



TÉCNICO
LISBOA

Gestão Automática de Iluminação em Salas de Aula do IST

Bruno Miguel Grosso Marques Ferreira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Prof. Mário António da Silva Neves Ramalho

Júri

Presidente: Prof. Carlos Baptista Cardeira

Orientador: Prof. Mário António da Silva Neves Ramalho

Vogal: Prof. Rui Pedro da Costa Neto

Outubro 2021

Agradecimentos

Primeiramente, queria agradecer aos professores Carlos Silva e Mário Ramalho por terem paciência e me guiarem neste processo longo.

Também a todos os meus amigos do curso, que felizmente são demasiados para nomear, por serem a melhor parte destes anos e pelo apoio que sempre me deram ao longo dos mesmos.

Mais importante ainda, é agradecer à minha família, não só por todos os anos da minha existência, mas também, por, neste em particular que tivemos de estar juntos todos os dias, o dia todo, ter sido um processo agradável.

Resumo

Sustentabilidade e eficiência energética são temas que têm sido cada vez mais relevantes. O maior consumo energético na sociedade corresponde a edifícios, e desse, 20% vem de iluminação [1][2]. O aproveitamento da luz natural e redução do consumo de luz artificial é então, fulcral em questões de sustentabilidade, assim como de conforto visual, já que o olho humano está mais adaptado para luz natural. Esta dissertação tem o objetivo de estudar um algoritmo de controlo automático para a iluminação de uma sala de aula do IST. Isto será feito controlando a posição dos estores e as luminárias, de forma a ter o menor consumo energético, mantendo sempre o conforto visual. Para compreender o efeito que as várias configurações dos estores tinham na iluminância dentro da sala, foram feitas, e posteriormente validadas, simulações usando o programa *EnergyPlus*. De forma análoga, foi feito o mesmo para as luminárias, mas recorrendo ao programa *Dialux*. Duas propostas de controlo são feitas. Uma delas é simplesmente baseada na altura do dia, mas apenas dá informação sobre as venezianas. A outra usa as simulações feitas anteriormente para que, juntamente com o dia, hora, e a iluminância da sala medida por um sensor, preveja qual a melhor opção a tomar. A forma mais simples conseguiu prever boas opções de controlo para os estores. O controlo com uso das simulações também alcançou sempre conforto visual, com uso combinado de luz natural e artificial.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Gestão de Energia, Controlo Automático, Iluminação, Venezianas

Abstract

Sustainability and energy efficiency are issues that have been increasingly important recently. Since the highest energy consumption in society corresponds to buildings, and a significant part of that comes from lighting, taking advantage of natural light and reducing the consumption of artificial light is not only central to sustainability issues, but also visual comfort, since the human eye is more adapted to natural light. This dissertation has, therefore, the objective of designing an automatic control algorithm for the lighting of an IST classroom. Mainly this will be done by controlling the position of the blinds and the connected lighting fixtures, in order to use their configuration that corresponds to the lowest energy consumption, always maintaining visual comfort. In order to understand the effect that the various configurations of the blinds had on the illuminance inside the room, simulations were made, and later validated, using the *EnergyPlus* program. Similarly, the same was done for the luminaires, but using the *Dialux* program. Two control approaches are suggested. One is simply based on the time of day, but only gives information about the blinds. The other uses the simulations made previously so that, together with the day, time, and the illuminance of the room measured by a sensor, to predict which is the best option to take. The simple one always got good answers for the problem. The one that uses the simulations was able to always guarantee visual comfort with a mix of natural and artificial light.

Keywords: Sustainability, Automatic Control, Lighting, Blinds, Energy Management

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Tabelas	xi
Índice de Figuras	xiii
Nomenclatura	1
Glossário	1
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Contributos	3
1.4 Organização	4
2 Background	5
2.1 Iluminação	5
2.1.1 Teoria	5
2.1.2 Projeto luminotécnico	7
2.1.3 Hábitos de Iluminação	9
2.1.4 Luz Natural	10
2.1.5 Luz Artificial	13
2.2 Sala	14
2.2.1 Configurações	21
2.2.2 Luxímetro	24
2.3 Estratégia de Controlo	24
2.3.1 Software	29
2.3.2 Proposta de Controlo	33
2.4 Trabalho Prévio na mesma sala	35
3 Implementação	41
3.1 Metodologia	41
3.1.1 Algoritmo de Comando	41

3.1.2	Controlo por Previsão	42
3.2	Limitações	54
4	Resultados	55
4.1	Validação das Simulações	55
4.1.1	Dialux	55
4.1.2	EnergyPlus	56
4.2	Algoritmos de Controlo	57
4.2.1	Algoritmo de Comando	57
4.2.2	Controlo Preditivo	58
5	Conclusões	61
5.1	Resultados	61
5.2	Trabalho Futuro	61
	Bibliografia	63
A	Relatório Dialux	A.1

Índice de Tabelas

2.1	Grupos de aparência de cor de lâmpadas	9
2.2	Relação entre DF, aparência visual e performance térmica	12
2.3	Resumo de informação da Sala	20
2.4	Características das lâmpadas. Fonte:ficha técnica, Philips.com	20
2.5	Sensores existentes na sala	20
2.6	Exemplos de códigos e respetivo significado	23
3.1	Características das lâmpadas da sala e das utilizadas na simulação	44
3.2	Configurações de estores e respetivos ângulos de lamelas	49
3.3	Teste do sensor	54
4.1	Teste dos Resultados do Dialux, valores em lux	56
4.2	Resultados do teste às previsões de EnergyPlus	57
4.3	Resultados do controlo por comando	58
4.4	Resultados do teste do controlo Preditivo	59

Índice de Figuras

1.1	Planta do 1º piso do Pavilhão de Civil	2
1.2	Fotografias da sala V1.10	3
2.1	Curva fotópica CIE	6
2.2	Espectro Visível da luz (imagem de [11])	6
2.3	CCT e cor aparente de uma fonte de luz	8
2.4	Ângulo de Azimute e de Altitude (imagem de [26])	11
2.5	Sunpath Diagram, para Lisboa, retirado de	11
2.6	Diagrama fotométrico de uma luminária ([35])	14
2.7	Representação tridimensional de um diagrama fotométrico ([35])	14
2.8	Fotografias da sala, retiradas do website do IST	15
2.9	Controlador e interruptores dos estores	16
2.10	Controlador dos estores da sala	16
2.11	Estores numa posição	16
2.12	<i>Sunpath Diagram</i> para a localização da sala	18
2.13	Caixa com sensores da sala	19
2.14	Diagrama fotométrico das luminárias presentes na sala	19
2.15	Posições possíveis de cada estore	21
2.16	Temperaturas exterior e interior da sala, consoante a posição do estores	22
2.17	Posições das luminárias. Cada sub-figura representa as luminárias que cada interruptor liga/desliga	23
2.18	sensibilidade espectral do sensor e curva fotópica CIE	24
2.19	Diagrama genérico de um MPC com feedback	26
2.20	Representação da solução de Matta and Mahmud [47]	28
2.21	Fluxograma de [64]	31
2.22	Programa SketchUP juntamente EnergyPlus	33
2.23	Interface do IDF Editor	34
2.24	Fluxograma de controlo de iluminação de Oom [70]	36
2.25	Fluxograma de controlo térmico de Oom [70]	36
2.26	Transmissividade da janela segundo Martins [72]	37
2.27	Fluxograma de controlo de iluminação de Martins [72]	38

2.28	Definição dos ângulos para o cálculo de iluminância Salvador [73]	39
2.29	Fluxograma de cálculo de iluminância de Salvador [73]	39
3.1	Fluxograma do algoritmo de comando	42
3.2	Pontos de medição na sala para testes	43
3.3	Modelação da Sala no Dialux Evo	44
3.4	Diagrama Fotométrico das lâmpadas utilizadas	45
3.5	Comparação entre as luminárias ligadas para o caso médio e o caso (b)	46
3.6	Exemplos de Dialux com luminárias do lado da porta	47
3.7	Caso médio das luminárias do lado da janela	48
3.8	Definição do ângulo de inclinação das lamelas	49
3.9	Modelação da sala em EP	50
3.10	Illuminance Map	50
3.11	Shading Groups. Árvores e pavilhão Central	50
3.12	Ficheiro CSV resultante da simulação em EP	51
3.13	Fluxograma geral do algoritmo de Controlo	52
3.14	Fluxograma da escolha da configuração	53
3.15	Exemplo dos valores(não em lux) do sensor de iluminância da sala ao longo de um dia	54
4.1	Pontos de medição na sala para testes	56

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

Seja por questões ambientais, sociais ou económicas, desde o início do século que as questões de sustentabilidade têm tido uma importância cada vez maior. Estas mesmas podem estar relacionadas com a produção e utilização de energia renovável, com maior eficiência em todo o tipo de processos, ou simplesmente com a redução do consumo de energia.

Em Outubro de 2014, o Conselho Europeu chegou a acordo sobre os objetivos para 2030 em matéria de clima e energia, para os países da UE. Nestes inclui-se uma redução de 40% nas emissões de gases de efeito estufa face a 1990, uma melhoria de 32.5% (revisito em 2018) na eficiência energética, e, que pelo menos 27% da produção de energia venha de fontes renováveis,

Com estes objetivos ambiciosos são necessárias constantemente novas formas de atingir os mesmos. Quase 40% do consumo de energia no mundo está relacionado com edifícios, e em edifícios não residenciais 12% a 23% do seu consumo corresponde a gastos relacionados com iluminação ([1],[2]), sendo a segunda maior fonte de consumo, especialmente em escritórios, atrás de AVAC (30%-47%). Para além disso, os trabalhos [3] e [4] mostram como aproximadamente metade do consumo energético acontece em horas em que o espaço não está a ser utilizado, muito devido a ações dos ocupantes, como por exemplo deixar equipamentos e iluminação ligados. Verifica-se então que o controlo da iluminação é deveras importante para atingir os objetivos acima mencionados. Para além disso, poupanças em gastos energéticos traduzem-se em poupanças a níveis monetários. Isto pressupõe uma necessidade de diminuir estes gastos, mas sem comprometer o conforto visual, já que este é de mais alta importância no que se trata de produtividade num local de trabalho.

Os edifícios do Técnico Lisboa são um bom exemplo do que é acima referenciado, já que possuem um grande consumo energético associado a iluminação. O Pavilhão de Civil é o segundo edifício que mais consome energia no *Campus* por ser o edifício em que mais aulas decorrem. E sendo um edifício maioritariamente para aulas e escritórios, então maior parte do seu consumo está associado a AVAC, iluminação e utensílios como, por exemplo, computadores e projetores. O pavilhão possui 7 pisos (-3 a 4), mas as aulas ocorrem maioritariamente no piso 1, cuja planta está na figura 1.1 e onde está também

assinalada a sala sobre a qual esta dissertação incide. A sala em questão é a sala V1.10 do Pavilhão de Civil. É uma sala de aula, muito similar a todas as outras do pavilhão, e assim como quase todas as salas de aula neste pavilhão, para além de mesas e um quadro, tem ventilação, luminárias LED tubulares, um projetor, e, como é das que pertence ao perímetro exterior do pavilhão, tem também uma janela com venezianas, neste caso virada para Este. Na figura 1.2 estão algumas fotografias da sala. Para além disso, o contexto em que este trabalho se realiza é um contexto em ambiente real. Quer com isto dizer, que a sala em questão é uma sala que é efetivamente utilizada para aulas, tendo aulas todos os dias úteis praticamente sempre desde o início da manhã até ao final da tarde, o que se traduz em pouca disponibilidade para usá-la para este trabalho. Também por ser utilizada há outros problemas que daí advém, relacionados a utilização das luzes e dos estores, que é sobre o qual este trabalho se foca, como o facto de quem a utiliza mudar a posição dos estores, colocá-los no modo manual, impedindo a sua utilização remota e mexerem no módulo de controlo. Para além disso qualquer forma de aquisição de informação utilizada não perturbar o normal funcionamento das aulas. Isto traduz-se no facto dos sensores que foram lá colocados previamente, e já usados em trabalhos anteriores (secção 2.4), estarem todos perto do teto, onde se encontra o projetor, o que é especialmente desafortunado no caso do sensor de iluminância, cujo valor que indica não traduz com precisão a iluminância existente na sala.

