraste (C) é calculado da seguinte forma:

¹ A expressão original em inglês “visual task” (tarefa visual) é usada para descrever não apenas a acção de visualização de um objecto, como também o próprio objecto [21].

$$C = \left| \frac{L_t - L_f}{L_f} \right| \quad (2.8)$$

Em que L_t é a luminância da tarefa visual e L_f é a luminância de fundo.

Um outro parâmetro utilizado para descrever as condições de visibilidade das tarefas visuais é o Factor de Restituição do Contraste (FRC), que se define como sendo o quociente do contraste da tarefa visual sob o sistema de iluminação considerado pelo contraste da mesma tarefa sob condições de iluminação de referência [21].

Outro parâmetro importante para avaliação do desempenho visual é o Factor de Adaptação Transiente (FAT) que consiste numa perda temporária da sensibilidade relativa do contraste que ocorre quando os olhos de um observador estão instantaneamente expostos a uma luminância diferente daquela a que os olhos estavam adaptados [24].

2.3.2 Conforto Visual

De um modo geral o encandeamento, nas suas múltiplas formas, constitui a principal causa de desconforto visual [12]. O encandeamento é o resultado da presença de luz não desejável no campo visual de um observador e, geralmente, tem origem numa ou mais fontes de luz excessivamente brilhantes [6]. A CIE define encandeamento como sendo *as condições de visão nas quais se experimenta quer incómodo, quer redução da aptidão na distinção de objectos, quer outros efeitos, simultaneamente, em consequência de uma distribuição desfavorável de luminâncias ou de um escalonamento entre valores extremos muito diferentes, ou a consequência de contrastes excessivos no espaço e no tempo* [13].

Na iluminação natural, as principais causas de encandeamento são [40]:

- a visão directa do sol ou do céu através das janelas;
- a reflexão do sol ou do céu em edifícios vizinhos;
- um contraste de luminância excessivo entre uma janela e a parede vizinha ou o caixilho da janela;
- uma superfície interior reflectora que provoca contrastes de luminância demasiado elevados em relação a superfícies na sua vizinhança.

A luminância e o contraste de luminâncias constituem aspectos importantes nos processos de comunicação visual, no entanto o excesso de luminosidade¹ entre a tarefa visual e o seu fundo imediato pode prejudicar o desempenho do olho humano na distinção dos objectos do seu fundo imediato e na percepção do detalhe. O sistema visual humano responde relativamente bem para uma gama alargada de luminâncias, desde cerca de 0,03 cd/m² numa noite estrelada, até mais de 10 000 cd/m², num dia de céu limpo, porém, o seu desempenho não é o melhor quando níveis de brilho muito diferentes estão presentes no campo de visão simultaneamente [6].

Ao analisar o efeito do encandeamento e das suas fontes potenciais, é crucial compreender os limites de conforto visual no que diz respeito ao campo de visão de um observador. O limiar acima do qual a luminância de uma fonte luminosa se torna perturbadora depende [40]:

- da sua posição no campo visual do observador;
- da sua dimensão aparente;
- da luminância de fundo sobre a qual se destaca.

O grau de perturbação devido ao encandeamento é igualmente influenciado pelo tipo de actividade que se executa, isto é, quanto mais difícil for a tarefa visual mais difícil será de controlar o encandeamento. O limite superior geralmente admitido

¹ Luminosidade – Atributo da sensação visual segundo o qual um objecto parece emitir mais ou menos luz. Este atributo e o correspondente psicossensorial aproximado da grandeza fotométrica luminância [21].

como valor da luminância absoluta de uma superfície é de 1500 cd/m^2 e os valores das luminâncias máximas admissíveis são dados na Figura 11 em função do ângulo de visão. Quanto mais elevado for o ângulo entre a horizontal e a direcção de visão, maior é o valor da luminância admissível, quer se trate de encandeamento directo ou indirecto [40].

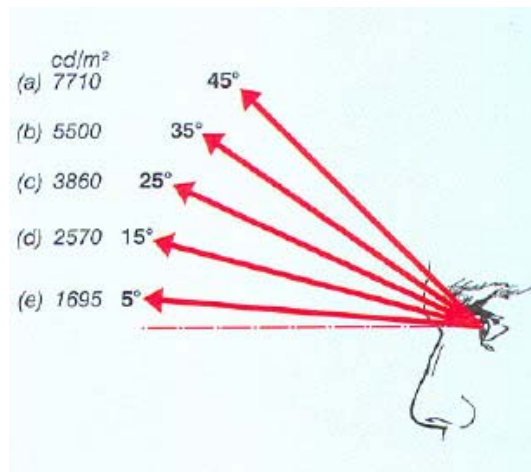


Figura 11 – Limites do conforto visual [40].

2.3.3 Encandeamento Devido à Luz Natural

As primeiras metodologias de análise do efeito devido ao encandeamento devido à iluminação surgiram para os sistemas de iluminação artificial, no entanto, os primeiros estudos sistemáticos do efeito da luz natural no encandeamento [26] demonstram desde logo as especificidades da iluminação natural, quando comparadas com fontes artificiais, essencialmente, devido aos seguintes factores: *i*) as fontes de encandeamento naturais geralmente ocupam uma porção significativa do campo visual, originando um aumento do nível de adaptação do sistema visual que reduz a sensação de encandeamento e o efeito de contraste e, *ii*) para graus de encandeamento intermédios, a luminância do céu, vista através dos vãos envidra-

çados, pode ser superior do que uma luminância de uma fonte de luz artificial (de dimensões comparáveis), para produzir o mesmo grau de encandeamento desconfortável [27], ou seja, parece haver evidência para uma tolerância superior ao encandeamento devido à luz natural.

2.3.4 Luz Solar Directa

É importante evitar a incidência da radiação solar directa nos olhos dos ocupantes e nos planos de trabalho. A influência da luz do Sol no conforto visual dos ocupantes, por exemplo num edifício, é mais crítica quando os postos de trabalho são fixos. Nesta situação, a incidência da luz solar pode originar problemas de encandeamento. Um caso particular são os ecrãs de computador, em relação aos quais devemos ter em atenção o seguinte:

- nenhuma janela deve situar-se à frente ou atrás do ecrã;
- o eixo principal do olhar deve ser paralelo às janelas;
- as superfícies vizinhas do ecrã devem ser baças;
- as reflexões são mais perturbadoras com um ecrã com fundo escuro do que com um ecrã com fundo claro.

A Figura 12 apresenta a posição adequada para um ecrã num local com iluminação natural [40].

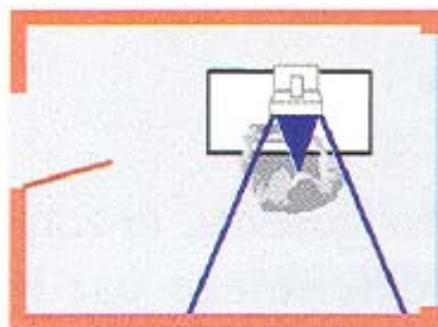


Figura 12 – Posição adequada para um ecrã [40].

3. Tecnologias de Integração da Iluminação Natural

Identificação e Caracterização de tecnologias e processos para integração da iluminação natural.

São inúmeras as tecnologias e soluções que se podem implementar para se obter um aproveitamento da iluminação natural. Como referido anteriormente, a arquitectura está fortemente ligada aos projectos de maximização de aproveitamento de luz natural. Desta forma, as implementações da maioria das medidas que irão ser referidas acontecem na fase de projecto.

Este capítulo pretende, desta forma, descrever e recolher, em forma de síntese, algumas medidas já utilizadas para o aproveitamento da iluminação natural, assim como novas tecnologias que estão a surgir e que poderão ter um grande desenvolvimento face à necessidade de eficiência energética que se sente actualmente.

Do ponto de vista geral, todas as medidas e técnicas descritas neste capítulo têm como objectivo, o aumento do aproveitamento da luz natural no compartimento em questão e consequentemente um aumento do FLD.

3.1 Sistemas Automáticos de Controlo

3.1.1 Sistema Digital de Regulação de Fluxo Luminoso

São diversos os sistemas digitais de regulação de fluxo luminoso. *Trata-se de* uma tecnologia recente e inovadora que reúne várias técnicas numa só solução, de uma forma simples, eficaz, flexível e economicamente viável. No capítulo dos casos de estudo irá ser aplicado um sistema deste tipo, onde se fará uma estimativa da poupança energética e económica.

Os Sistemas Digitais de Regulação de Fluxo Luminoso (SDRFL) são capazes de proporcionar uma elevada qualidade a nível de iluminação aproveitando ao máximo a luz do sol, reduzindo assim os consumos, e é ideal para todos os espaços com luz natural. Os equipamentos existentes no mercado podem ser configurados para uma aplicação actual sem descuidar uma futura alteração ou expansão, de forma simples e fácil, e pode ser constituído por diferentes módulos que proporcionam diferentes soluções.

Com os SDRFL (ver Figura 13) é possível reduzir até 75% no consumo de energia [43]. Este valor obtém-se através do uso de equipamentos digitais com um consumo muito reduzido e que proporcionam as condições ideais de funcionamento para cada tipo de lâmpada, como por exemplo os balastros digitais, os transformadores digitais e reguláveis, sensores de presença, sensores de luz, etc. O uso deste tipo de equipamentos é um investimento com a garantia segura na evolução e na eficácia do consumo energético.

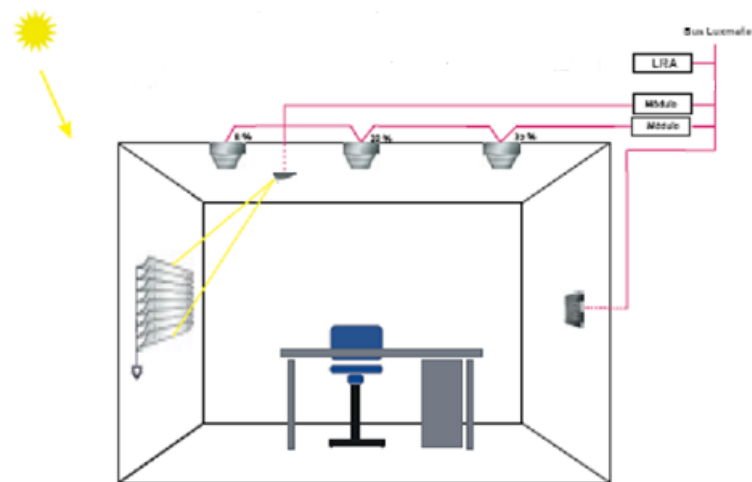


Figura 13 – Ilustração de um sistema de regulação automático [43].

O modo de funcionamento deste sistema é variado, podendo optar-se por vários processos de controlo da iluminação, tais como: i) regulação manual do fluxo luminoso através de um botão de pressão; ii) controlo *ON/OFF* através de um interruptor convencional, interruptor horário ou detector de presença; iii) criação de cenários; iv) regulação do fluxo luminoso através do sensor, que fará a leitura da luz natural disponível e ajusta automaticamente o fluxo luminoso dos aparelhos pertencentes aos três canais independentes de regulação.

Os SDRFL são ainda capazes, através da inclusão de diferentes módulos incluir as seguintes soluções:

- controlador para programação de cenários de iluminação;
- controlo automático e/ou manual ON/OFF;
- regulação manual do fluxo luminoso através de botões de pressão;
- detectores de presença;
- regulação automática do fluxo luminoso através do sensor fotoeléctrico. Este faz a leitura da luz natural disponível e ajusta automaticamente o fluxo luminoso dos aparelhos (ver Figura 14).

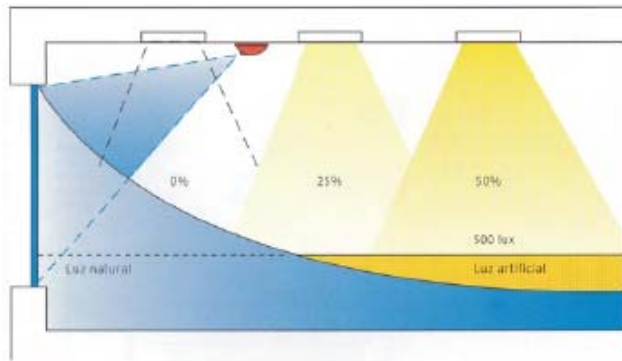


Figura 14 – Ilustração da aplicação do sensor fotoeléctrico [43].

3.1.2 Sistema Automático ON/OFF com Sensor de Presença

Esta solução pode ser implementada individualmente ou de forma complementar dos sistemas mencionados no ponto anterior. Através da instalação de sensores de presença (com possibilidade de criação de cenários) desenvolve-se a função de activação e desactivação automática do sistema de iluminação pretendido. Quando é detectada ou programada a presença do utilizador, o sensor avalia a disponibilidade da iluminação natural, se for suficiente para garantir o nível de iluminância pretendido, o sistema desliga automaticamente, caso contrário é activado.

3.2 Condução de Luz

3.2.1 Poço ou Prisma de Iluminação

Tratando-se de uma medida do encargo arquitectónico normalmente identifica-se como uma pequena área mais centralizada, para a qual se voltam as janelas dos ambientes que não têm parede com o perímetro da edificação (Figura 15). Normalmente é o recurso utilizado para proporcionar luz natural e ventilação aos espaços com menor período de permanência, como sanitários, embora haja casos em que o prisma de iluminação recebe as aberturas de cozinha, área de serviço ou outro ambiente. Pequenos prismas de luz e ventilação, em edifícios com muitos pavimentos, por exemplo, não oferecem boa eficiência ao fim a que se destinam para os pavimentos próximos do térreo, sendo privilegiados, apenas, os últimos andares.

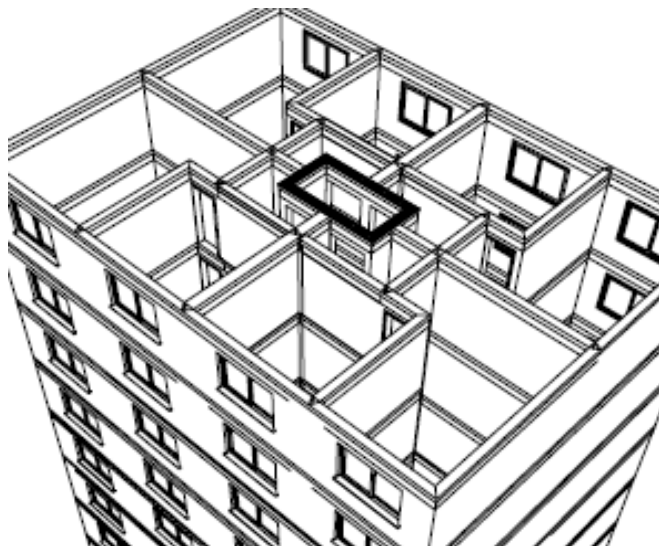


Figura 15 – Poço de iluminação no centro do volume.

3.2.2 Átrio

Trata-se de um espaço que abrange geralmente toda a altura de um edifício, que aumenta fortemente as possibilidades de penetração da luz natural no interior do mesmo (ver Figura 16). A quantidade de luz natural que um átrio deste tipo transmite aos espaços interiores depende da sua orientação e dimensões, da inclinação e factor de reflexão das paredes internas, assim como da transmissão luminosa da sua cobertura transparente e do tamanho das janelas interiores viradas para o átrio. A inclinação das paredes internas representa um parâmetro essencial. Por exemplo, as paredes inclinadas de 10°, para o caso de um átrio quadrado, permitem aumentar consideravelmente a iluminação ao nível do pavimento interior do mesmo. O tamanho dos envidraçados internos que dão para o átrio constitui também um elemento essencial para a eficácia deste espaço de distribuição luminosa.

O tipo de envidraçado utilizado influencia a transmissão da luz natural para o átrio e é necessária uma manutenção regular da superfície envidraçada para assegurar uma boa iluminação interior [40].



Figura 16 – Átrio numa praça de alimentação.

3.2.3 Prateleiras de Luz

A utilização das prateleiras de luz na fachada tem como objectivo proteger os ocupantes contra o acesso da luz solar directa e redireccionar os raios solares incidentes para o tecto (ver Figura 17). O uso das prateleiras representa um dos sistemas mais difusos para o controlo da iluminação natural. O princípio de base é a utilização do tecto e das paredes laterais dos ambientes como superfícies difusoras da luz vinda do exterior. Os feixes são reflectidos pela parte superior de uma lâmina plana ou curvada, de forma a obter no interior, maior uniformidade luminosa, reduzindo ao mesmo tempo os problemas de super aquecimento e de ofuscamento, este último causado pelo contraste entre o ambiente e pelo excesso de luminosidade das superfícies iluminadas directamente pelos raios solares.

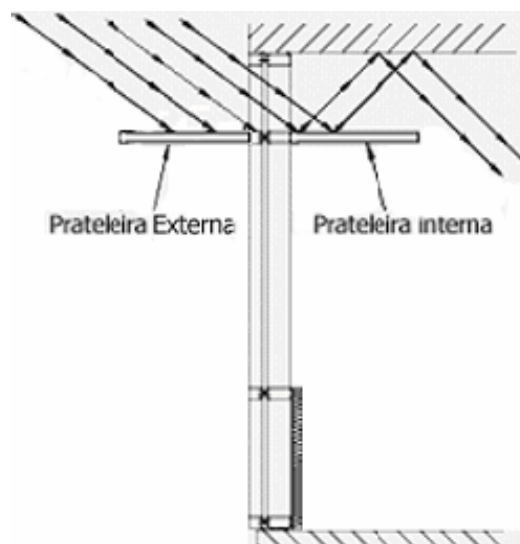


Figura 17 – Corte esquemático de uma prateleira.

A prateleira de luz pode ser rotacional e posicionada no exterior ou no interior do ambiente ou em ambas as partes (ver Figura 17). Normalmente é posicionada acima do nível dos olhos, dividindo desta maneira a abertura em duas partes que podem ser tratadas de maneiras diferentes, adquirindo assim funções diferentes. Enquanto a parte superior trata da iluminação, a parte inferior pode ser utilizada para ventilação ou para manter o contacto com o exterior, sendo que várias combinações podem ser feitas.

As prateleiras rotacionais para baixo (ver Figura 18) sombreiam as áreas adjacentes da abertura e reduzem a quantidade de luz reflectida para o tecto, enquanto as prateleiras rotacionais para cima melhoram a penetração da luz, mas reduzem o efeito de sombreamento. Já as prateleiras externas da fachada reduzem a carga térmica que o edifício adquire devido ao maior sombreamento que proporcionam. Com prateleiras internas haverá um aumento na transmissão da luz solar através da parte superior da prateleira que irá produzir uma iluminação no ambiente melhor que aquela dada por um dispositivo de sombreamento que cubra toda a abertura. Como desvantagem das prateleiras comuns aparece a necessidade de manutenção constante, devido ao depósito de poeira, neve ou eventuais animais ou insectos que possam ali se instalar.

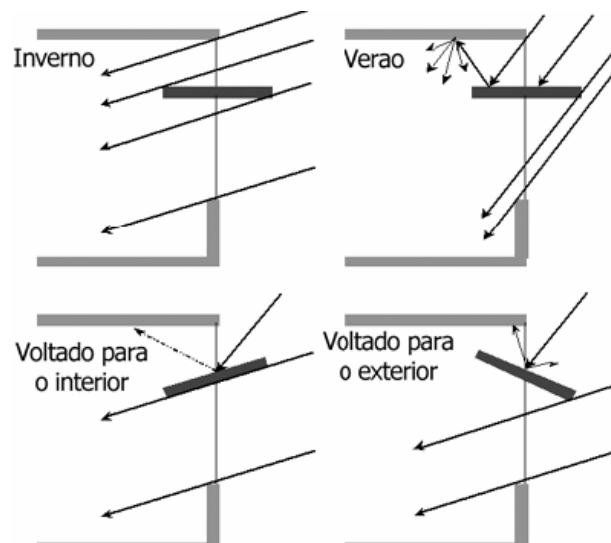


Figura 18 – Tipologias de prateleiras de luz.

3.2.4 Sistema de Tubo Reflector

O sistema *de Tubo Reflector* (ver Figura 19) é uma inovação tecnológica no que diz respeito a produtos para aproveitamento da luz natural. Este sistema permite transportar a iluminação solar para o interior de uma instalação através de uma conduta reflectora (tubo reflector). Como se pode verificar pela Figura 19, é constituído na parte superior por um espelho parabólico que concentra e redirecciona a luz do sol, através de um padrão de prismas, para as paredes de um tubo reflector, que devido às suas dimensões compactas, captam directamente a luz solar nas coberturas transportando-a e multiplicando-a até ao difusor interno, que difunde de uma forma homogénea, intensa e muito estética.

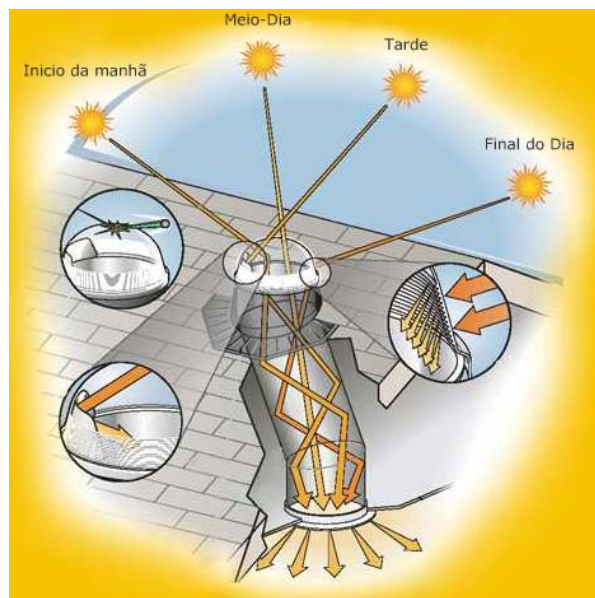


Figura 19 – Ilustração detalhada de um tubo reflector [45].