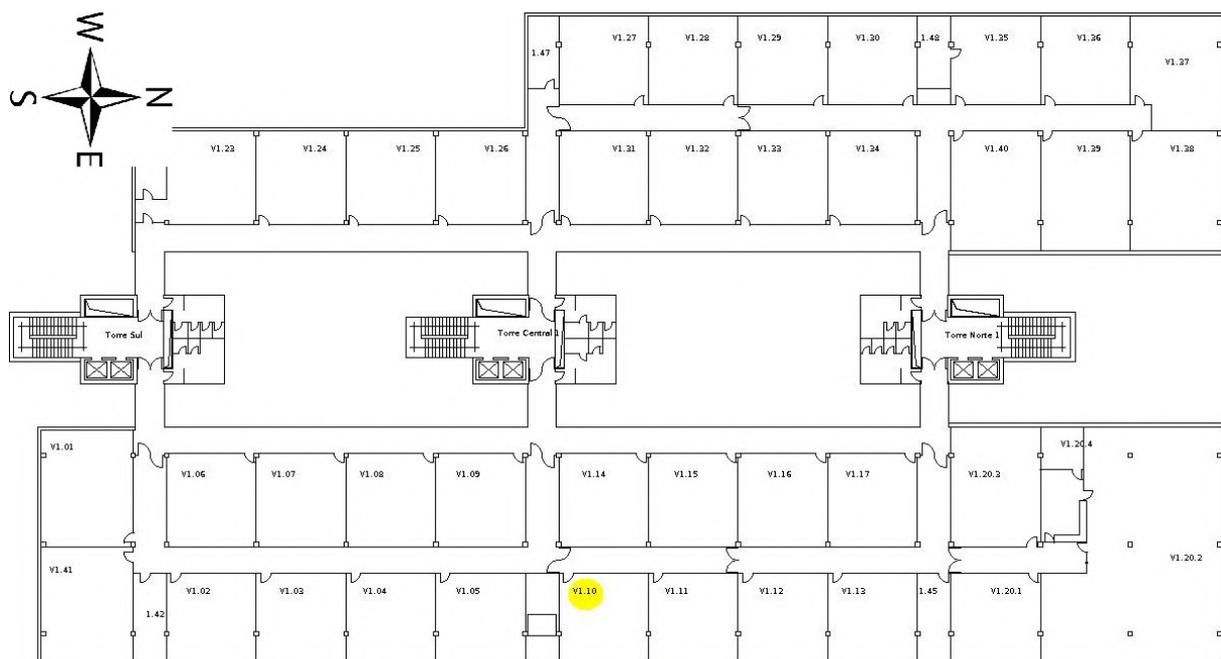


Figura 1.1: Planta do 1º piso do Pavilhão de Civil



Figura 1.2: Fotografias da sala V1.10

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar a implementação numa sala de aula do IST o controlo automático das persianas e luminárias de forma a minimizar o consumo de energia, mantendo o conforto dos utilizadores da mesma. O sistema deve deixar qualquer utilizador mudar o estado das persianas ou luzes sem impedimentos.

1.3 Contributos

Este trabalho contém várias partes, e como tal, cada uma delas constitui um contributo em si. Primeiramente tem-se projeção e testagem de um algoritmo de controlo de venezianas simples, baseado unicamente num sensor de luminosidade simples e na hora do dia. Depois também se projetou e testou um controlo de modelo preditivo baseado em simulações feitas em programas disponíveis ao público (Dialux Evo e EnergyPlus) que prevêem a iluminância no plano de trabalho baseando-se numa modelação da sala, verificando-se resultados relevantes, que representam poupanças significativas para o meio em questão, com ambas as abordagens. Para além disso, as próprias simulações feitas em Dialux Evo e EnergyPlus também constituem um contributo, já que podem ser utilizadas por futuras pessoas que façam trabalhos nesta sala, e servem também como validação e *benchmarking* destes programas para situações deste tipo. Além do mais, como o recolher de informação dos sensores e as ações de controlo são feitas por Thingspeak, uma API open-source de *Internet of Things* (IoT), utilizando material simples e barato. Para além disso, o trabalho feito na sala em questão pode ser

replicado com relativa facilidade para as outras salas do mesmo edifício. Já existiram estudos anteriores que desenvolveram modelos de iluminação para esta sala, no entanto, este é o primeiro trabalho em que se implementa o algoritmo de controlo, utilizando informação obtida desses mesmos trabalhos anteriores, referidos em 2.4

1.4 Organização

A presente tese encontra-se organizada da seguinte forma.

No capítulo 1, é feita uma introdução sobre o tema, o que é abordado na tese, e os objetivos e trabalho proposto.

No segundo capítulo, é feito um enquadramento do tema de forma mais específica, olhando para trabalhos e estudos anteriores para perceber a influência e o funcionamento de vários tipos de iluminação. É também descrita algum funcionamento teórico dos processos em questão, bem como uma revisão de soluções apresentadas para problemas semelhantes

No capítulo 3 são descritas as metodologias que vão ser usadas para o controlo da iluminação e para a validação dos modelos utilizados no mesmo. É também justificada a utilização do software escolhido. São também apresentadas as limitações associadas ao trabalho em questão.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dessas mesmas validações dos modelos, bem como das soluções de controlo.

No capítulo 5 estão as conclusões sobre o trabalho e os seus contributos, e também propostas para trabalho futuro.

Capítulo 2

Background

2.1 Iluminação

2.1.1 Teoria

Fotometria é a ciência da medição da luz visível em unidades ponderadas de acordo com a sensibilidade do olho humano, com base em um modelo estatístico da resposta visual humana à luz, isto é, a nossa percepção da luz sob condições cuidadosamente controladas. A sensibilidade à luz do olho humano varia com o comprimento de onda da luz (fig. 2.1). Por exemplo, uma fonte de luz verde com uma certa intensidade de radiação aparenta ser muito mais brilhante que uma fonte de luz vermelha ou azul com a mesma intensidade. Portanto, em fotometria ao invés de se medir a potência da energia radiante, faz-se uma tentativa de medir a impressão subjetiva produzida pela estimulação do sistema visual humano por energia radiante. No entanto, esta tarefa traz muitas dificuldades devido às não linearidades associadas à resposta do olho humano a luz, já que isto depende de inúmeros fatores como é referenciado em diversos trabalhos [5–10]. Ainda assim, para se conhecer esta impressão subjetiva de visão em condições "normais", em 1924 o CIE, *Commission Internationale d'Eclairage* pediu a 100 pessoas para avaliar o "quão brilhante" eram algumas fontes luminosas monocromáticas de diferentes comprimentos de onda em condições controladas. Disto resultou a chamada curva fotópica CIE (figuras 2.1 e 2.2), em que nos xx está o comprimento de onda da luz e nos yy a sensibilidade ao mesmo.

Intensidade luminosa é a potência ponderada segundo a função de luminosidade (sensibilidade espectral descrita acima) emitida por uma fonte de luz numa certa direção por unidade de ângulo sólido. A unidade SI da intensidade luminosa é a candela (cd), palavra latina para vela. Corresponde à intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} hertz e que tem uma intensidade radiante nessa direção de $1/683$ watt por esterradiano, o que é aproximadamente a intensidade luminosa emitida por uma vela comum.

O fluxo luminoso é a potência luminosa ponderada emitida por uma fonte de luz, e a sua unidade SI é o lúmen (lm). Portanto, o lúmen é definido por $1lm = 1cd \times 1sr$.

A densidade de fluxo luminoso, ou iluminância, é o fluxo luminoso por unidade de área, e é medido habitualmente em lux (lúmen por metro quadrado).

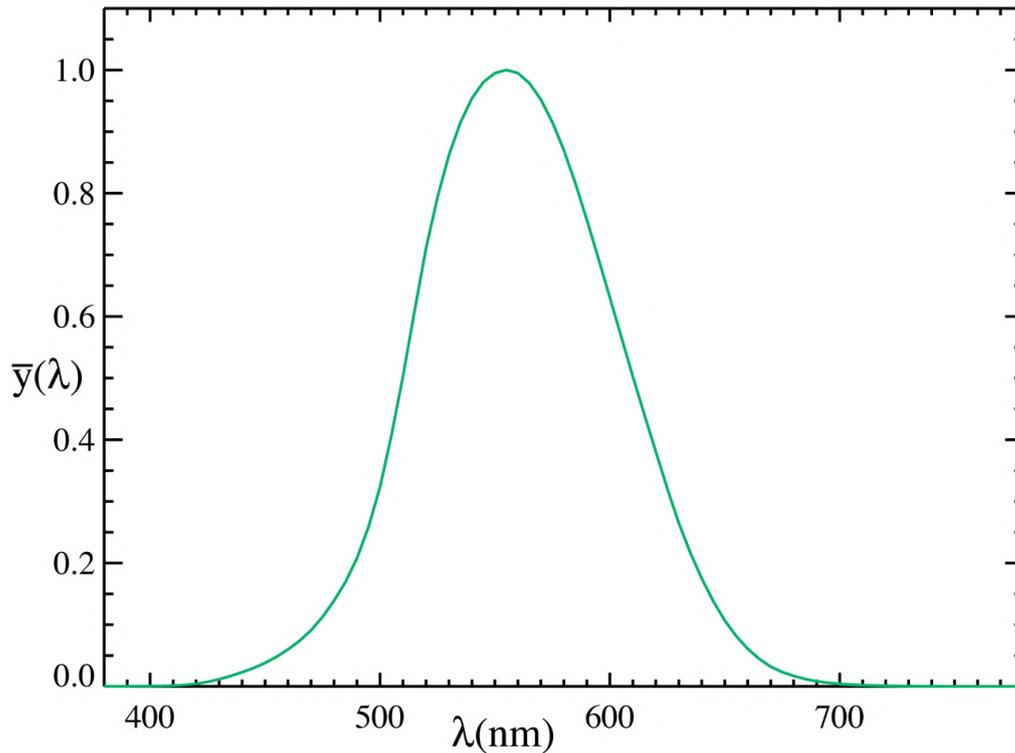


Figura 2.1: Curva fotópica CIE

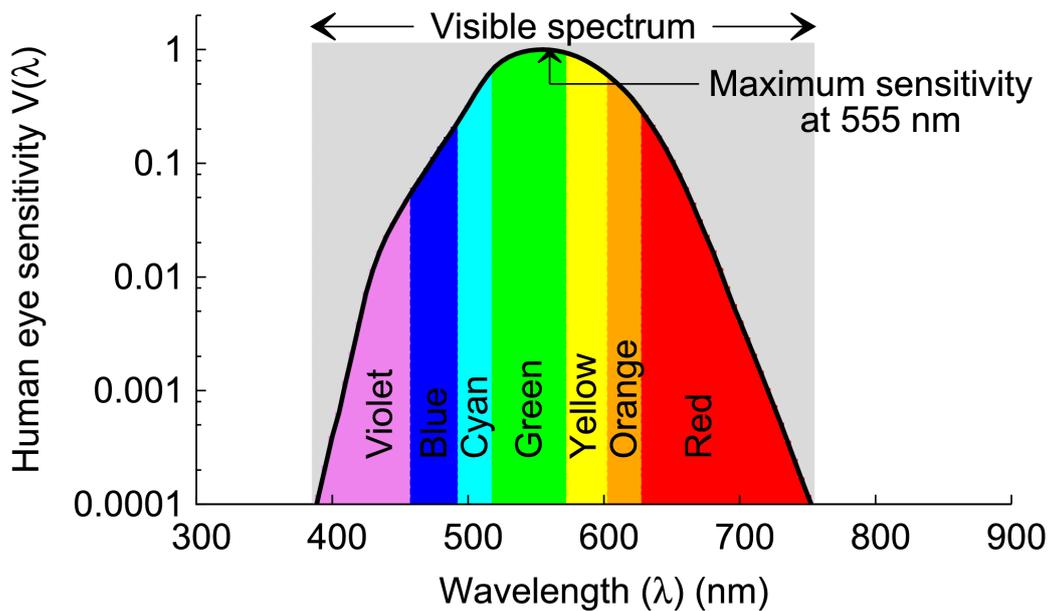


Figura 2.2: Espectro Visível da luz (imagem de [11])

Método Teórico

O método ponto a ponto permite calcular a iluminância num ponto específico gerada por uma lâmpada, ou outra fonte luminosa, dependendo da distância da lâmpada ao ponto em que se pretende calcular, o ângulo sólido entre os mesmos e a intensidade luminosa da lâmpada, que por sua vez é o fluxo luminoso (Φ), em *lúmen* por unidade de ângulo sólido (Ω) (eq. 2.1). Este cálculo é feito usando simplesmente a lei do inverso do quadrado (eq. 2.2). Em que E representa a iluminância em

lux , θ o ângulo entre os pontos, d a distância entre os pontos e I a intensidade luminosa em *candela*.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (2.1)$$

$$E = \frac{I \times \cos\theta}{d^2} \quad (2.2)$$

2.1.2 Projeto luminotécnico

Brilho, ou em inglês, "Glare", é a sensação produzida por áreas brilhantes dentro do campo de visão e pode ser classificado como "disability glare" quando uma fonte de luz forte ofusca o indivíduo impedindo-o de ver, ou "discomfort glare" quando uma área muito brilhante dificulta a realização de uma tarefa, incomoda, ou causa fadiga ao utilizador. Isto pode ser causado por uma fonte de luz direta, ou refletida numa superfície polida, como é o caso de mesas da sala V1.10, que brilham. Brilho pode trazer vários problemas, já que pode levar a fadiga ou a erros que, de outro modo, seriam evitáveis.