Algumas vantagens deste sistema:

- fácil de instalar, pois o seu tamanho permite colocá-lo entre vigas sem afectar a estrutura. Os tubos adaptáveis podem formar ângulos para evitar qualquer obstáculo que possam encontrar no seu trajecto;
- não necessita de manutenção uma vez que não requer limpeza como uma clarabóia tradicional, que tem de ser limpa periodicamente. O desenho e forma da cúpula carregado magneticamente e a forma da base fazem com que a sujidade não se acumule;
- comprimento do tubo reflector até 15 metros;
- aplicável a grandes e pequenos espaços (ver Figura 20).

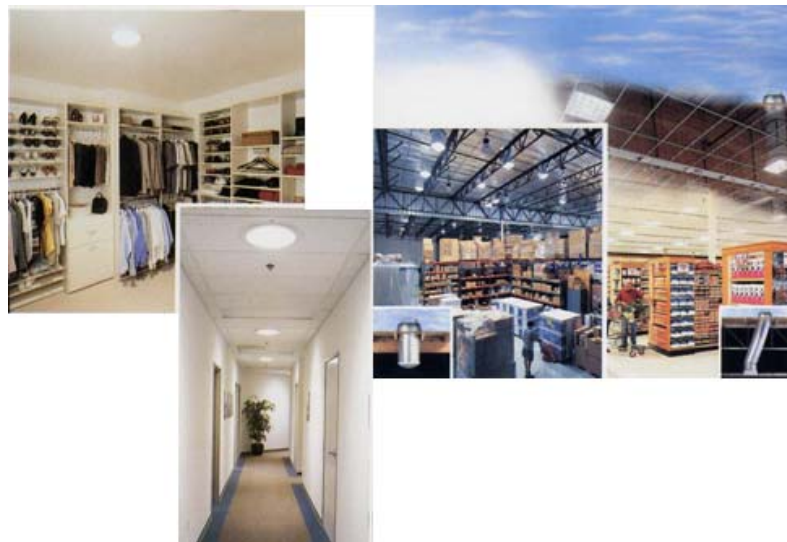


Figura 20 – Exemplo de aplicações.

3.2.5 Sistemas de Fibras Ópticas

Sistema inovador de iluminação que poderá constituir uma solução eficaz para a poupança energética na iluminação (Figura 21).

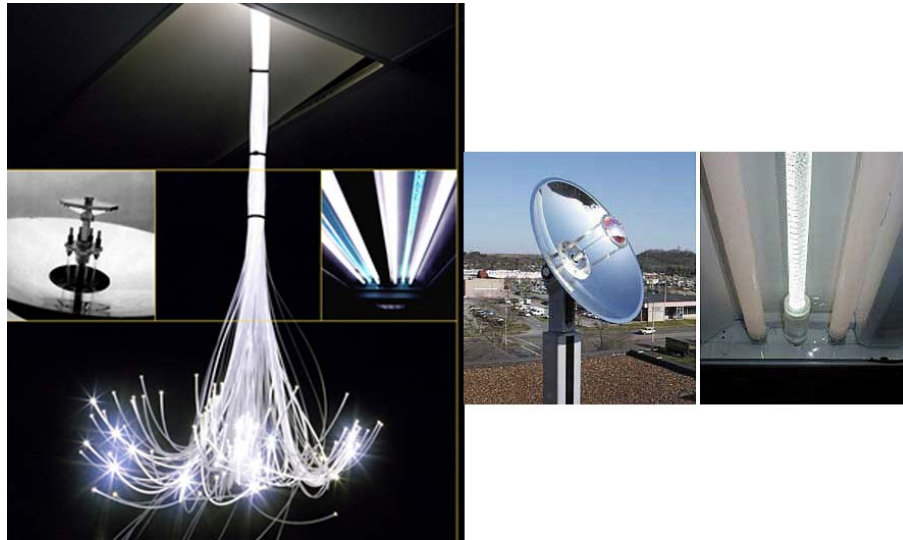


Figura 21 – Ilustração de um sistema de fibras ópticas.

Este sistema é constituído por um colector (ver Figura 21) de iluminação natural colocado estrategicamente no topo de um edifício que irá armazenar e conduzir através de fibras ópticas a luz solar para o interior dos edifícios. O colector é constituído por um espelho de 48 polegadas de diâmetro que concentra a luz natural numa lente secundária e acompanha o sol durante o dia através do GPS. Uma das principais vantagens deste sistema, tal como indica na Figura 21, é a interacção com a iluminação artificial, actuando em simultâneo com as lâmpadas fluorescentes, permitindo aos reguladores de fluxo actuarem como referido anteriormente. Este sistema pode conduzir a poupanças de 60% no consumo de energia. Tem como desvantagem, o facto de se utilizar fibras de plástico, por serem mais baratas mas também com mais perdas o que apenas permite uma distância de 30 a 50 metros.

A luz transportada para o interior pode também ser irradiada através de um difusor . Estes difusores enquadram-se facilmente em qualquer espaço, devido ao seu design, têm várias dimensões e podem ser conjugados, possibilitando uma iluminação otimizada (ver Figura 23).

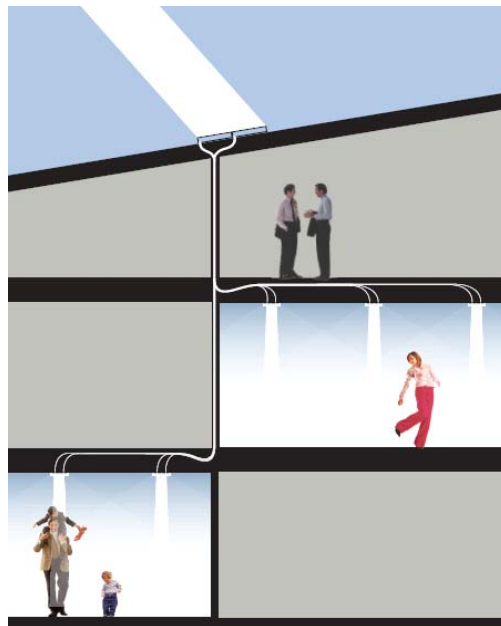


Figura 22 – Sistema de fibras ópticas com difusores.

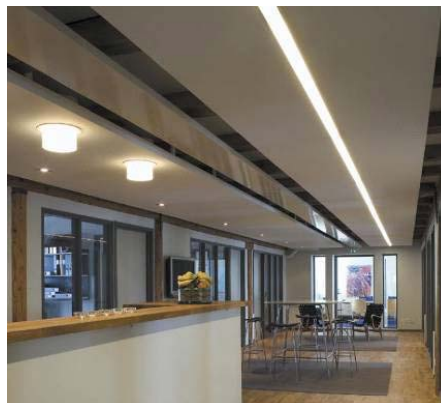


Figura 23 – Ilustração dos difusores.

3.2.6 Heliostatos

Um heliostato é um sistema de captação da luz solar activo e, portanto motorizado, que acompanha a trajectória do sol durante o dia (ver Figura 24). Possui deflectores e espelhos reflectores para redireccionar a luz e encontra a posição do Sol assim que este cruza o céu, reflecte a luz directa do sol para qualquer direcção desejada ou para criar efeitos especiais de iluminação no interior do edifício. A trajectória do sol é encontrada por um sistema de controlo micro processado.

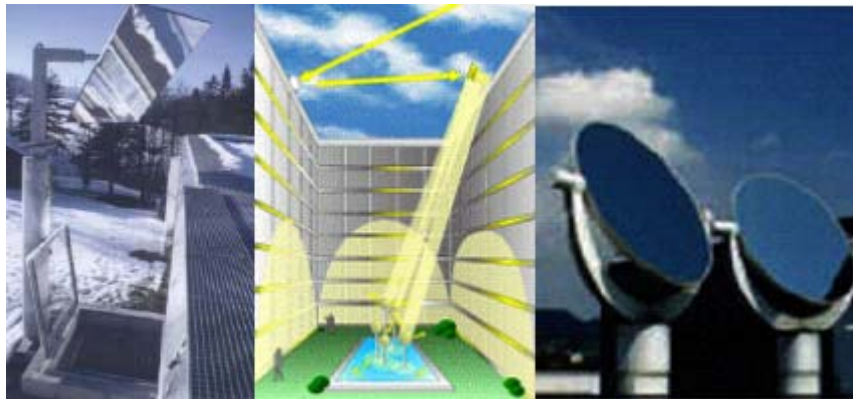


Figura 24 – Exemplos ilustrativos do heliostato.

4. Metodologia de Integração da Iluminação Natural

Metodologia proposta.

Com base nos capítulos anteriores onde se referiram os principais modelos e métodos para a caracterização da luz natural, tanto na perspectiva da qualidade de iluminação como na quantidade de iluminação disponível, apresenta-se uma metodologia geral para o estudo da integração da iluminação natural utilizando um sistema automático de controlo.

Como já referido, será o método do Factor de Luz do Dia que irá ser alvo de análise, pois constitui a principal metodologia no estabelecimento de valores de iluminâncias relativas num compartimento ou espaço. O fluxograma representado na Figura 25 ilustra um conjunto de procedimentos de análise e medições que permitem quantificar a iluminação natural e estudar os resultados do seu aproveitamento.

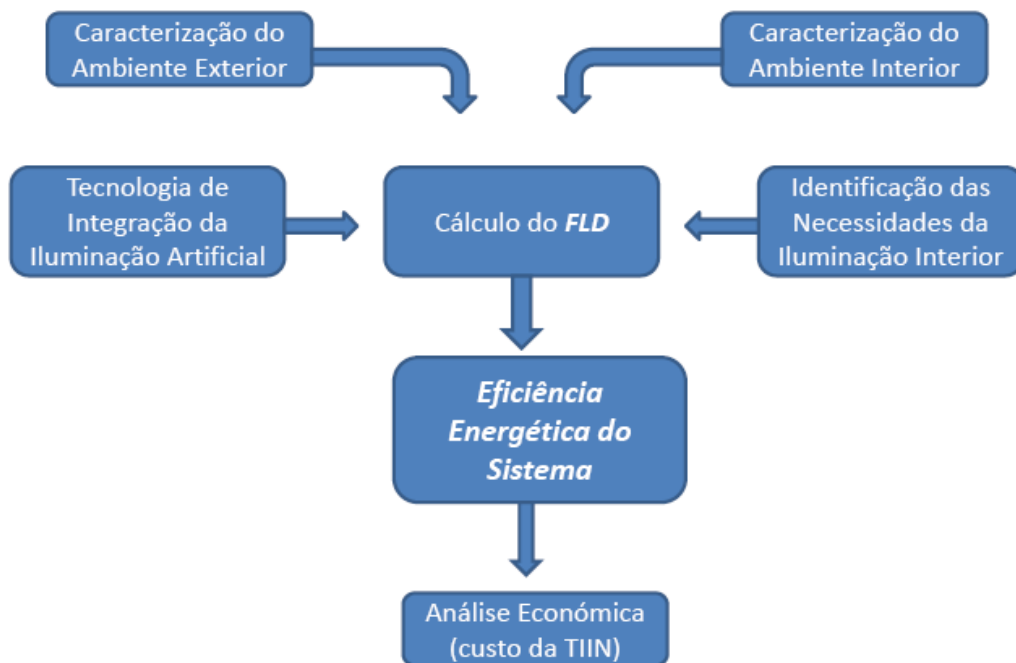


Figura 25 – Fluxograma da metodologia proposta.