Para classificar a quantidade de brilho existente existem várias formas de medir, mas a mais comum é o CIE *Unified Glare Rating* (UGR), definido como:

$$UGR = 8 \log_{10} \left[\frac{0,25}{L_b} \sum \left(\frac{L^2 \omega}{p^2} \right) \right] \quad (2.3)$$

Onde:

- L_b é a luminância no fundo em $cd \times m^{-2}$
- L é a luminância das partes luminosas de cada luminária na direção do olho do observador em $cd \times m^{-2}$
- ω é o ângulo sólido em esterradiano das partes luminosas de cada luminária aos olhos do observador
- p é o índice de posição de Guth para cada luminária individual que se relaciona ao seu deslocamento da linha de visão

A norma EN 12464 ([12]) define como deverá ser a iluminação em diferentes espaços ou para diferentes tarefas. Segundo a norma, a iluminância recomendada para cada tipo de tarefa/situação é dada pelo que é denominado *maintained illuminance*, e o valor de UGR máximo por UGR_l . Para este caso, isto é, uma sala de aula comum, a iluminância deve ser 300 lux e o UGR_l 19, devendo a iluminação ser controlável. Naturalmente, o valor de *maintained illuminance* deve variar conforme as especificidades das tarefas que estejam a ser realizadas. Nomeadamente, a mesma deve:

- Aumentar quando
 - trabalho visual é crítico
 - erros sejam difíceis de retificar
 - precisão ou produtividade sejam de grande importância
 - a tarefa inclui detalhes de tamanho extremamente pequeno ou baixo contraste
 - a tarefa é realizada por um tempo anormalmente longo
 - a capacidade visual do trabalhador é abaixo da média

- Diminuir quando
 - os detalhes da tarefa são anormalmente grandes ou de grande contraste
 - a tarefa é realizada por um tempo anormalmente curto

Outra característica a ter em atenção é a aparência da cor da luz emitida, e esta é quantificada pela Temperatura de Cor Correlacionada (CCT) ou $T_c(K)$. A Temperatura de Cor Correlacionada de uma fonte de luz é a temperatura de um corpo negro ideal que irradia luz da cor mais semelhante àquela da fonte de luz ([13]). Luzes com valores de CCT mais elevados são normalmente denominadas de cores "frias" ou "azuladas", enquanto valores mais baixos estão associadas a cores "quentes" ou "amareladas" como está representado na figura 2.3. A luz do sol tende a ter valores intermédios de CCT.

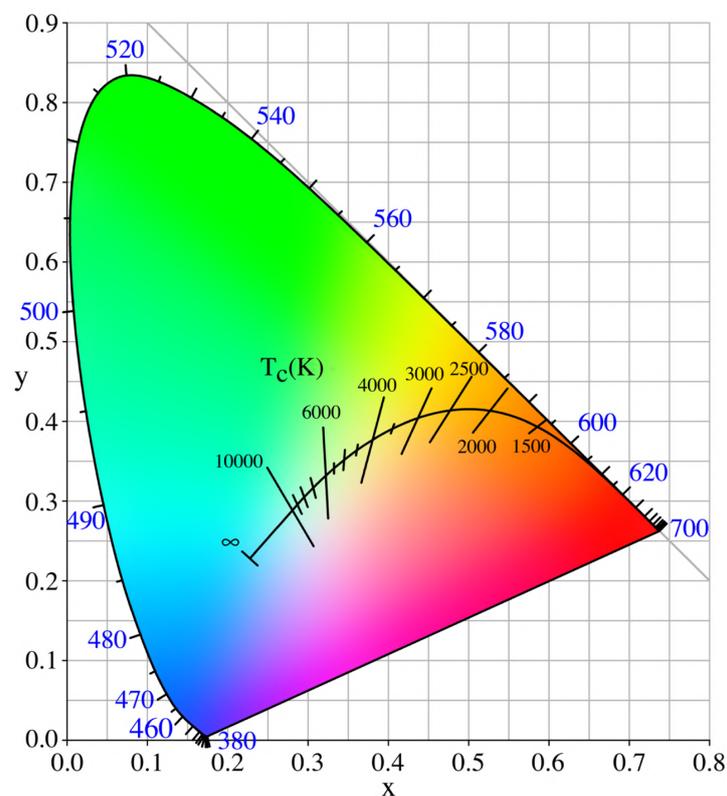


Figura 2.3: CCT e cor aparente de uma fonte de luz

Tabela 2.1: Grupos de aparência de cor de lâmpadas

Aparência da cor	CCT em K
Quente	abaixo de 3300 K
Intermédio	3300 - 5300 K
Frio	Acima de 5300 K

Esta característica aparenta ter muita importância no conforto e produtividade dos utilizadores, em certos casos até mais que a iluminância desde que os valores desta estejam dentro de uma gama moderada, como refere Wang et al. [14]. O trabalho de Yang and Jeon [15] focou-se em estudar os efeitos de diferentes temperaturas de luz, fazendo uma extensa revisão da literatura existente sobre o tema. Algumas das conclusões são consensuais, enquanto outras não. Pode-se dizer com relativa segurança que para níveis de iluminância mais altos os utilizadores preferem CCT mais alto, e que com o aumento de CCT, para os mesmos níveis de iluminância, também aumenta o brilho aparente que os utilizadores sentem. O mesmo não se pode dizer de performance e atividade mental, já que Shamsul et al. [16] verificou que CCT de 3000 K era prejudicial ao nível de alerta e performance de escrita de 47 alunos universitários. Também Pulay [17] e Huang et al. [18] verificaram que temperaturas intermédias (aproximadamente 4000 K) tinham efeitos positivos na concentração e atenção durante longos períodos de tempo. No entanto, Boray et al. [19] testou diferentes cenários de luz, 3000, 4150 e 5000 K, com lâmpadas fluorescentes e a uma iluminância de 500 lux e não foram verificadas diferenças significativas em simples tarefas verbais e quantitativas, num estudo envolvendo 117 estudantes universitários. E portanto, os efeitos de CCT na performance cognitiva não conseguem ser generalizados. No geral, aparência de cores mais quentes (CCT mais baixo) são associadas pelos utilizadores a sensações de descanso e relaxamento e temperaturas intermédias são as mais preferidas para ambientes de escritório ou edifícios educacionais. Yang and Jeon [15] também realizou alguns testes e verificou-se que entre 3000, 4000 e 5700 K, 5700 K foi considerada mais desconfortável pelos utilizadores, e que entre as outras duas opções não existia uma diferença significativa. Também foi realizado um teste de memória (ANOVA and Bonferroni post hoc test) e a única diferença considerada significativa ocorreu entre utilizadores do sexo masculino, quando a luz era de 4000 K, em que o resultado médio foi de 9.667 (em 10), face a 3000 K em que se obteve um resultado médio de 9.288. Com isto conclui-se que, no geral, para ambientes educativos, se deve procurar ter valores de CCT intermédios. A luz solar está normalmente compreendida entre 5000 K e 6500 K, dependendo da altura do dia.

2.1.3 Hábitos de Iluminação

Para analisar a viabilidade deste tipo de controlo, há que comparar com a alternativa não automática, ou seja, os hábitos que utilizadores têm para manualmente controlar a iluminação numa sala. De entre os trabalhos efetuados para monitorizar os comportamento das pessoas, referem-se Gunay et al. [20], Reinhart and Voss [21], Hunt [22], Love [23] e [24], de onde se destacam as seguintes conclusões.

- Os ocupantes de forma ativa fecham estores quando existe brilho, ou seja, um encandeamento ou luz muito forte ao ponto de ser desconfortável. E ligam as luzes quando não existe luz natural

suficiente, no entanto, frequentemente não voltam a desligar a luz ou abrir os estores depois destas condições desconfortáveis desaparecerem.

- Ações nos Estores

- Os utilizadores colocam os estores numa posição que tende a ser resultado de um balanço entre efeitos positivos e negativos ao longo de um período de semanas ou meses, ao passo que operações diurnas nos estores são raras.
- Alterações da posição de estores tendem a variar entre nunca ou diariamente para a mesma fachada, e tendem a ocorrer nos extremos do período de trabalho
- É mais provável as pessoas aceitarem uma situação em que os estores estejam muito abertos do que muito fechados

- Ações na iluminação artificial

- As luminárias de uma sala tendem a ser todas ligadas/desligadas simultaneamente
- Ligar/desligar acontece maioritariamente ao entrar ou sair de uma sala

Com um objetivo similar, Yun et al. [25] avaliou, em 4 escritórios, hábitos dos seus utilizadores e verificou que, em média, 58.1% do tempo os escritórios possuem todas as luzes ligadas. No restante tempo, ou estariam todas desligadas (40.5%), ou apenas metade das luminárias ligadas (1.4%). Esta utilização muito pouco significativa do uso de apenas metade das luminárias vem de encontro ao que foi verificado, também neste estudo, de que, não existe nenhuma relação significativa entre a luz natural disponível e o uso de luz artificial nos escritórios estudados. Foi também verificado que a utilização de controlo automático com regulação para atingir uma iluminância desejada de 500 lux pode ter poupanças energéticas até 43%.

2.1.4 Luz Natural

O sol é a fonte de luz de natural, e como o mesmo muda de posição ao longo do dia, e ao longo do ano, então também muda o ângulo de incidência na superfície bem como a temperatura aparente da luz recebida. A temperatura da cor da luz solar é mais baixa perto do nascer do sol e pôr do sol, e mais fria no meio-dia solar, o ponto em que o sol se encontra mais alto e aponta para Sul, caso o observador esteja no hemisfério Norte. A existência de nuvens também pode alterar essa característica, fazendo que a temperatura de cor aumente. A posição do sol é definida por duas medidas que são o ângulo de azimute, e a altitude, também expressa por um ângulo. O ângulo de azimute dos raios de sol, medido no plano horizontal, a partir do Sul, para o hemisfério Norte. A altitude é o ângulo, medido na vertical, que os raios de sol com o plano horizontal, como é expresso na imagem 2.4. Para se saber qual a posição do sol ao longo das horas dos vários dias do ano recorre-se a um "Sunpath Diagram", como o da figura 2.5. Neste diagrama a linha verde representa a trajetória do Sol no solstício de Verão, o dia mais longo do ano, enquanto a linha azul representa a trajetória para o solstício de Inverno, o dia mais curto. Os números ao longo dessas linhas são as horas do dia. As linha representantes dos restantes

dias do ano estão compreendidas entre essas duas, dentro da área amarela. O ângulo de azimute é dado pela linha radial que intersecta o ponto (dia, hora), que se pretenda calcular, e a altitude pelo valor da circunferência concêntrica que intersecta o mesmo ponto. Por exemplo, pelo diagrama da figura 2.5, para o dia do solstício de verão (linha verde), às 12H, o ângulo de azimute seria 120° (aproximadamente Sudeste) e a altitude seria aproximadamente de 63°.

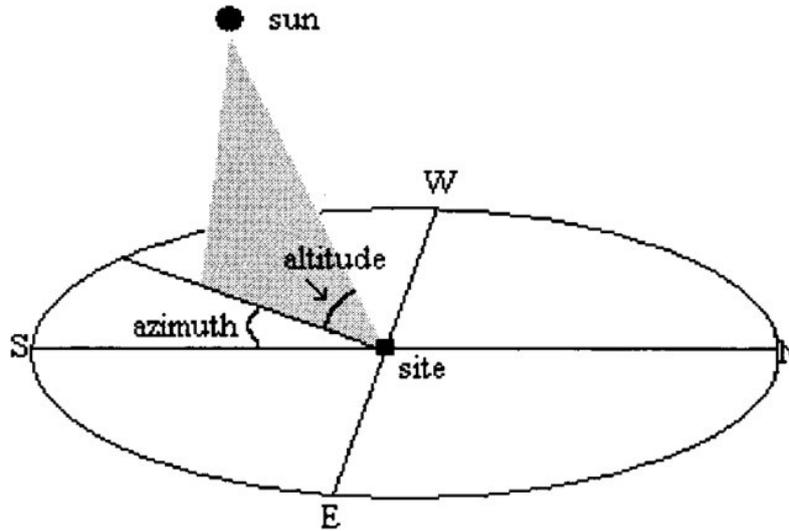


Figura 2.4: Ângulo de Azimute e de Altitude (imagem de [26])

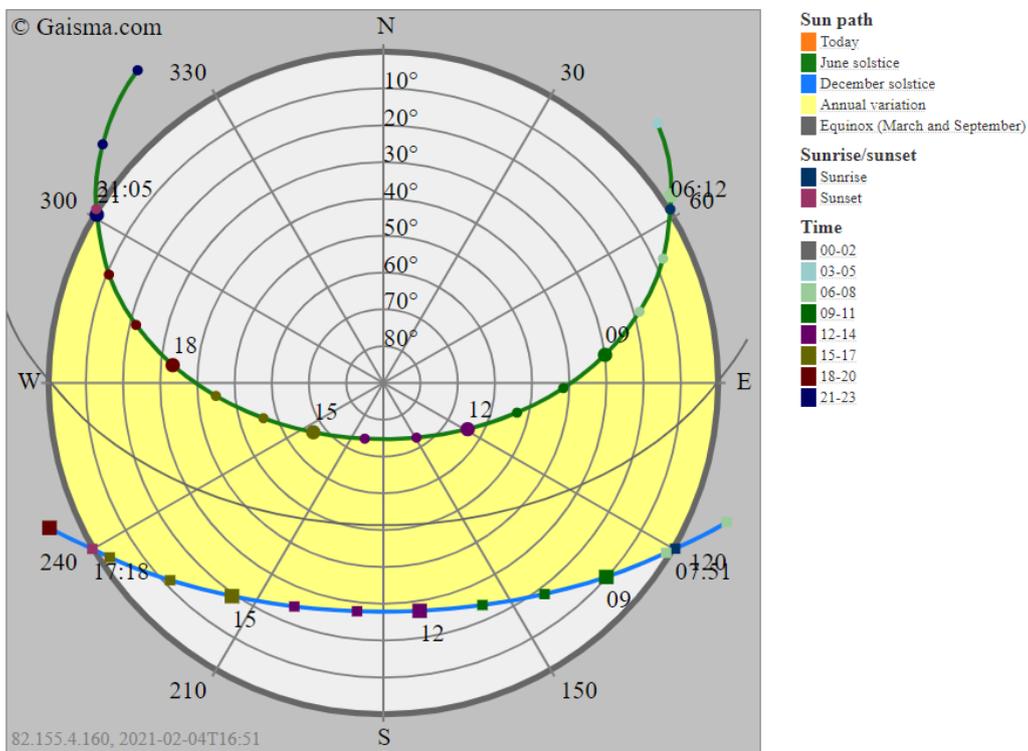


Figura 2.5: Sunpath Diagram, para Lisboa, retirado de

O Daylight Factor (DF) é a razão entre a iluminância no interior de uma estrutura e a iluminância fora da estrutura. É definida pela equação 2.4, onde E_i representa a iluminância num ponto do plano

de trabalho, E_o a iluminância horizontal exterior para um céu nublado standard segundo o CIE.

$$DF = \frac{E_i}{E_o} \times 100\% \quad (2.4)$$

E_i pode ser calculado como a soma de três parcelas: SC que representa a iluminância direta do céu que atinge o ponto. ERS , a iluminância devido a reflexões no ambiente exterior. E IRS que é a componente vinda das reflexões nas superfícies interiores. Na tabela 2.2 está a influência do DF nas características da sala.

$$E_i = SC + ERS + IRS \quad (2.5)$$

Tabela 2.2: Relação entre DF, aparência visual e performance térmica

DF	Aparência Visual da Sala	Implicações Energéticas
<2%	sombria	Luz artificial necessária maior parte do dia
2% to 5%	Predominantemente iluminada, mas luz artificial suplementar necessária	Bom equilíbrio entre iluminação e aspetos térmicos
>5%	Fortmente iluminada	Luz artificial raramente necessária,mas pode ter problemas térmicos de sobreaquecimento no verão e arrefecimento no inverno

Alguns estudos foram feitos em escolas, maioritariamente de ensino básico, de Portugal, na zona de Viseu, para compreender algumas características luminotécnicas das salas de aulas dessas escolas. Pinto et al. [27] notou, a nível de preferências, que 67% das pessoas prefere iluminação natural, 32.5% prefere um híbrido entre natural e artificial, e apenas 0.5% dos 584 participantes preferiam luz artificial. Também se verificou que frequentemente os níveis de iluminação estavam abaixo dos 300 lux, o que era espectável mediante a utilização frequente de projetor. Para além disso, verificou-se que a uniformidade da iluminação ao longo da sala era inferior ao fora considerado desejável, o que implica a utilização de iluminação artificial. Em Pinto et al. [28] calculou-se o DF para vários pontos de salas de aula da mesma zona do país. As salas em questão tinham valores de WFR (Window to Floor area Ratio) entre 9% e 18% e obtiveram valores médios (ao longo da distância à janela) de DF entre 8% e 24%, quando não era usado nenhum tipo de sombreamento. Estes são valores bastantes substanciais e portanto, embora estejam acima do mínimo recomendado de 2%, trazem problemas de sobreaquecimento e encandeamento, e como tal, o uso de persianas ou estores verificou-se ser frequente. A variação do DF ao longo da sala era nalguns casos grande, chegando a variar para uma sala entre 32% e 16% entre pontos a 1 e 5 metros da janela. A sala sobre a qual esta dissertação incide possui uma janela significativamente grande (2.2), dando um WFR de aproximadamente 28% e, como tal, é espectável que a luz natural na mesma seja elevada.

2.1.5 Luz Artificial

A luz artificial provém de luminárias, que por sua vez podem ser de vários tipos (incandescente, fluorescente, HID, LED, etc.) e formatos (redonda, tubular, quadrangular, etc.). Na descrição de uma luminária, para além do formato/dimensões e tipo de lâmpada, é também referenciada a potência da mesma, em Watts, o fluxo luminoso que produz, em lúmenes, a eficácia luminosa em lúmenes/Watt, que é o quociente entre os dois anteriores, a CCT, em Kelvin, e o CRI, que é adimensional. O CRI (Colour Rendering Index) traduz o quão similares as cores de um objeto aparentam ser quando iluminado por uma certa luminária comparando com as cores "reais", ou seja, quando esse mesmo objeto é iluminado por luz "ideal" (definido pelo CIE) ou natural. O valor do CRI varia entre 0 e 100, sendo 100 o valor indicado a uma lâmpada que represente perfeitamente as cores dos objetos. Lâmpadas incandescentes ou de halogéneo tem um CRI de 100, LEDs variam entre 80 a 98, e lâmpadas fluorescentes entre 50 até 98. Naturalmente a fidelidade das cores aparentes pode ter uma enorme importância, em áreas como medicina, arte, controlo de qualidade, entre outros. Para usos comuns, como educação, escritórios ou comércio comum um CRI basta que o CRI seja acima de 80 [29]. Wei et al. [29] fez um estudo para testar a percepção humana à precisão de cor, entre duas lâmpadas LED, uma com um CRI de 85 e outra com um CRI de 97, ambas com CCT de 2900K. 48 participantes foram questionados face à sua preferência e percepção, e, no geral, as cores sob a iluminação da lâmpada com maior CRI foram preferidas e descritas como mais "naturais" e mais saturadas. No entanto, já alguns trabalhos descreveram o CRI definido pelo CIE, não é muito fidedigno para representar esta precisão de cores, especialmente para lâmpadas fluorescentes de banda tripla [30, 31] ou alguns LEDs brancos [32–34]. Outra característica importantes das luminárias tem que ver com a distribuição do fluxo luminoso da luminária nas várias direções. Por exemplo, um candeeiro de leitura costuma ter mais iluminação para uma direção específica, enquanto uma lâmpada para iluminação geral de uma sala tende a que o fluxo luminoso seja relativamente uniforme em todas as direções. Esta informação é descrita num diagrama fotométrico (fig. 2.6). Como uma lâmpada emite radiação em três dimensões, então o diagrama possui duas linhas para representar as distribuições em 2 planos perpendiculares (fig. 2.7), aqui representadas como a linha a tracejado e a linha a cheio. A intensidade luminosa, em candela, que a luminária emite numa dada direção é dada pelo valor da linha concêntrica que passe pela intersecção entre a linha do diagrama (a tracejado ou a cheio) e a linha radial da direção desejada.

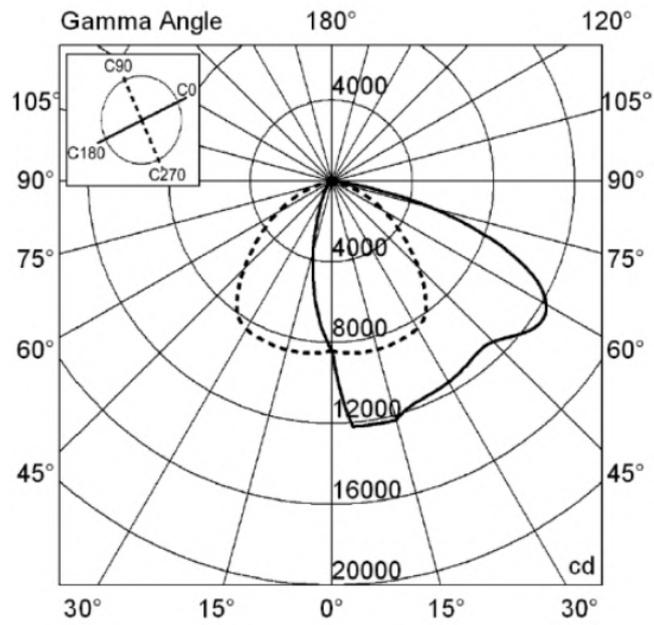


Figura 2.6: Diagrama fotométrico de uma luminária ([35])