4.1 Ambiente Exterior

O modelo de céu standard que irá ser utilizado será o modelo de céu encoberto-padrão da CIE. Sob as condições de céu encoberto, os valores do FLD são independentes da orientação das superfícies envidraçadas, da estação do ano e da hora [40], contudo é essencial a informação da latitude do local em estudo assim como o conhecimento de possíveis edifícios ou obstruções que possam influenciar o ângulo de céu visível das janelas, como irá ser explicado posteriormente.

Desta forma a grande variação da iluminação natural tem por consequência basear os seus estudos nas condições de “céu encoberto” onde a CIE propõe tomar como base um nível de iluminância de 5000 lux sobre uma superfície exterior horizontal, num local livre de obstruções.

4.2 Necessidades e Caracterização do Ambiente Interior

Para se proceder ao cálculo ou à determinação da estimativa do FLD é necessário o conhecimento, para além do ambiente exterior, de várias características interiores do compartimento, tais como:

- dimensões do compartimento – largura, comprimento e altura;
- número de janelas e respectivas dimensões;
- área total das paredes, tecto e chão, assim como os respectivos factores de reflexão de cada superfície;
- transmitância luminosa do vão envidraçado;
- ângulo do céu visível do envidraçado (é 90° se não houver edifício em frente, e é 60° se um edifício cria uma sombra entre o solo e os primeiros 30°, ver Figura 26).

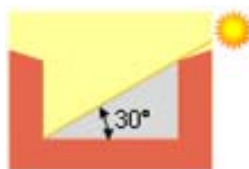


Figura 26 – Ilustração do ângulo de céu visível.

Numa segunda parte é necessário o conhecimento das necessidades da iluminação interior assim como características técnicas, que irão permitir o desenvolvimento do cálculo luminotécnico. Desta forma vem:

- o nível de iluminância médio recomendado para o local;
- número de armaduras, luminárias e a sua disposição;
- tipo e potência da lâmpada e potência do conjunto lâmpada + balastro;
- horário de funcionamento da sala;
- definição das áreas e circuitos a controlar.

4.3 Funcionalidades das TIIN

A determinação da funcionalidade da tecnologia a aplicar completa todo o processo que antecede o cálculo do FLD. Nesta fase define-se que sistema se adapta melhor ao compartimento, que tipo de aparelhos ou módulos se devem utilizar, a localização dos sensores e/ou condutores de luz, caso existam. Todas as medidas procuram maximizar o aproveitamento da iluminação natural no interior de um compartimento para dessa forma se obter um valor de FLD mais elevado possível.

4.4 Cálculo do Factor de Luz do Dia (FLD)

Segundo a CIE, com vista ao cálculo da luz natural disponível num determinado local, a fonte de luz geralmente considerada é a luz natural difusa proveniente de um hemisfério de Céu Encoberto-Padrão da CIE. Assume-se ainda que a iluminância mínima exterior proporcionada por um hemisfério desse céu encoberto não é inferior a 5 000 lux, desta forma, o céu encoberto padrão da CIE traduz situações de céus completamente cobertos por nuvens espessas e escuras. Como em Portugal predominam as situações de céu limpo ou não completamente encoberto, este método torna-se particularmente útil uma vez que estabelece condições mínimas de iluminação, pois traduz a pior situação possível em termos de disponibilidade de iluminação natural.

Relembrando, o factor de luz do dia é o quociente entre a iluminância natural interior recebida num ponto do plano de referência (geralmente no plano de trabalho ou ao nível do pavimento) e a iluminância exterior simultânea sobre uma superfície horizontal num ponto sem obstruções. Estes valores de iluminância são valores recebidos do mesmo céu, cuja repartição de luminância se supõe ser conhecida, excluindo-se a luz directa proveniente do sol. O FLD exprime-se geralmente em percentagem, na seguinte forma:

$$FLD(\%) = \frac{E_{int.}}{E_{ext.}} \times 100 \quad (4.1)$$

Em que:

- E_{int} é a iluminância interior num ponto de um plano (lux);
- E_{ext} é a iluminância exterior simultânea num plano horizontal (lux).

Como se pode verificar, o FLD constitui uma medida relativa das iluminâncias e não uma medida absoluta, uma vez que é expresso como um quociente entre as iluminâncias exterior e interior. Uma vantagem importante deste valor é o facto de traduzir a eficácia de um determinado compartimento como instalação de iluminação natural, ou seja, como meio de penetração da luz do dia exterior disponível [12]. **As condições exteriores de iluminação natural podem variar, mas o FLD permanece constante, visto que a disponibilidade da iluminação interior se modifica simultaneamente em função das alterações exteriores.**

Importante relembrar que sob as condições de céu encoberto, os valores do FLD são independentes da orientação das superfícies envidraçadas, da estação do ano e da hora. Dá assim uma medida objectiva e facilmente comparável da qualidade da iluminação interior (ver Figura 27) e em relação à poupança energética, quanto mais elevado for o FLD maior será a poupança energética, como irá ser demonstrado.

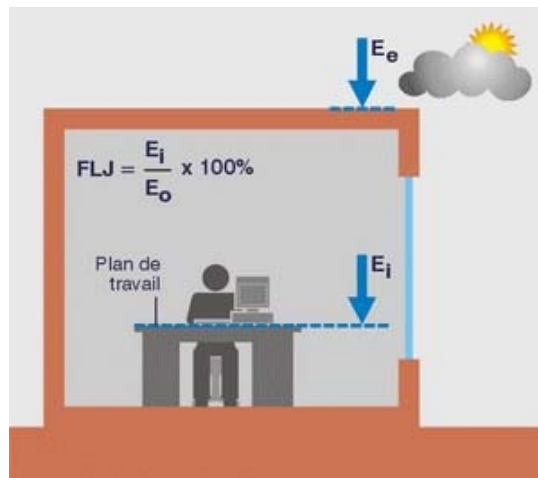


Figura 27 – Ilustração do cálculo do FLD [40].

4.4.1 Condições de Validade das Medições

Para que o método do FLD seja válido, o céu encoberto da CIE deverá verificar as seguintes condições [6]:

- o círculo solar não deve ser visível;
- nenhuma parte do céu azul deverá ser visível. Todavia, pequenas porções de céu azul podem ser permitidas, desde que não se encontrem próximas da posição do Sol e desde que não sejam visíveis a partir de cada ponto interior de medição;
- não deve existir neve no solo.

4.4.2 Factor de Luz do Dia Médio (FLDM)

A determinação do FLD, tanto por métodos manuais ou gráficos, é um processo complexo essencialmente devido ao facto de ter de ser calculado ponto a ponto e também por se ter de entrar em consideração com inúmeros factores, como sejam a geometria e dimensões dos compartimentos e das obstruções exteriores, características espectrofotométricas das superfícies interiores e exteriores, etc. Para além disso, teria de ser calculado cada uma das componentes referidas na Figura 6 [6].

Desta forma, impõe-se a necessidade de utilizar ferramentas simples e expeditas que permitam uma avaliação aproximada da iluminação natural, que é o caso do método do Factor de Luz do Dia Médio (FLDM). Este método pretende traduzir o valor médio do factor de luz do dia ao longo do plano de trabalho e, conseqüentemente, pode funcionar como um indicador da quantidade de iluminação natural total num determinado compartimento [28].

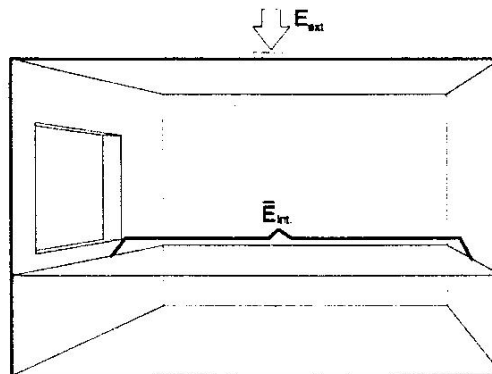


Figura 28 – Ilustração do significado físico do FLDM [6].

O FLDM define-se então como sendo o quociente entre a iluminância média num plano de referência e a iluminância horizontal exterior desobstruída simultânea [28].

$$FLDM = \frac{\overline{E_{int.}}}{E_{ext.}} \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

O FLDM pode ser igualmente calculado mediante a utilização da expressão 4.3 [40]:

$$FLDM = \frac{S_j \times \tau_j \times \alpha_{céu}}{S_t \times (1 - \rho^2)} \quad (4.3)$$

Em que:

- S_j é área da superfície envidraçada;
- S_t é a área total de todas as superfícies no local, considerando a área envidraçada;
- τ_j é o factor de transmissão luminosa do envidraçado (Tabela 1);

Tabela 1 – Factores de transmissão luminosa [40].

tipo de envidraçado	transmissão luminosa (%)	
Simple	claro	90
Duplo	claro	81
	claro + baixa emissividade	78
	claro + baixa emissividade	36 a 65
	claro + reflector	7 a 66
Triplo	claro	74

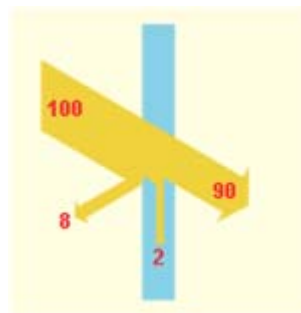


Figura 29 – Ilustração do factor de transmissão luminosa.

- $\alpha_{\text{céu}}$ é o ângulo de céu visível do envidraçado, expresso em graus. No caso das TIIN de condução de luz, como as clarabóias ou os tubos reflectores, se forem colocados no tecto, o ângulo será de 180°;
- ρ é o factor de reflexão médio de todas as superfícies interiores do local.

4.5 Eficiência Energética das TIIN

Este ponto baseia-se na exposição do cálculo luminotécnico onde se descreve a ferramenta de cálculo que foi desenvolvido e onde se aplicam todos os dados obtidos e recolhidos dos pontos anteriores, assim como a adaptação das diversas medidas mencionadas no capítulo 3.

De um modo geral e relativamente aos valores de poupança energética, estes estão fortemente relacionados com o FLD, isto é, quanto maior for a disponibilidade de iluminação natural, maior será o FLD e consequentemente obtém-se uma maior poupança. A Figura 30 ilustra a relação entre a poupança energética e o FLD.