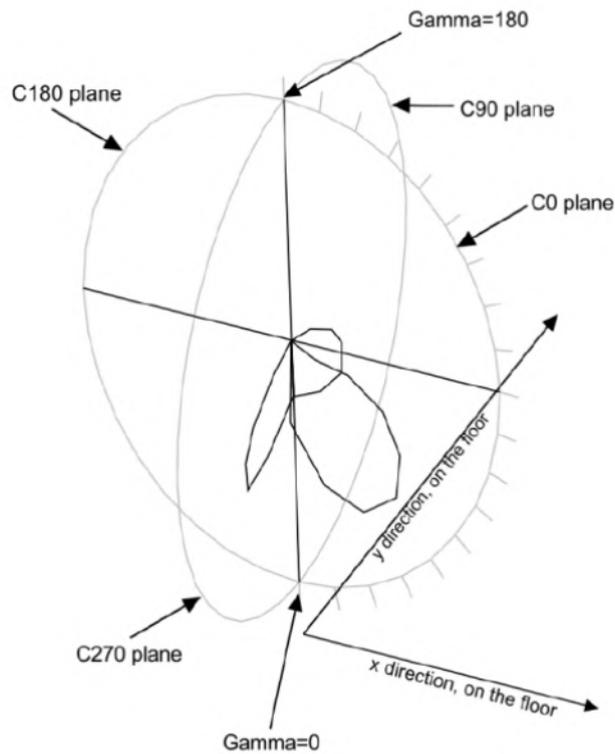


Figura 2.7: Representação tridimensional de um diagrama fotométrico ([35])

2.2 Sala

A sala usada nos ensaios é a sala de aula V1.10 do Pavilhão de Civil do *campus* da Alameda do IST. É uma sala quadrada com as dimensões 7.4x7.4x3m (fig. 2.17). Para efeitos de cálculo de iluminação

na sala é importante saber a transmitância (T), refletância (R) e absorbância (A) dos objetos que se encontram na mesma, nomeadamente paredes e mesas. Para se obterem tais valores recorreu-se a software de cálculo luminotécnico, onde, ao definir a cor desses mesmos objetos, o software definia automaticamente a refletância do mesmo. Como paredes e mesas são objetos opacos, a transmitância dos mesmos é 0, e portanto, porque a soma dos três é 1([36]), então $A = 1 - R$. Os valores obtidos encontram-se de acordo com [37]. Ou seja, para paredes de cor "branco sujo ou amarelado", R é de aproximadamente 70%. A sala não está equipada com sistema de AVAC.

Na parede virada para Oeste, ou seja, para o interior do pavilhão, existe uma porta que dá acesso ao corredor e uma zona envidraçada por onde costuma passar a luz proveniente da iluminação do corredor. Na parede Este estão duas janelas para o exterior do edifício. A parede virada a Sul separa a sala de uma das salas adjacentes, e possui um quadro e uma tela de projeção. A parede a Norte separa a sala da outra sala adjacente e não possui quaisquer outros elementos característicos.

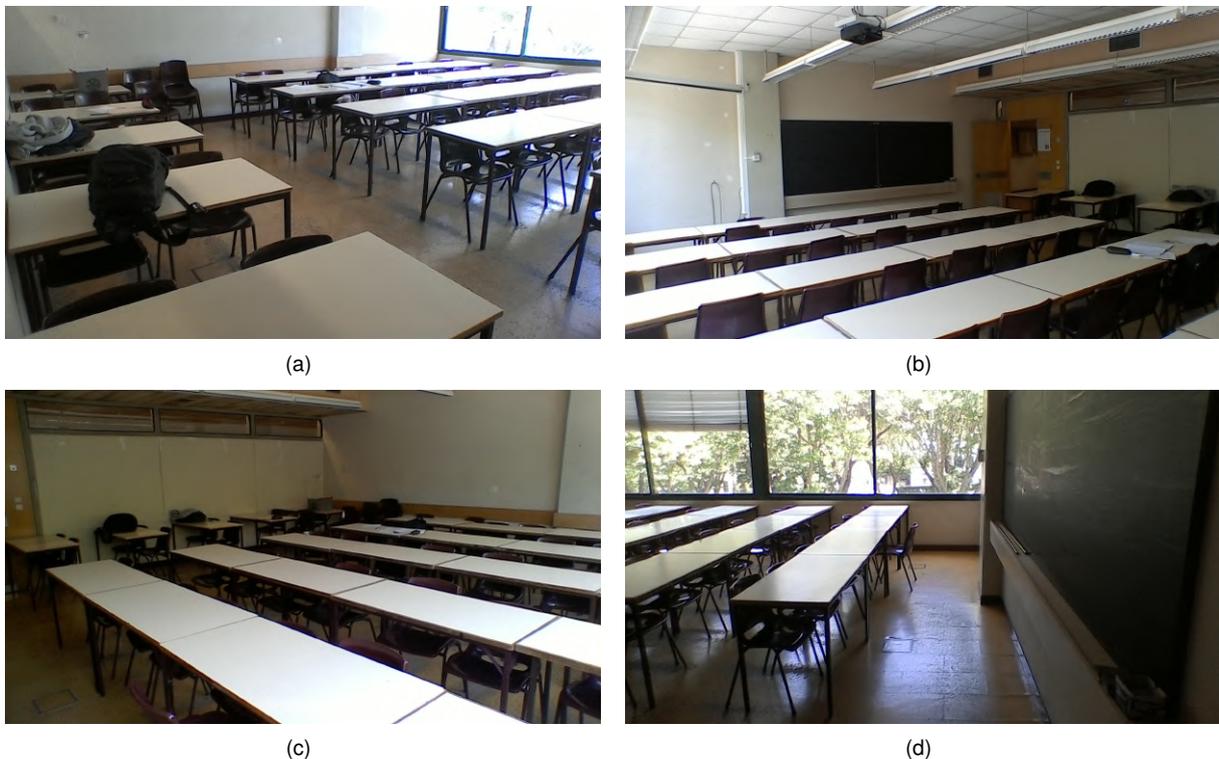


Figura 2.8: Fotografias da sala, retiradas do website do IST

Juntas, as duas janelas perfazem todo o comprimento da parede em que se encontram, e vão desde 0.9m a partir do chão até ao teto. Cada janela tem uns estores venezianos que se conseguem controlar através de um interruptor manual (2.9), ou através de comandos dados por uma API, já que os estores estão ligados a um Raspberry PI 2.10 que assim o permite. Usando o interruptor manual é possível subir ou baixar os estores até qualquer posição, ficando sempre rodados de forma a não passar luz por eles aquando numa posição intermédia (2.11).

Usando os comandos existem 4 opções possíveis, que são descritas abaixo. No entanto, indepen-



Figura 2.9: Controlador e interruptores dos estores

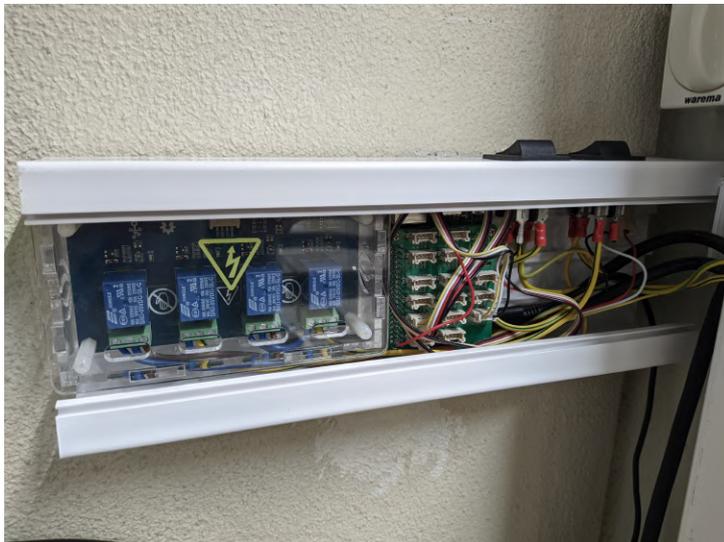


Figura 2.10: Controlador dos estores da sala



Figura 2.11: Estores numa posição

dentemente de se usar o modo manual ou automático, não existe forma de saber a posição dos estores num certo momento, já que essa informação não se consegue retirar diretamente para enviar pelo Raspberry PI, nem existem sensores na sala para fazer essa averiguação, e, para além disso, também não é possível saber de forma direta se os mesmos se encontram em modo manual ou automático.

Com as dimensões da sala pode-se estimar o WFR (window to floor ratio). A área das janelas combinada é de aproximadamente $2.1 \times 7.4 = 15.54m^2$, o que significa um $WFR = \frac{7.4^2}{15.54} = 28\%$. Disto estima-se, pelo que é mencionado em 2.1.4, que o fator de luz do dia (DF) seja também elevado e que a sala tenha muita iluminação natural. A intensidade e direção dessa mesma iluminação natural depende, naturalmente, da hora do dia e do dia do ano, como já foi mencionado em 2.1.4, segundo o *Sunpath Diagram* que se encontra nessa mesma secção. Na figura 2.12 estão representados, de forma aproximada, os objetos que fazem sombra sobre a sala, apenas no lado Este, para se ter uma ideia aproximada dos momentos em que existe luz direta na sala. Limitado pelas linhas azuis são as projeções da Torre Norte e do Pavilhão Central, e pelas linhas verdes uma projeção das árvores. Olhando para esta representação consegue-se notar que para a maioria dos dias do ano, representados pelas linhas que atravessam o diagrama entre Este e Oeste, a partir das 9h da manhã a localização relativa do Sol (ângulos de azimute e altitude) deixa de ser intersetada por objetos (árvores e edifícios circundantes). Ou seja, a partir das 9h esses objetos deixam de projetar sombra na sala, e a mesma é incidida pela luz solar diretamente.

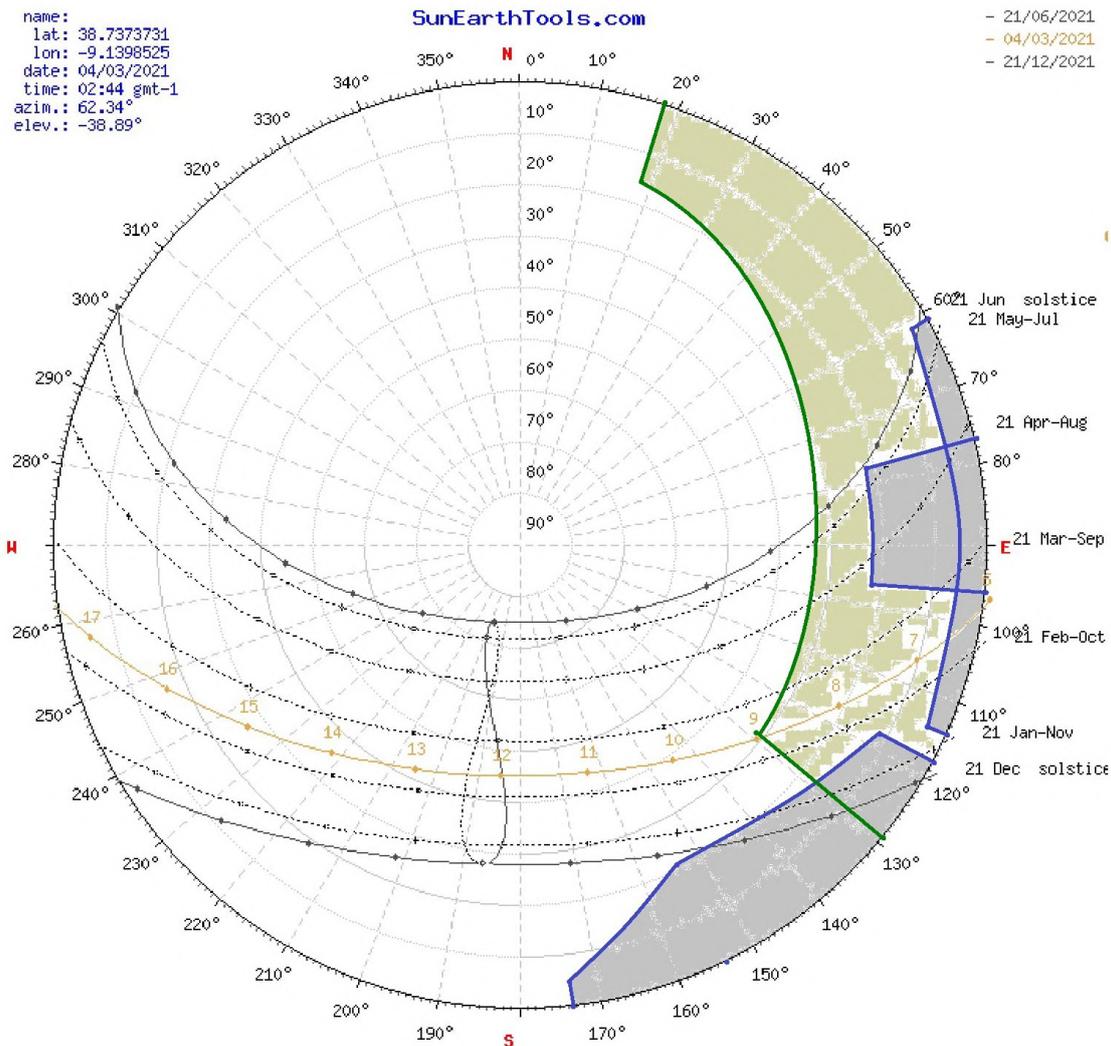


Figura 2.12: Sunpath Diagram para a localização da sala

Face a luminárias, a sala tem 4 filas, cada uma com 4 lâmpadas LED tubular de 1500mm de comprimento, cujos dados técnicos se encontram em 2.4, e cujas configurações possíveis para as ligar estão também descritas em 2.2.1. Estas, ao contrário dos estores, não são possíveis de controlar de forma remota. A sala está também equipada com alguns sensores (2.13) que permitem adquirir alguns dados quantificáveis através também duma API e do Raspberry PI, nomeadamente temperatura, iluminância, humidade, concentração de CO_2 e compostos orgânicos voláteis. Destes, a iluminância é naturalmente o de maior importância, mas infelizmente o sensor não dá esta informação em lux. Estes sensores estão colocados junto ao projetor da sala, que se encontra perto do teto, aproximadamente no centro da sala. A informação que destes sai consegue ser adquirida também através de uma API que dá valores de 5 em 5 minutos. A posição deste revela-se um problema, pois os valores de iluminância entre o local onde ele está colocado e onde se quer avaliar a iluminância, isto é no plano de trabalho, que são as mesas, variam bastante. Disto vem a necessidade de criar estimativas ou sensores virtuais para se conhecer esses valores, como é descrito melhor na secção 2.3. Isto é, achar uma relação entre a iluminância medida pelo sensor junto ao teto e a iluminância no plano de trabalho, podendo assim

simular a existência de um sensor de iluminância no plano de trabalho, que seria a posição ideal do sensor.

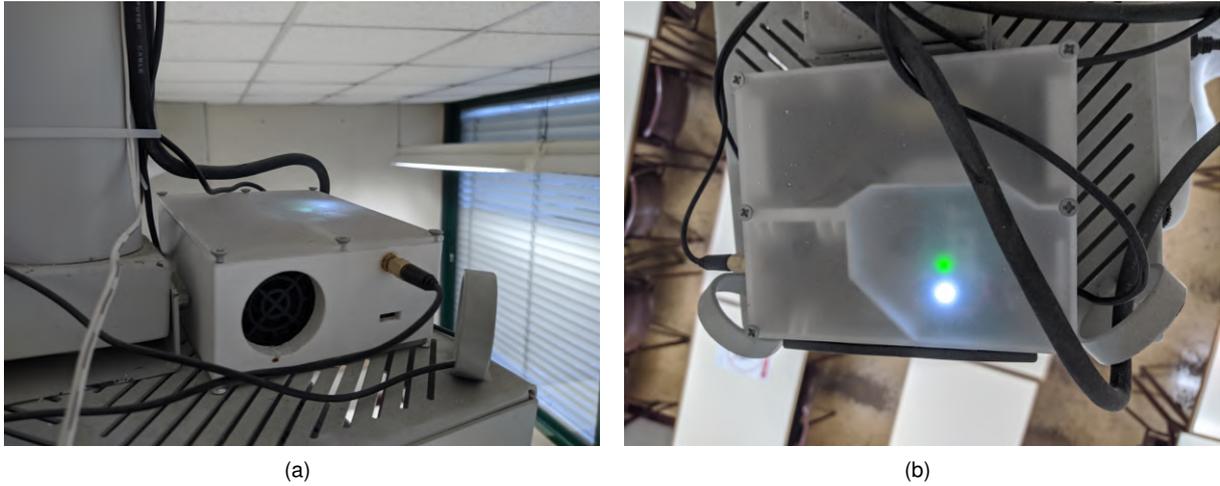


Figura 2.13: Caixa com sensores da sala

Por último, outra informação a que se tem acesso é se a sala está ocupada ou não, que pode ser obtida a partir do horário da sala, que está disponível no sistema *fenix* da faculdade. Embora não seja completamente fiável, já que podem existir aulas marcadas que não são realizadas, ou alunos que estejam a usufruir da mesma sem marcação, é já uma muito boa aproximação, caso seja necessário.

Toda esta informação acima mencionada encontra-se resumida nas tabelas 2.3, 2.4 e 2.5.

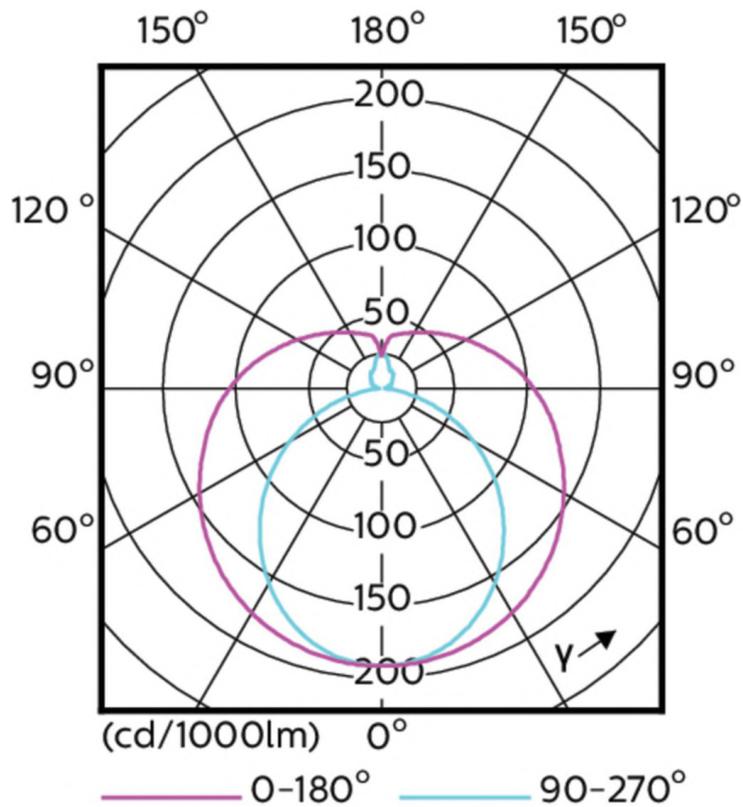


Figura 2.14: Diagrama fotométrico das luminárias presentes na sala

Tabela 2.3: Resumo de informação da Sala

objeto	característica	valor/unidade	fonte
sala	dimensões	7.4x7.4x3.0 m^3	medida direta
parede/mesas	refletância R	70%	software/literatura
janela (Este)	dimensões	7.4x2.1 m^2	medida direta
sala	WFR	0.28	cálculo direto
Sol	azimute	0-360°	Sunpath Diagram
Sol	altitude (ângulo)	0-90°	Sunpath Diagram
sala	ocupação	Sim / Não	Horário Fenix
estores	posição	—	Remotamente controlável (API Thingspeak) mas não observável
luminárias	configuração	—	Remotamente não controlável e não observável

Tabela 2.4: Características das lâmpadas. Fonte:ficha técnica, Philips.com

Lâmpada Philips CorePro LEDtube	
comprimento	1500 mm
Potência	20 Watts
Fluxo Luminoso	2200 lúmen
Eficácia Luminosa	110 lm/W
CCT	4000 K
CRI	80

Tabela 2.5: Sensores existentes na sala

Variável	Unidade
Temperatura	Celsius
Humidade	%
Iluminância	lux
Concentração CO_2	ppm
Compostos orgânicos voláteis	ppm



(a) Posição 1



(b) Posição 2



(c) Posição 3



(d) Posição 4

Figura 2.15: Posições possíveis de cada estore

2.2.1 Configurações

Cada um dos estores (utilizando os comandos) tem 4 configurações possíveis: Todo fechado/descido (Posição 1), todo aberto/subido (Posição 2), todo descido com a parte de baixo fechada e a parte de cima rodada para passar luz (Posição 3), e todo descido com a parte de cima fechada e a parte de baixo rodada para passar luz (Posição 4). Cada uma delas está na figura 2.15. Tendo em conta que a sala não está equipada com AVAC, a posição dos estores tem uma grande influência na temperatura da sala, especialmente para reduzir os ganhos solares da mesma, o que vem ao encontro do que é mencionado em [38] e de algumas medições experimentais feitas na sala, presentes na figura 2.16, onde a posição dos estores está representada pela linha tracejada preta e cujo valor pode ser lido pelo eixo vertical do lado direito.

Existem 4 interruptores para ligar/desligar as luminárias. Cada interruptor liga 2 lâmpadas de 2 filas cada, num padrão cruzado. Dois dos interruptores fazem isto para as filas mais próximas da porta, e os outros dois para as mais próximas da janela. Quais são lâmpadas ligadas por cada interruptor é mostrado na figura 2.17

De forma a referenciar todos estas configurações possíveis entre estores e luminárias foi criada uma

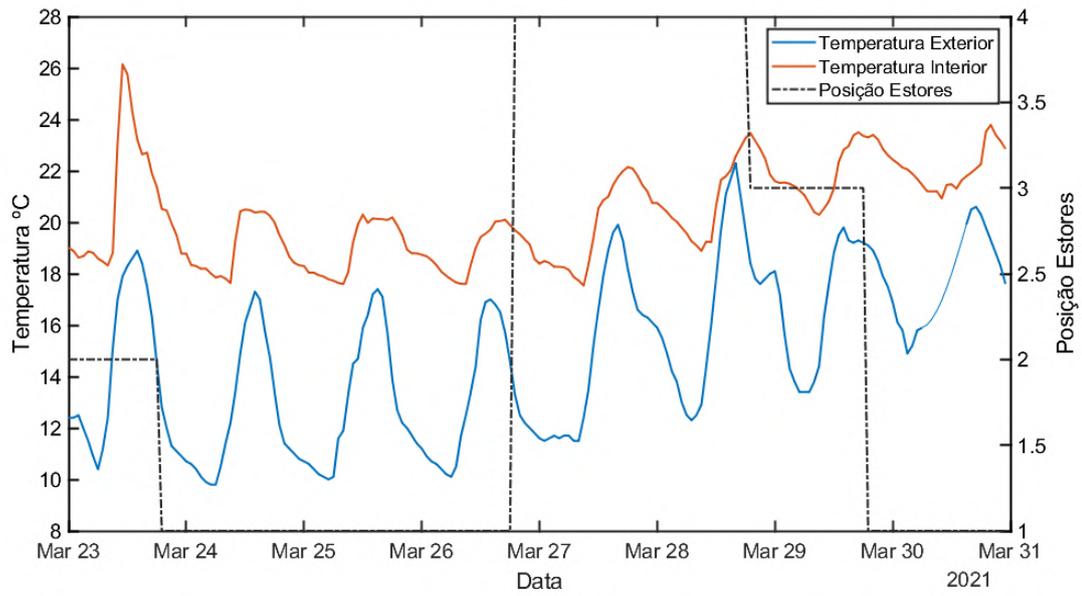


Figura 2.16: Temperaturas exterior e interior da sala, consoante a posição do estores

nomenclatura que está expressa na tabela 2.6.