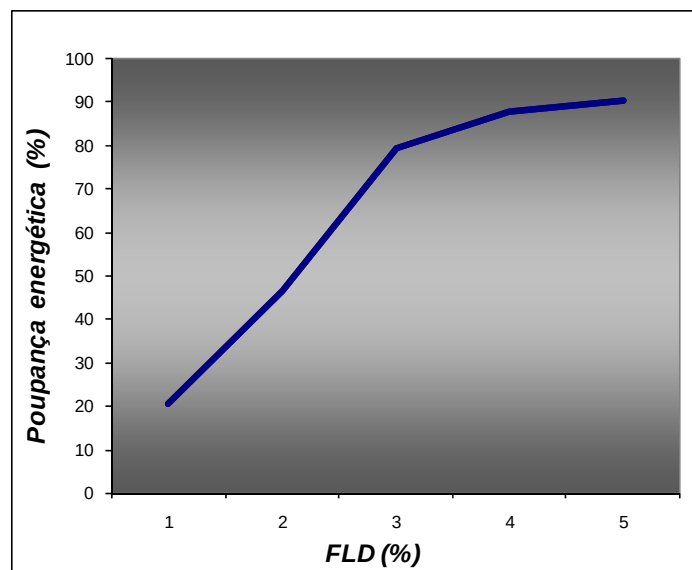


Figura 30 – Relação entre poupança energética e o FLD.

4.5.1 Sensor Fotoelétrico com Regulação

Num sistema automático de controlo do fluxo luminoso através da utilização de sensores de luz, a disposição das luminárias, ou das fileiras na circunstância de haver várias, constitui um dos factores que mais influenciam os resultados de poupança energética. A Figura 31 ilustra um exemplo de aplicação. O compartimento representado é constituído por três fileiras de luminárias paralelas à(s) janela(s). Desta forma, é possível dividir a área em três zonas e consequentemente três grupos de controlo independentes.

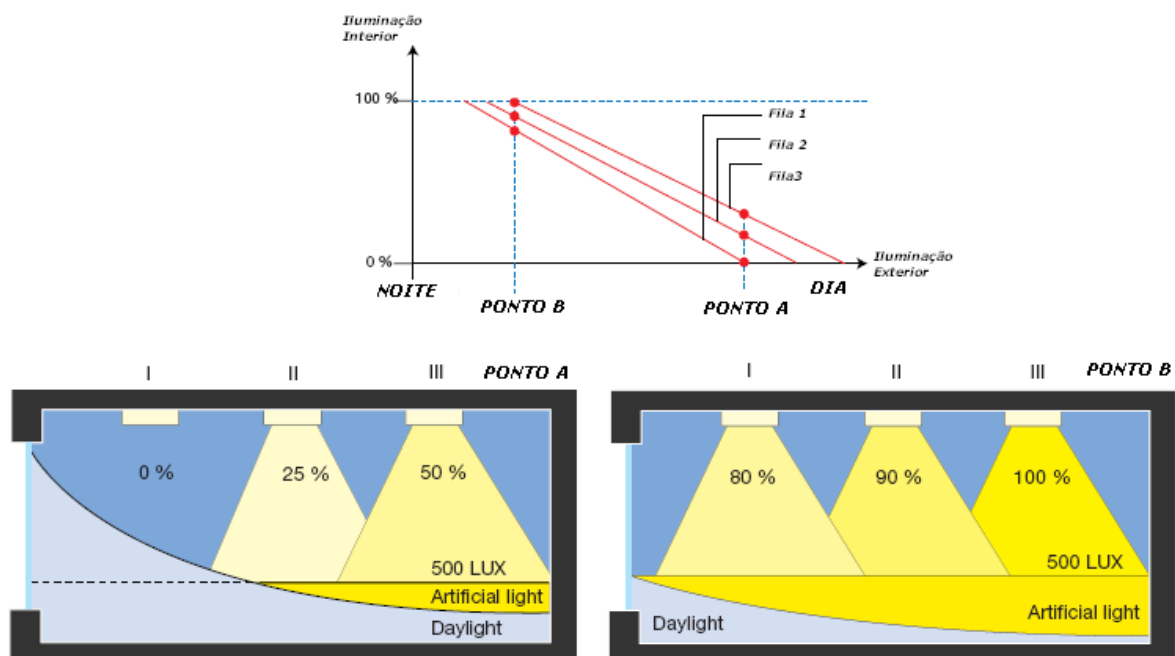


Figura 31 – Divisão por áreas.

O gráfico da Figura 31 descreve a variação do fluxo (em percentagem) ao longo do dia, onde se pode concluir facilmente que num período nocturno os valores de fluxo da iluminação artificial estão próximos dos 100%, enquanto durante o dia haverá grupos desligados e/ou com valores de fluxo luminoso muito reduzidos, o que permite grandes poupanças.

A primeira fase do cálculo luminotécnico, como referido anteriormente, consiste em determinar o(s) valor(es) de FLD, ou pelos métodos mencionados, ou através de uma estimativa do FLDM onde se torna necessário inserir na folha de cálculo as características da sala. A Tabela 2, a título de exemplo, contém todos os valores necessários para o cálculo do FLDM.

Tabela 2 – Características da Sala.

Características	
Largura Sala (m) :	3
Comprimento Sala (m) :	4
Altura Sala (m) :	3
Largura Janela (m) :	2
Comprimento Janela (m) :	1,5
τ_j :	0,9
$\alpha_{céu}$:	90
ρ :	0,5

Desta forma, e a partir da Equação 4.4, é possível estimar o FLDM.

$$FLDM = \frac{S_j \times \tau_j \times \alpha_{céu}}{S_t \times (1 - \rho^2)} \quad (4.4)$$

Conhecido o FLDM, que nesta situação seria de 4%, é essencial conhecer outros factores tais como: a latitude do local, o horário de funcionamento da sala, o número de horas que é necessário o funcionamento da iluminação, o tipo de lâmpadas e a respectiva potência (lâmpada mais balastro) que o compartimento contém. Com estes valores obtém-se o valor da potência anual consumida para uma situação extrema onde todas as luminárias estão ligadas o tempo inteiro.

A base para o cálculo aproximado da disponibilidade de luz natural é um diagrama lançado numa publicação da CIE que indica a iluminação externa média, medida num plano horizontal, na ausência de qualquer obstrução, não tendo em atenção a luz solar directa, em função da latitude.

Este diagrama tem uma vertente prática importante pois permite-nos determinar o valor médio anual do número de horas das quais a iluminância exterior é suficiente para garantir um valor desejado de iluminação interior. Este valor é obtido em função dos vários horários de trabalho diário e através de um valor de percentagem de horas como indica a Figura 32.

Para compreensão deste diagrama, será dado um exemplo de como se obtém o número de horas em que a disponibilidade da luz natural é suficiente. Este valor será utilizado no cálculo luminotécnico como irá ser demonstrado.

Á priori é necessário definir o horário de funcionamento diário do compartimento em questão. O diagrama da Figura 32 representa um esquema simplificado correspondente a um horário de funcionamento das 9h às 17h (foi considerado 8h por dia e 6 dias por semana, com um total de 2304h por ano). Desta forma, e continuando o exemplo deste capítulo, para um compartimento situado num local com uma latitude de 40°, pretende-se que a iluminação externa seja suficiente para assegurar um nível de iluminação interna de 500 lux, com o FLDM determinado de 4%. Assim, conhecendo o valor do FLDM (que irá ser constante ao longo de todo o cálculo), o valor da E_{int} e utilizando a equação 4.1 do FLD, determinamos o valor da iluminância exterior (E_{ex}):

$$E_{ext.} = \frac{E_{int.}}{FLD} = \frac{500}{0,04} = 12500 \text{ lux} \quad (4.5)$$

Necessitamos desta forma, para garantir um nível de 500 lux no interior, pelo menos uma iluminância externa aproximadamente de 12500 lux. Consultando agora a Figura 32, verifica-se que para uma latitude de 40° N e para uma iluminação externa de 12500 lux a percentagem associada é de aproximadamente 80%, que representa a percentagem das horas de trabalho durante o ano para as quais é suficiente a luz natural para garantir um nível de 500 lux. É importante relembrar o facto de ser um diagrama relativamente pessimista, uma vez que se considera um céu encoberto.

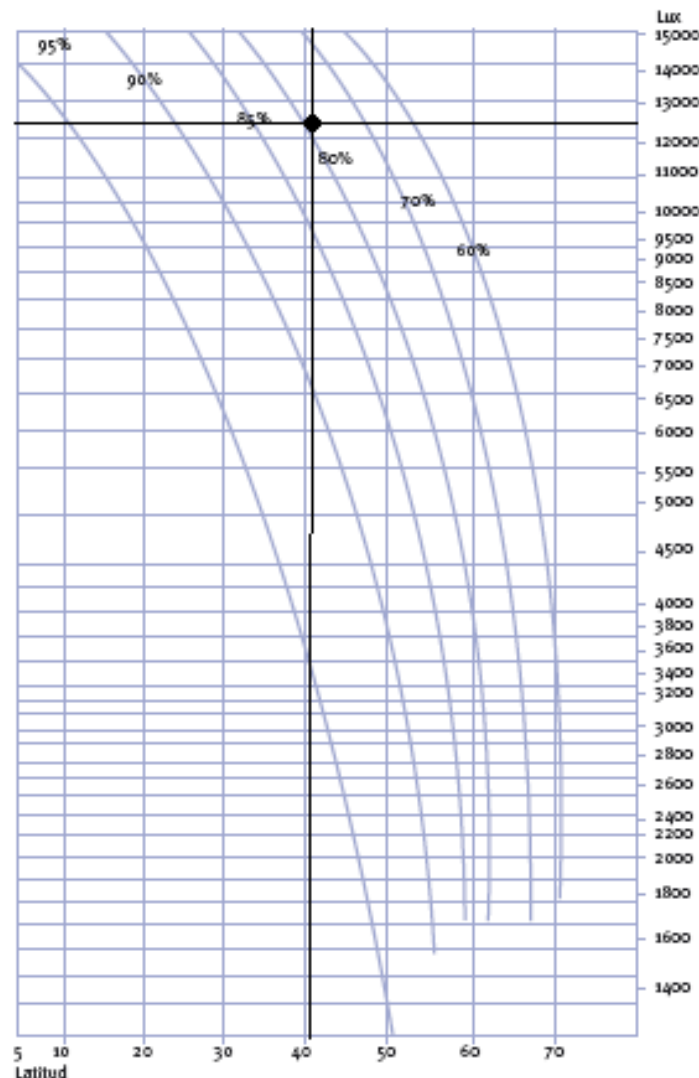


Figura 32 – Disponibilidade de luz exterior em função da latitude [2].

Todo este processo é repetido para diferentes valores de E_{int} como indica na Tabela 3, uma vez que o fluxo luminoso de cada lâmpada é expresso em percentagem, para o cálculo luminotécnico, subdividido numa escala de 10, para posteriormente se relacionar com os obtidos da Figura 32. Esta subdivisão por patamares do fluxo das lâmpadas está directamente associada a diferentes valores de iluminância interior (ver Tabela 3)

Tabela 3 – Leitura da Figura 32.