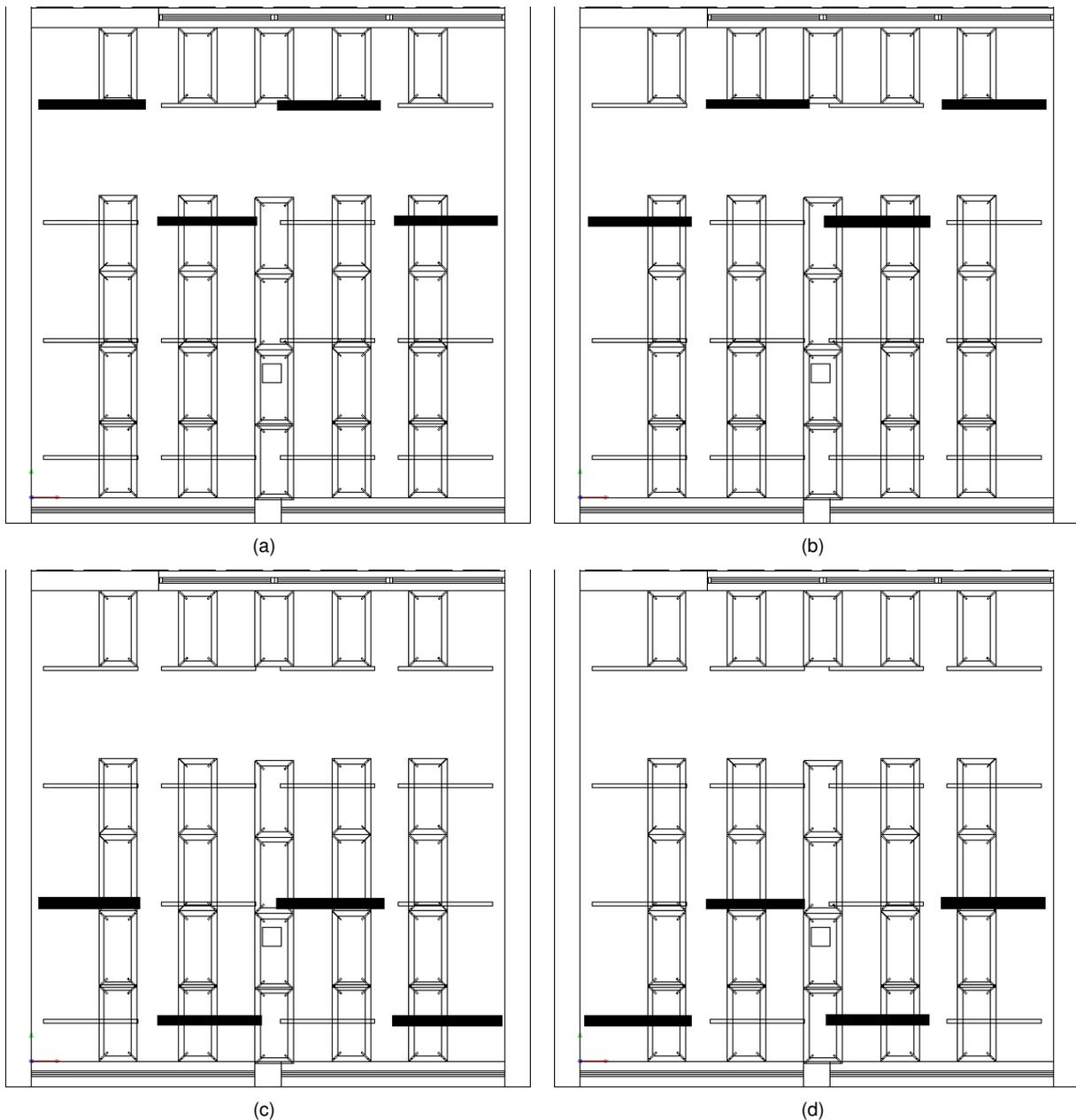


Figura 2.17: Posições das luminárias. Cada sub-figura representa as luminárias que cada interruptor liga/desliga

Tabela 2.6: Exemplos de códigos e respetivo significado

Nomenclatura	Descrição
1/4 p	1 dos 4 interruptores das luzes ligado, sendo ele do lado da porta
1/4 j	1 dos 4 interruptores das luzes ligado, sendo ele do lado da janela
2/4 p	2 dos 4 interruptores das luzes ligados, sendo ambos do lado da porta
2/4	2 dos 4 interruptores das luzes ligados, 1 do lado da porta e 1 do lado da janela
1/4p + 2/4j	1 interruptor do lado da porta e 2 do lado da janela ligados.
c1	Ambos os estores na posição 1 (tudo fechado)
c2	Ambos os estores na posição 2 (tudo aberto)
c3	Ambos os estores na posição 3 (aberto em cima)
c4	Ambos os estores na posição 4 (aberto em baixo)
c13+c24	O estore do lado do quadro na posição 3, e o outro na posição 4.

2.2.2 Luxímetro

Para se conhecer a iluminância no plano de trabalho foram feitas medições com recurso a um sensor de mão, que foi o ISO-TECH ILM 1332A. Está calibrado para uma temperatura da cor das lâmpadas de 2856K. Tem uma precisão de $\pm 3\%$ e uma repetibilidade de $\pm 2\%$. Para além disso, já que o olho humano não é igualmente sensível a todas as frequências de luz do espectro visível, como é mencionado em 2.1.1, este sensor possui um filtro para replicar essa mesma sensibilidade de forma precisa de acordo com a curva fotópica da CIE (fig 2.18).

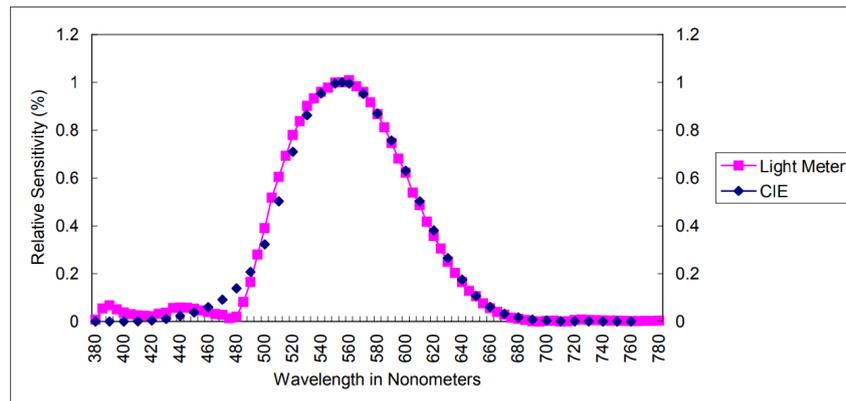


Figura 2.18: sensibilidade espectral do sensor e curva fotópica CIE

2.3 Estratégia de Controlo

O termo "Internet of Things"(IoT) surgiu em 1999 e refere-se à rede de objetos físicos, com sensores, software e outras tecnologias, com o intuito de estarem conectados e trocarem informação através da Internet, formando ligações entre pessoas e "coisas", e "coisas"entre si. As aplicações deste tipo de tecnologia são imensas, e podem ter grande impacto no mundo atual, e o exemplo mais claro disto é possivelmente na Indústria. A Indústria 4.0 envolve, entre outras coisas, a conexão entre as várias partes de uma cadeia de produção. Isto permite que o estado das várias partes de uma fábrica ou cadeia de produção seja monitorizado à distância, e até mesmo automatizadas partes do processo para uma cadeia mais adaptável, sincronizada e eficiente. Outras aplicações incluem "smart homes/buildings"que podem incluir controlo de sistemas de segurança, câmaras ou media, ou então gestão inteligente de iluminação, ar condicionado e aquecimento, para melhor eficiência energética. Para além disso pode ter outras aplicações como transportes, monitorização de saúde, monitorização ambiental ou até mesmo "smart cities".

Como tal, a comunicação dos valores dos sensores da sala, bem como o envio de comandos para executar é feito usando o *ThingSpeak*, através de URL's. Maureira et al. [39] descreve o que é o *ThingSpeak*, os seus usos, vantagens e desvantagens. Por ser open-source, fornecer processamento em nuvem e ter a possibilidade de deixar os canais abertos ao público para monitorizar os valores dos sensores maior parte do uso é particular ao invés de pôr organizações/empresas. É mais frequentemente utilizado para monitorizar sensores de clima em casa, ou por vezes em escritórios, como a

temperatura, humidade, pressão atmosférica ou níveis de iluminância. Este trabalho menciona também alguns casos comuns em específico que foram realizados, como medir a energia produzida por um painel fotovoltaico, medir e controlar a temperatura de um colchão de água, ou monitorizar o consumo elétrico de uma casa. No entanto, há que atender que este tipo de usos podem trazer problemas sérios de privacidade e segurança se estiverem disponíveis ao público. Por exemplo, a partir do consumo elétrico de uma casa em tempo real é fácil de compreender se a casa está ocupada ou não. No final, consideraram que o *ThingSpeak* era uma muito boa ferramenta para IoT devido a ser grátis e relativamente simples de usar, para além de possuir serviços adicionais para as linguagens de programação mais comuns. Um caso específico do uso deste software é o de Carranza et al. [40] que juntamente com micro-controladores Arduino e sensores, de temperatura e de efeito Hall, conseguiu controlar com sucesso as persianas, a ventoinha, e chaleira de uma casa, usando o *ThingSpeak* para monitorizar e enviar comandos de controlo de volta para o Arduino.

Para se conseguir controlar com sucesso a iluminação é importante saber qual a iluminância no plano de trabalho, já que é a partir dessa que se consegue avaliar se a situação é confortável ou não. Num ambiente real esta medição não consegue ser feita diretamente, já que os sensores para tal iriam ocupar espaço na área de trabalho. Como tal, para se obter este valor recorre-se a uma estimativa, através de sensores virtuais. Ilyas et al. [41] usou algoritmos de Machine Learning para conseguir prever a produção energética de uma usina solar, de modo a que quando a medição direta falhasse houvesse uma estimativa imediata e contínua. Para isso usou o output de usinas solares próximas e de um sensor de luz, ligados à internet, e com isto conseguiu valores de erro médio absoluto entre 14000 e 20000 (resultados entre 50000 e 200000), com R^2 entre 0.71 e 0.77. Yujie Wu and Scartezzini [42] usou imagens HDR do céu para calcular a iluminância em 5 pontos de uma sala, usando dois métodos: o programa RADIANCE - rtrace e o modelo de Perez. O primeiro obteve erros entre 8.9 e 25%, e o segundo entre 28 e 37%. Humann and McNeil [43] fez algo similar, usando à mesma o RADIANCE - rtrace e o modelo de Perez, desta vez usando duas câmaras para calcular a iluminância em apenas 2 pontos, e fê-lo para 3 situações com céus diferentes (limpo, intermédio e nublado). Com o RADIANCE conseguiu erros entre 4 e 8%, e com o modelo de Perez 16 a 24%. Drakoulelis et al. [44] usou 3 algoritmos para estimar a iluminância em 3 zonas de uma fábrica na Grécia, que foram um escritório, uma oficina e uma parte da linha de produção. Foram usados 3 sensores de iluminância IoT, nas paredes a 2m do chão, para estimar a iluminância em 2 pontos do plano de trabalho, e os algoritmos usados foram uma regressão linear, uma máquina de vetores de suporte (SVM) e um Multilayer Perceptron (MLP). Na zona da linha de produção os resultados não foram muito bons, sendo os melhores resultados um erro relativo de 25% (SVR) para o sensor virtual 1 e 8.7% para o sensor virtual 2 (reg. linear). Para os sensores virtuais nas outras zonas o melhor erro relativo foi entre 6.68 e 9.81%, sempre usando a regressão linear. Em praticamente nenhum dos casos o MLP obteve bons resultados.