<i>Iluminação devida à luz natural (lux)</i>	<i>Iluminação exterior necessária (lux)</i>	<i>Horas em que a luz diurna é insuficiente</i>	<i>Fluxo % da lâmpada</i>
≥ 500	12500	461	0
450	11250	415	10
400	10000	369	20
350	8750	323	30
300	7500	276	40
250	6250	207	50
200	5000	161	60
150	3750	138	70
100	2500	69	80
50	1250	0	90
0	0	0	100

Os valores da terceira coluna da Tabela 3 correspondem ao número médio de horas num ano em que a luz diurna não é suficiente, isto é, quantificam os valores percentuais retirados da Figura 32. O valor de 461h foi obtido da seguinte forma:

$$461 = (1 - 0,8) \times n^{\circ} \text{ total de horas} = 0,2 \times 2304 \quad (4.6)$$

Continuando o cálculo a partir da primeira linha e da potência da lâmpada, facilmente se obtém a potência total das lâmpadas para cada patamar que, juntamente com o número de horas de funcionamento a essa potência, irá permitir determinar a estimativa da Energia consumida. Naturalmente, o somatório da coluna *horas de funcionamento a essa potência* será igual ao número total de horas de funcionamento anual.

$$1843 = n^{\circ} \text{ total de horas} - 461 = 2304 - 461 \quad (4.7)$$

Finalmente, pela Tabela 4, retira-se o novo valor da energia consumida em cada patamar que é o produto do número de horas de funcionamento pela potência total das lâmpadas. O somatório de todas as potências corresponde ao valor da energia total consumida que, relacionando com o consumo inicial, indica a percentagem de poupança energética anual.

Tabela 4 – Cálculo da Energia consumida.

<i>Fluxo % da lâmpada</i>	<i>Potência % da lâmpada</i>	<i>Potência total das lâmpadas (W)</i>	<i>Horas de funcionamento a essa potência (h)</i>	<i>Energia consumida (kWh)</i>
0	0	0	1843,2	0
10	25	55	46,08	2,53
20	33	72,6	46,08	3,35
30	42	92,4	46,08	4,26
40	50	110	46,08	5,07
50	60	132	69,12	9,12
60	68	149,6	46,08	6,89
70	75	165	23,04	3,80
80	83	182,6	69,12	12,62
90	92	202,4	69,12	13,99
100	100	220	0	0,00
Total:				61,64

4.5.2 Sensor de Presença ON/OFF

Os sensores de presença podem ser utilizados como um complemento à regulação automática de fluxo ou empregados independentemente. No caso de apenas se utilizar um controlo automático (ou manual) on/off através dos sensores de presença os resultados de poupança energética estão obviamente relacionados directamente com a probabilidade de o local ser ocupado.

O processo de cálculo é idêntico ao descrito anteriormente mas desta vez teremos apenas dois patamares: para os 500 lux (situação em que o sistema está *OFF*) e para os 0 lux (sistema *ON*). No caso de estudo serão apresentados os valores de poupança desta solução.

4.5.3 Condução de Luz

Relativamente a todas as TIIN mencionadas no capítulo 3 adaptam-se a esta metodologia e ao cálculo pelo facto de permitirem aumentar o valor do FLD ou a sua estimativa.

Na utilização de uma clarabóia ou de um tubo reflector colocados no interior do compartimento, o cálculo do FLDM terá de ser determinado com parcelas distintas, isto é, determina-se o valor do FLDM resultante das janelas e em seguida adiciona-se o valor correspondente à clarabóia/tubo de luz, que como referido anteriormente terá um ângulo de céu de 180°, caso seja colocado no tecto. A sua área de superfície está sujeita a um coeficiente de transmissão devido às perdas por reflexão e determina-se a partir da equação 4.8 (r é o seu raio). Mais uma vez nos casos de estudo irá ser dado um exemplo.

$$S_j = 2\pi \times r^2 \quad (4.8)$$

5. Casos de Estudo

Aplicações da Metodologia Proposta.

No capítulo 4 apresentou-se a metodologia proposta para a integração da iluminação natural, desta forma, segue-se uma simulação de casos reais onde se pretende, mediante a aplicação das TIIN, quantificar a eficiência energética correspondente.

Este capítulo contém um exemplo de aplicação de um sistema automático de regulação de fluxo, em seguida um controlo ON/OFF e por fim será analisado o impacto dos condutores de luz.

5.1 Sensor Fotoeléctrico com Regulação

5.1.1 Local de estudo

Optou-se por estudar em detalhe uma sala de laboratório do edifício J da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), visto ser ilustrativa da potencialidade de poupança energética aproveitando a iluminação natural.

A latitude, como já referida anteriormente, influencia praticamente todos os valores em estudo, visto ser uma característica base para todo o problema. O valor de latitude na cidade do Porto é de 41° N. Relativamente ao número de horas ao qual se considerou que a sala irá ser utilizada optou-se por um horário de trabalho das 9h às 17h, que corresponde a 8 horas por dia e 6 dias por semana.

A sala situa-se no piso 2 do edifício e é utilizada para projectos de energia. Tem aproximadamente uma área de 79m² (ver Figura 33) e o controlo da iluminação é feito por um interruptor duplo.

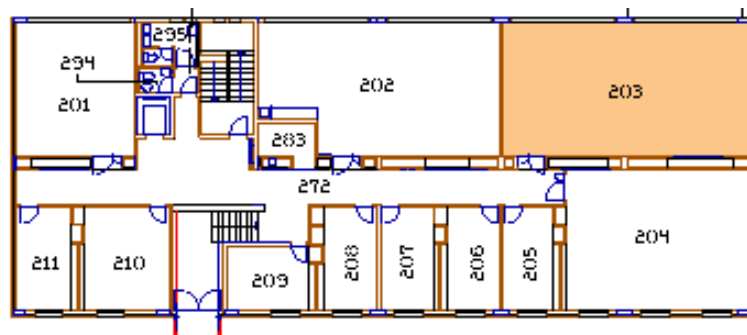


Figura 33 – Sala de projectos.

5.1.2 Características Interiores

As características interiores da sala são: comprimento 12 metros; largura 6,6 metros; 8 janelas iguais, com 1,1 metros de comprimento por 1 metro de largura.

Como a iluminância média recomendada para este tipo local é de 500 lux [40], a sala é constituída por 4 fileiras perpendiculares em relação às janelas, com 4 luminárias cada, correspondendo no total a 16 armaduras. Cada armadura possui uma lâmpada fluorescente T8 de 58W e balastro magnético. Com a ajuda do software *DIALux* foi possível fazer uma simulação capaz de ilustrar todo o espaço que vai ser alvo de análise (ver Figura 34).



Figura 34 – Ilustração da sala através do DIALux.

5.1.3 Resultados do Cálculo luminotécnico

Optou-se por determinar um valor de FLDM, considerando desta forma uma única área na sala. As características para a estimativa do FLDM estão representadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características da Sala.

Características	
Largura Sala (m) :	6,6
Comprimento Sala (m) :	12
Altura Sala (m) :	3
Número de janelas :	8
Largura Janela (m) :	1
Comprimento Janela (m) :	1,1
τ_j :	0,9
$\alpha_{céu}$:	90
ρ :	0,5

Desta forma, e a partir da Equação 5.1, é possível estimar o FLDM.

$$FLDM = \frac{S_j \times \tau_j \times \alpha_{céu}}{S_t \times (1 - \rho^2)} \quad (5.1)$$

Substituindo os valores na expressão, o resultado obtido para o FLDM para a sala de projectos é de 2,9 (%), do qual se considerou aproximadamente 3 (%), uma vez que se trata de um cenário pessimista.

Conhecido o FLD, é necessário conhecer outros factores tais como: a latitude do local, o horário de funcionamento da sala, o número de horas que é necessário o funcionamento da iluminação, o tipo de lâmpadas e a respectiva potência (lâmpada mais balastro) que a sala contém (ver Tabela 6).

Tabela 6 – Valores base para o cálculo luminotécnico

Latitude °	41 N
Hórorio	09h-17h
Número horas/dia	8
Número dias/ano	288
Número horas/ano	2304
Número de lâmpadas	16
Potência da lâmpada + balastro (W):	72
Energia consumida num ano (kWh):	2654

A energia anual consumida é então de 2654 kWh, para uma situação extrema onde todas as luminárias estão ligadas o tempo todo. O principal objectivo do estudo será chegar a um novo valor de consumo anual correspondente à aplicação do sistema *modularDIM* e compará-lo com o actual.

Com base no diagrama da CIE mencionado no capítulo anterior determina-se o número de horas em que a luz diurna é insuficiente para cada patamar de iluminação. Os resultados podem ser consultados na Tabela 7.

Tabela 7 – Leitura da Figura 32

Iluminação devida à luz natural (lux)	Iluminação exterior necessária (lux)	Horas em que a luz diurna é insuficiente	Fluxo % da lâmpada
>=500	16667	945	0
450	15000	760	10
400	13333	599	20
350	11667	461	30
300	10000	415	40
250	8333	346	50
200	6667	300	60
150	5000	207	70
100	3333	138	80
50	1667	46	90
0	0	0	100

O Anexo B contém um gráfico com a percentagem do fluxo luminoso emitido por uma lâmpada fluorescente, em função da percentagem da potência absorvida pelo conjunto lâmpada mais balastro electrónico. Esses valores vêm referidos na Tabela 8.

Finalizando o cálculo (ver Tabela 8) retira-se o novo valor da Energia total consumida que, comparando com o consumo inicial, resultaria numa poupança Energética anual na ordem dos 78% (1-588/2654).

Tabela 8 – Cálculo da Energia consumida

<i>Fluxo % da lâmpada</i>	<i>Potência % da lâmpada</i>	<i>Potência total das lâmpadas (W)</i>	<i>Horas de funcionamento a essa potência (h)</i>	<i>Energia consumida (kWh)</i>
0	0	0	1359,36	0
10	25	288	184,32	53,08
20	33	380,16	161,28	61,31
30	42	483,84	138,24	66,89
40	50	576	46,08	26,54
50	60	691,2	69,12	47,78
60	68	783,36	46,08	36,10
70	75	864	92,16	79,63
80	83	956,16	69,12	66,09
90	92	1059,84	92,16	97,67
100	100	1152	46,08	53,08
Total:				588,17

Para compreender este valor alcançado de 78% de poupança energética é necessário referir alguns aspectos que poderão elevar este valor. Para estimar o valor inicial da Energia consumida, considerou-se um controlo totalmente automático, uma vez que não se considerou o papel do usuário, isto é, todas as luminárias estarão ligadas durante todo o horário de funcionamento da sala, o que no caso de se tratar de um *open space* ou de uns escritórios, este valor estaria mais adequado, pois como se trata de uma sala de aulas o resultado poderá ser impróprio. Contudo, o que se pretende é demonstrar a potencialidade do aproveitamento da iluminação natural.

5.1.4 Estudo Económico

Relativamente ao estudo económico, foi realizada uma estimativa do valor do investimento de todo o equipamento necessário para a implementação do sistema modularDIM, com o objectivo de determinar o retorno económico com base na poupança energética que todo este processo originara.

Embora impróprio, ou inadequado fazer-se uma análise económica de um caso isolado, isto é, apenas de um compartimento, uma vez que os módulos suportam, como referido anteriormente, três grupos de iluminação com 100 dispositivos DSI, a percepção do potencial de poupança económica ficou evidenciada.

A Tabela 9 descreve todo o equipamento utilizado, custo unitário e total. Os preços apresentados são de catálogo e foram fornecidos pela *EEE (Empresa de Equipamento Eléctrico, S.A.)* o que significa que na prática estes valores seriam influenciados por vários factores que resultaria numa redução dos mesmos, tais como: encomendas de grandes quantidades; descontos por contrato, etc.

Tabela 9 – Investimento

Investimento			
<i>Descrição material</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Custo unitário (€)</i>	<i>Custo total (€)</i>
Balastro dimerizável T8 (58W)	16	51,6	825,6
ModularDIM BASIC	1	313	313
ModularDIM DM	1	313	313
Daylight SENSOR	1	129	129

Efectuando o somatório dos custos totais obtém-se o valor correspondente ao investimento total: **1264 €**.

Uma vez que o valor do custo de energia, kWh (quilowatt hora), varia consoante o tarifário, optou-se por considerar o valor de standard de 0,1216 €/kWh (euros por quilowatt hora). Consultando os resultados apresentados na Tabela 10, chega-se a uma poupança económica anual de **251 €** (323-72).

Tabela 10 – Resultados económicos

Preço (€/kWh) :	0,1216
Energia consumida num ano (kWh):	2654,2
Custo (€) :	323
Nova Energia consumida num ano (kWh):	588,17
Custo (€) :	72

Com estes resultados facilmente se determina o tempo de retorno de investimento (*Payback-PB*), que neste caso será de aproximadamente de **5 anos** (1264/251). Este valor corresponde a uma poupança energética de 78%, porém, e mesmo que o valor percentual de poupança seja inferior noutras situações, é necessário ter em conta que o investimento foi direccionado apenas para um compartimento, isto é, no caso de um edifício com várias salas, o valor do investimento dos módulos (ver Tabela 9) seria distribuído o que origina um valor de *Payback* menor.

5.2 Controlo Automático ON/OFF Sensor de Presença

Para esta situação o procedimento a nível de cálculo para estimar a poupança torna-se ainda mais simples do que o anterior. Todo o processo matemático é idêntico excepto na divisão por patamares de iluminância devido à luz natural, como foi referido no capítulo 4.

O estudo foi realizado no mesmo local, para que desta forma seja possível comparar as poupanças de cada solução.

O valor total da energia consumida com a aplicação deste sistema o resultado foi 1360 kWh. O que origina uma poupança energética anual de 49% (1-1360/2654) e uma poupança económica anual de **157 €** (323-165).

5.3 Condutores de Luz

Novamente no mesmo local, a estimativa do FLDM inicial de 3% irá ser somada ao valor de FLDM, correspondente a uma simulação de aplicação de uma clarabóia no tecto, no centro da sala e com 1 metro de raio, de 2,5%. Desta forma o FLDM total do local seria aproximadamente de 5,5%.

Optou-se nesta situação por uma análise superficial da poupança proveniente desta solução, pois como se verificou na Figura 30 do capítulo 4, onde para um valor de FLD de 5% correspondia uma poupança na ordem dos 90%. Desta forma para um valor de FLD superior a 5% e para o horário referido, a poupança seria certamente próxima dos 100%.

5.4 Exemplos de Casos Práticos Já Realizados

Para além do caso de estudo descrito neste capítulo, muitos mais podem ser encontrados em literaturas referentes à gestão de sistemas de controlo, provenientes de trabalhos já realizados por agências, como a Agência Internacional de Energia (AIE), sobre a poupança de energia [2]. Neste ponto irão ser enunciados alguns exemplos de casos práticos que foram realizados e implementados em Espanha.

5.4.2 Escritório da fábrica EADS-CASA

Neste primeiro caso, o edifício em questão é completamente novo e é situado em Getafe, Madrid. O sistema de regulação automático em questão, análogo ao da *ModularDIM*, foi o *LIGHTMASTER* da *PHILIPS* e foi aplicado a vários escritórios correspondendo a uma área total de 28 000 m².

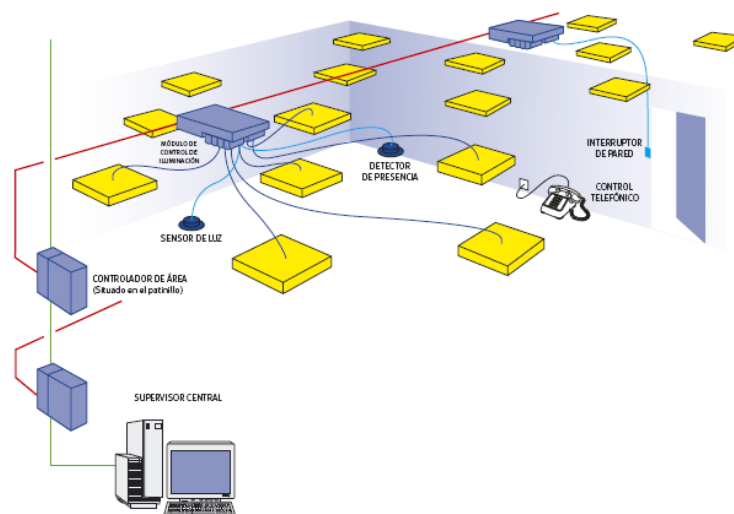


Figura 35 – Esquema do sistema de regulação [2]

A Figura 35 ilustra o sistema de regulação automática utilizado, com os respectivos sensores de luz natural e de presença que permitiram manter o nível de iluminação necessário ou recomendado constante. Para além da aplicação deste sis-

tema, o nível médio de iluminação foi alterado para o recomendado de 500 lux, em vez dos 750 lux que estavam dimensionados nos escritórios.

Como resultados deste estudo não existem dados dos consumos de energia, porém o número total de horas de funcionamento das luminárias passou, devido às medidas mencionadas, de 101 850 horas para 50 566 horas. Com isto, podemos concluir que a poupança de energia eléctrica é de 51%, dos quais 25% são devido à redução do nível de 750 lux para os 500 lux e por consequência 26% atribuídos ao aproveitamento da luz natural [2].

5.4.3 Edifício de escritórios da torre AGBAR

Trata-se igualmente de um edifício novo situado em Barcelona e o sistema aplicado foi idêntico ao anterior referido, fixando o valor médio de iluminância nos 500 lux, com uma superfície total de 26 000 m². A Figura 36 ilustra como foi feito o controlo automático dos escritórios.

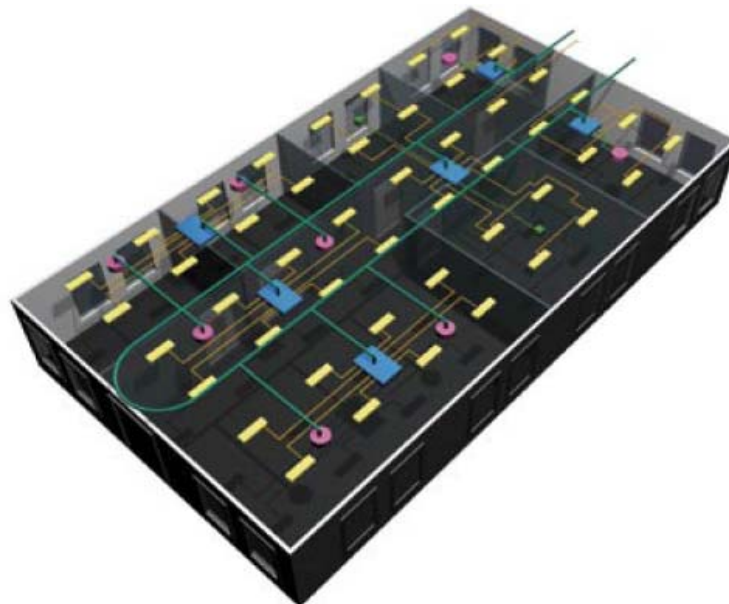


Figura 36 - Esquema do sistema de regulação [2]

Foram feitas medições ao longo de um mês, com um horário de funcionamento das luminárias de 15 horas por dia em 24 plantas, onde se obteve os seguintes resultados de consumo médio de potência:

- Sem aproveitamento de iluminação natural: 1.257.620 kWh;
- Com aproveitamento de iluminação natural: 730.700 kWh.

Esta poupança foi possível graças ao triplo regulamento instalado no edifício, isto é, regulação do fluxo através de sensores de luz, de sensores de presença e controlo horário.

6. Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento

*Considerações finais e Perspectivas
para trabalhos futuros.*

Foi proposto neste trabalho uma metodologia para a integração da iluminação natural com um sistema artificial, assim como uma ferramenta capaz de estimar a poupança energética e económica das várias medidas que se podem aplicar, apresentando a sua eficiência energética.

Para que se obtenha uma iluminação de qualidade e energeticamente eficiente, esta deve ser planeada obedecendo a critérios técnicos e sabendo-se que a concepção do ambiente é um dado fundamental para a qualidade da iluminação, o arquitecto e o projectista luminotécnico devem trabalhar em conjunto desde as fases iniciais do projecto arquitectónico. Assim, o projectista luminotécnico terá obviamente como função procurar um sistema de iluminação energeticamente eficiente onde terá que levar em consideração não somente as fontes artificiais, mas também a presença da luz natural no ambiente, na perspectiva de dimensionar o sistema de iluminação artificial dividindo o ambiente em zonas de iluminação não tendo apenas em conta a aplicação de distribuição uniforme de luminárias dentro do ambiente.

Foi desenvolvida uma metodologia genérica onde é possível adaptar várias soluções tecnológicas para a integração da iluminação natural e dessa forma quantificar o seu impacto no interior de um compartimento. Esta metodologia assume valores médios anuais de disponibilidade de luz natural, associados ao céu encoberto padrão da CIE.

Os sistemas automáticos de controlo apresentados e os condutores de luz natural apresentam-se como opções, com enorme potencial de poupança energética, a serem utilizados na integração dos sistemas de iluminação natural e artificial. Estes sistemas são capazes de reduzir o tempo de utilização e a potência consumida do sistema artificial e consequentemente diminuem o consumo de energia gasta em iluminação.

Em resumo, conseguiu-se uma formulação genérica que é aplicada à maioria dos casos das TIIN identificadas nesta tese. A Figura 37 ilustra os valores médios de poupança energética que poderá resultar do uso de alguns sistemas apresentados.

On-Off	Regulação	Regulação e Condução de Luz
Até	Até	Até
-50%	-75%	-90%

Figura 37 - Poupança energética.

Poucos foram os estudos ainda realizados neste campo e por essa razão o autor considera necessário o desenvolvimento de diversos trabalhos futuros nesta vertente. Um dos aspectos a aperfeiçoar, seria integrar esta metodologia proposta a outros pacotes computacionais que fossem capazes de, por exemplo, simular uma rotina da iluminação artificial mais precisa ou avaliar a qualidade térmica devido à iluminação natural. Seria interessante desenvolver a ferramenta criada de forma a se conseguir estimar ou quantificar a iluminação natural proveniente das novas tecnologias como a condução por fibras ópticas da iluminância exterior.

Toda esta metodologia baseia-se nas condições de céu encoberto. Seria igualmente importante uma avaliação sob as condições de céu limpo e intermédio, assim como o desenvolvimento de programas computacionais capazes de simular a iluminação natural no interior de um edifício para os diferentes tipos de céu. Para que desta forma a estimativa anual da disponibilidade da luz natural fosse mais exacta e fosse possível adaptá-la às condições do nosso país.

Bibliografia e Referências

- [1] Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings, ASHRAE, Atlanta U.S.A., 2004;
- [2] Guía Técnica Aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios, Comité Español de Iluminación, Madrid, Maio de 2005;
- [3] ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment, SI Edition, Atlanta 2004
- [4] Code for Lighting, CIBSE, 2002
- [5] Fluorescent Lamps and the Environment, NEMA, Janeiro 2001
- [6] Santos, A. J. C., Desenvolvimento de uma metodologia de caracterização das condições de iluminação natural nos edifícios baseada na avaliação “in situ”, LNEC, 2003.
- [7] Manual de Boas Práticas de Eficiência Energética, BCSD Portugal, Coimbra 2005
- [8] Rafael, Rui Paz; Boas Práticas de Eficiência Energética em Iluminação, Workshop Greenlight, Porto, 5 de Fevereiro 2004
- [9] Rodrigues, Pierre; Manual de Iluminação Eficiente, 1ª Edição, Workshop Greenlight, Porto, 5 de Fevereiro 2004
- [10] Sá, Carlos Araújo; Motores Eléctricos de Rendimento Melhorado, Ingenium edições, nº91, 2ªsérie, Lisboa, Março/Abril 2007, pp 91-93
- [11] The IESNA Lighting Handbook, Reference & Application, 9ª Edição, U.S.A. New York, 2000

- [12] Hopkinson, R.G. ; Petherbridge, P. ; Longmore, J. , Iluminação natural. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1980
- [13] Peixoto, J. P., A Radiação Solar e o Ambiente, SEOA/CNA, Lisboa, 1981
- [14] Commission Internationale de L'éclairage (CIE), Spatial Distribution of Daylight: Luminance distribution of various reference skies. Technical report. CIE, Pub. CIE N°110, Vienna, 1994.
- [15] Jacobson, M. Z., Fundamentals of Atmospheric Modeling. Cambridge University Press, Cambridge, 1999
- [16] Carvalho, L.C., Insolação e Iluminação Natural nos Edifícios. Mestrado Eng. Física. FCUL, Lisboa, 1997
- [17] Duffie, J. A.; Beckman, W. A. , Solar Engineering of Thermal Process, 2nd Ed., John Wiley & Sons. NY, 1991
- [18] Enarun, D.; Littlefair, P., Luminance Models for Overcast Skies: Assessment Using Measured Data, Light. Res. & Tech., 27 (1), p. 53-58, 1995
- [19] Robbins, C.L., Daylighting Design and Analysis. Van Nostrand Reinhold, N.Y., 1986
- [20] Commission Internationale de L'éclairage (CIE), Daylight. Recommendations for the Calculation of Natural Light. Pub. CIE N° 16 (E-3.2), 1970
- [21] Commission Internationale de L'éclairage (CIE), International Lighting Vocabulary, 4th Ed. IEC/CIE, Paris, 1987
- [22] Robinson, P.J.; Hendersen-Sellers, A., Contemporary Climatology. 2nd Ed. Longman, London, 1999
- [23] Boyce, P.R., Human Factors in Lighting. Applied Science Publishers, 1984
- [24] Commission Internationale de L'éclairage (CIE), Contrast and Visibility. Pub. CIE 95, 1992

- [25] Berruto, V. e Fontoynt, M., Assessment of Daylighting Quality With Field Measurements. Lyon, ENTPE/CNRS, 1995
- [26] Luckesh, M. e Guth, S. , Brightness in Visual Field at Borderline Between Comfort and Discomfort. Illuminating Engineering. NY, 44, 1949
- [27] Hopkinson, R. e Bradley, R. , A study of Glare from Very Large Sources. Illuminating Engineering, London 55 (5), 1960
- [28] Littlefair, P., Average daylight factor: A simple basis for daylight design, BRE IP 15/88. Garston, BRE, 1988
- [29] www.adene.pt, acedido em Março de 2007
- [30] www.adeporto.com, acedido em Abril de 2007
- [31] www.ashrae.org, acedido em Novembro de 2007
- [32] www.buildinggreen.com, acedido em Dezembro de 2007
- [33] www.cibse.org, acedido em Novembro de 2007
- [34] www.cie.co.at, acedido em Novembro de 2007
- [35] www.dialux.com, acedido em Dezembro de 2007
- [36] www.edp.pt, acedido em Novembro de 2007
- [37] www.ecw.org, acedido em Novembro de 2007
- [38] www.eficiencia-energetica.com, acedido em Janeiro de 2008

[39] www.energiasrenovaveis.com, acedido em Dezembro de 2007

[40] www.fe.up.pt/~arminio, acedido em Novembro de 2007

[41] www.iea.org, acedido em Dezembro de 2007

[42] www.luz.philips.com.br, acedido em Novembro de 2007

[43] www.tridonicatco.com, acedido em Janeiro de 2008

[44] www.polirigido.com, acedido em Novembro de 2007

[45] www.solatube.com, acedido em Novembro de 2007

ANEXO A

Conceitos Gerais

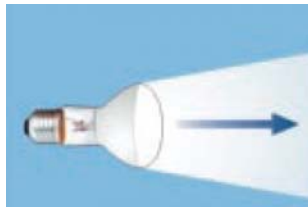
Conceitos Gerais

- Radiação - é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação electromagnética;
- Radiação Visível (Luz) - é uma gama de comprimentos de onda a que o olho humano é sensível;
- Iluminação - Aplicação de radiação visível a objectos e à sua envolvente para que possam ser vistos;
- Fluxo Luminoso (F) - Quantidade de luz emitida em todas as direcções por uma fonte luminosa durante um segundo, deve ser medido após as primeiras 100h de serviço, pois é quando atinge o seu valor de funcionamento estável. Tem como unidade o **lúmen** (lm) e com auxílio da fórmula $Q = F.t$ (lm.s), serve para calcular a quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa;



Fluxo luminoso

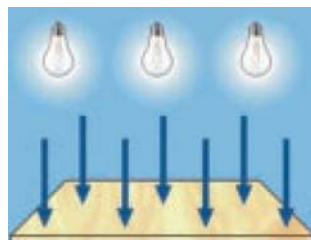
- Intensidade Luminosa (I) - Fluxo luminoso irradiado na direcção de um determinado ponto. De uma forma geral as fontes luminosas não emitem igualmente em todas as direcções. Deste modo, é necessário conhecer a intensidade luminosa em cada direcção. Para melhor entender esta grandeza é necessário ter a noção de ângulo sólido¹. A sua unidade usada em SI é a **candela**(cd) e é dada por $I = \Phi / w$;



Intensidade luminosa

¹ Tratando-se de uma superfície esférica há necessidade de se definir ângulo sólido (w). É a relação entre a área (A) do sector desejado e o quadrado do raio (r). O ângulo sólido é medido em esterorradiano. $w = A / r^2$.

- Iluminância (E) - Quantidade de luz dentro de um ambiente, e pode ser medida com o auxílio de um luxímetro (célula fotoelétrica, sobre a qual se faz incidir o fluxo luminoso, ver **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). A sua unidade SI é o **lux**. Um lux corresponde à iluminância de uma superfície plana de um metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lúmen. Como o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente, a iluminância não será a mesma em todos os pontos da área em questão. Baseado em pesquisas e estudos já realizados há níveis de iluminância recomendados² para diferentes locais. Por exemplo para uma sala de leitura (biblioteca) será de 500 lux e para uma sala de aula (escola) será 300 lux. **$E = \Phi / S$** ;



Iluminância



Luxímetro

² Recomendações CIBSE – Chartered Institute Building Service Engineering

- A Luminância (L) é a Intensidade Luminosa produzida ou reflectida por uma superfície existente. A distribuição da luminância no campo de visão das pessoas numa área de trabalho, proporcionada pelas várias superfícies dentro da área (luminárias, janelas, tecto, parede, piso e superfície de trabalho), deve ser considerada como complemento à determinação das iluminâncias (lux) do ambiente, a fim de evitar ofuscamento. É dada por $L=I/S_a$;
- A Eficácia Luminosa é calculada pelo quociente entre o fluxo luminoso emitido em lúmens e a potência consumida pela lâmpada em Watt (lm/W). É uma das grandezas utilizadas para selecção de fontes luminosas a utilizar em instalações de iluminação e retrata a quantidade de luz que uma fonte luminosa consegue produzir com uma determinada potência eléctrica consumida. Em teoria o seu valor máximo será de 683 lm/W³.



Eficiência luminosa

³ Valor atingido para uma luz monocromática, com um comprimento de onda igual a 555 nm (verde).

ANEXO B

Relação Fluxo Potência

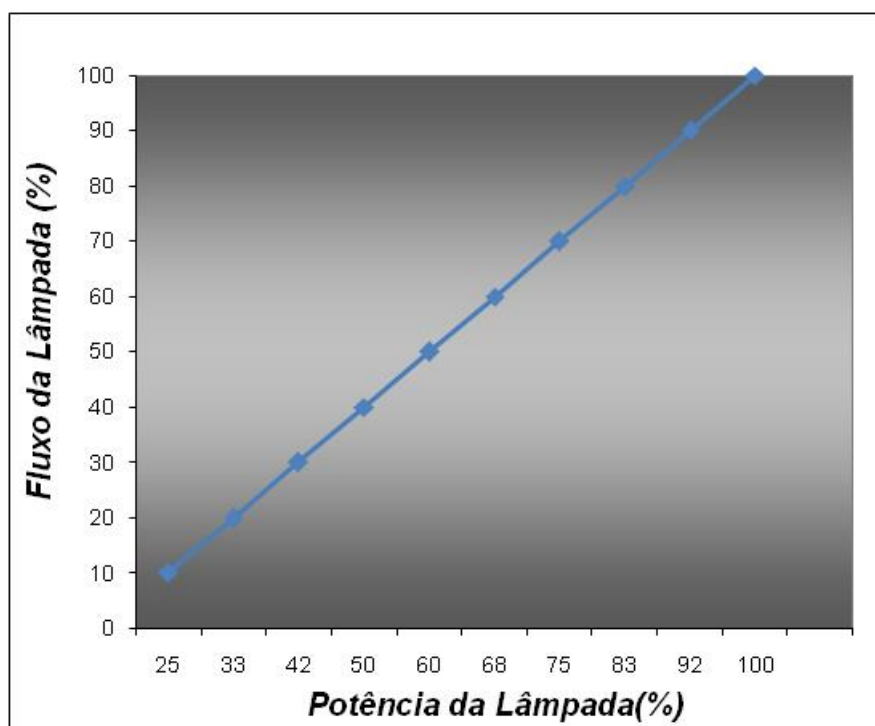


Gráfico de relação do fluxo luminoso e potência absorvida de uma lâmpada fluorescente