Outro passo importante no controlo consiste na efetiva escolha da ação de controlo a tomar, perante a informação obtida previamente, para que o sistema obtenha o estado desejado. No caso deste trabalho, isto consiste em escolher como abrir/fechar estores ou ligar/desligar luminárias de modo a

obter uma distribuição de iluminância desejada. Para além disso, é importante que essa ação de controlo seja, não só válida, mas também ótima, já que existiram várias combinações possíveis de ações de controlo que serão satisfatórias do ponto de vista de iluminação. Uma solução ótima corresponde àquela que minimiza uma "função de custo", que neste caso é o consumo energético naquele momento. Em certos casos, como por exemplo o controlo de temperatura através de AVAC, a solução, num certo instante, que minimiza a função de custo para esse instante pode não ser ótima quando avaliada como um conjunto de decisões tomadas num intervalo de tempo. Isto porque um sistema de aquecimento de temperatura é um sistema de resposta lenta, cujas ações de controlo demoram a ter efeito no estado do sistema, e portanto, ao tomar ações de controlo tem de ser ter conta não apenas o futuro imediato, mas também o futuro longínquo. Para o trabalho presente isto não tem importância, já que os processos de ligar/desligar luminárias e abrir/fechar estores são muito rápidos e os efeitos pelos mesmos causados praticamente instantâneos. Para este tipo de problemas uma estratégia utilizada frequentemente é o "Model Predictive Control"(MPC). MPC consiste primeiramente em obter um modelo que preveja o output do sistema consoante o input. Isto pode ser feito, como é referido no parágrafo anterior, recorrendo a técnicas comuns de identificação de sistemas, redes neuronais, ou software próprio para tal. Este modelo do sistema real é depois usado para prever o output que várias ações de controlo teriam naquele momento, e dessas previsões escolhe a que for considerada ótima. Caso seja um sistema de resposta lenta e/ou em que a função de custo não é constante ao longo do tempo pode fazer sentido prever o output em mais que um instante. Nesse caso seriam simuladas várias ações de controlo em vários instantes, e a opção a tomar no instante presente seria aquela que permitiria no futuro escolher o conjunto ótimo de decisões. Mais uma vez, esse problema não se verifica no sistema do presente trabalho.

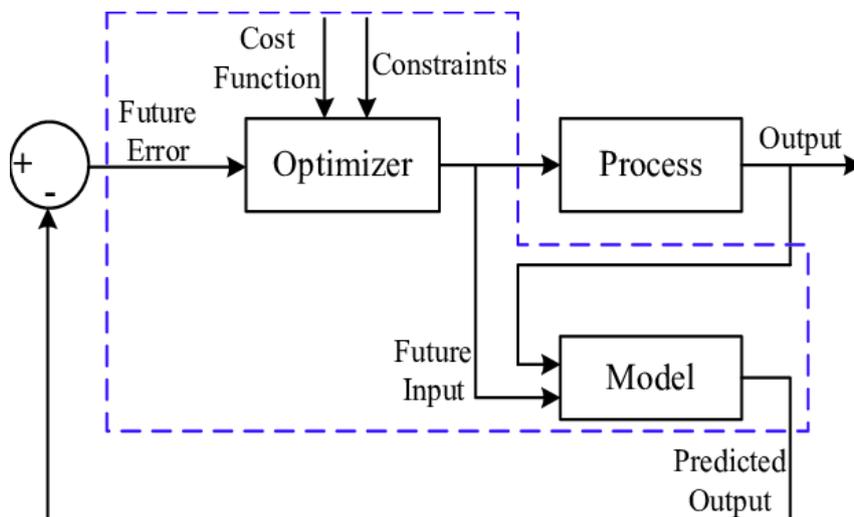


Figura 2.19: Diagrama genérico de um MPC com feedback

Por exemplo em [45] foram testados dois métodos para a avaliação do número de ocupantes numa sala, para depois ser usado num MPC para controlar o aquecimento, ventilação e iluminação adequadamente. Um dos métodos recorria a câmeras stereo, enquanto o outro recorria a sensores comuns, nomeadamente de temperatura e CO_2 . Este último modelo foi formulado com um algoritmo genético

juntamente com um filtro Kalman. No final, o primeiro método obteve na previsão de ocupantes um erro de 3%, enquanto no segundo foi de 7%, no entanto, este último método ficaria muito mais barato devido ao material necessário para implementar o primeiro método.

Em [46] é projetado um controlador MPC para um sistema Siemens BAS DESIGO, um sistema de controlo automático *state-of-the-art* de edifícios, num edifício de escritórios na Suíça. O modelo criado foi "data-driven", baseado em resistências térmicas e treinado com 3 meses de dados. Isto foi feito com recurso a uma grande quantidade de sensores, nomeadamente vários sensores de temperatura, sensores de contacto da janela, medidores de aquecimento/arrefecimento da unidade de tratamento de ar, medidores de carga elétrica, sensores de movimento e vários sensores de radiação no edifício. Tanto o aquecimento/arrefecimento como a ventilação e as persianas eram controláveis. A estratégia de otimização usada foi de otimização bilinear, para minimizar o custo de eletricidade. Para simular os resultados provenientes da otimização foi feita uma simulação no software EnergyPlus, onde se estimaram poupanças de 17%, o que foi considerado bom, mas que pode não justificar o alto investimento inicial.

Este tipo de controlo e previsão pode, em alguns casos, necessitar de uma capacidade de processamento que micro-controladores podem não ter. Nesse âmbito Drakoulelis et al. [44] realizou um trabalho com o objetivo de testar a viabilidade de CaaS (Controller as a Service), no qual foi controlada uma luz com regulação para responder a um conjunto de *step functions*. O sistema consistia num sensor e um atuador ligados a um Raspberry Pi que conseqüentemente estava ligado a um serviço de IoT, onde o processamento do controlador MPC era realizado. Foi concluído que tal abordagem era viável, mas que naturalmente dependia muito da conexão à internet e da consistência que o fornecedor de internet conseguisse garantir.

Atualmente já existem algumas soluções para o comando automatizado de luz em interiores. Seja através de luzes que, automaticamente, ligam/desligam com base em movimento, iluminância medida por um sensor incorporado, ou por um horário. O mesmo acontece com estores, em que maior parte é controlado por um horário de forma a aproveitar a luz solar durante o dia. Estas soluções são já relativamente comuns em casas, e também nalguns escritórios.

Existem também soluções mais avançadas e inteligentes, que foram desenvolvidas noutros trabalhos de investigação, que são mais reativas e optimizadas. Maior parte destas soluções são como a apresentada em Matta and Mahmud [47], que possui um sensor no exterior da janela para medir a radiação que chega à janela, e venezianas cujo o ângulo das mesmas é manipulável de modo a controlar quanta luz solar entra na sala. Para além disso possuem um sensor no teto para medir a iluminância da sala, e lâmpadas com capacidade de regulação para perfazer o da iluminação necessária.

de Bakker et al. [48] fez uma revisão detalhada sobre o estado da arte relativamente ao controlo da iluminação em espaços de escritórios abertos baseado na ocupação. Nesta revisão é referido que o controlo do serviço de iluminação, que pode chegar a representar 45% do consumo de energia em edifícios de serviços (onde estão incluídos os edifícios educativos), pode induzir poupanças de 60% na iluminação, o que pode representar até 27% de poupanças no consumo geral. Este trabalho concluiu que esta abordagem não é seguida ainda na quase totalidade dos edifícios e que a utilização

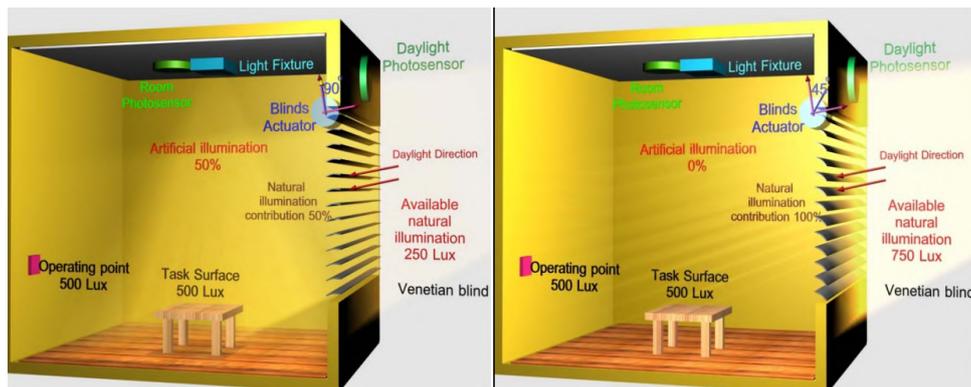


Figura 2.20: Representação da solução de Matta and Mahmud [47]

de estratégias de controlo baseadas em modelo, como o controlo preditivo, eram fundamentais para implementar este tipo de abordagem no controlo do serviço de iluminação.

Xu et al. [49] fez um estudo sobre as possíveis poupanças energéticas que o uso de venezianas e lâmpadas fluorescentes com dimming automatizadas poderiam ter num escritório na Coreia do Sul, um clima frio. Concluiu que, num clima frio, o *dimming* das luzes fluorescentes tende a fazer aumentar a necessidade do sistema de aquecimento, e que, portanto, as poupanças energéticas seriam de apenas 11% devido a essa necessidade acrescida, mas que se isso não fosse uma fator, as poupanças poderiam chegar até 50%. Isto porque de [50] retira-se que lâmpadas fluorescentes tendem a ter um impacto significativo, ainda que menor do que lâmpadas incandescentes ou de halogéneo, na temperatura do ambiente em que estão inseridas, ao contrário de lâmpadas LED, como são as da sala V1.10.

No trabalho de Oldewurtel et al. [51], onde quer a iluminação (através do controlo das persianas) quer o sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) foi controlado recorrendo a estratégias baseadas em modelos num edifício na Suíça. Neste trabalho vários tipos de variáveis de entrada foram utilizadas para alimentar o modelo de controlo, que tinha como base de modelo um horário de funcionamento fixo dos espaços, e mais uma vez ficou demonstrado o potencial de poupança quando estratégias mais dinâmicas são utilizadas.

Noutro trabalho, A.S. Lamano [52] propuseram um algoritmo de controlo baseado em modelo que optimizava o consumo de energia a partir do controlo automático das persianas e de iluminação variável, com base em sensores de iluminação. O algoritmo demonstrou ter um desempenho superior no controlo do conforto visual comparado com as persianas convencionais, com redução de 54% do consumo no serviço de iluminação.

Outras propostas variadas foram testadas por Roisin et al. [53] através de simulação em DAYSIM. Estas foram IDDS (Individual Daylight Dimming System), MDS (Movement Detection Switching) e MDD (Movement Detection Dimming), assim como combinações entre eles. Os dois últimos funcionam com um sensor infravermelhos para detetar movimento e, conseqüentemente, fazer *switch*, ou *dim* para um fluxo luminoso definido, das luminárias. Já o IDDS consiste em cada luminária ter um sensor e medir a iluminância refletida no plano abaixo delas, permitindo saber quanta luz solar está disponível. Os testes foram feitos para 3 cidades diferentes e para a fachada virada para 4 direções diferentes (Norte, Sul, Este, Oeste). Os resultados mostram de forma consistente que, enquanto MDS e MDD têm ganhos a

nível de poupança energética na ordem do 10%, IDDS, IDDS+MDD e IDDS+MDS têm poupanças entre 49% e 61%. Isto vem a verificar mais uma vez a hipótese de que sistemas que têm em consideração a luz solar disponível obtém poupanças energéticas significativamente maiores.

Em Yang and Wang [54] foi proposto um sistema de controlo de energia para um edifício. Definiu-se um modelo do edifício com 4 zonas, e um peso para cada zona e variável a ser avaliada (temperatura, iluminância, e concentração de CO₂). Com o modelo do e com informação retirada em tempo real de sensores no edifício são decididas que ações de controlo tomar, segundo um algoritmo de "particle swarm", onde a fitness function é o conforto, ou seja, uma soma ponderada das 3 variáveis com os pesos definidos previamente. Esta otimização é de especial importância já que, segundo as previsões feitas no mesmo estudo, os recursos energéticos disponíveis, provenientes de fontes renováveis, são menores que os previstos serem necessários para obter conforto completo em maior parte do tempo. Verificou-se que após aplicar o algoritmo de controlo, o conforto (o mesmo usado como fitness function) passou de valores entre 0.5 a 0.8 (sem qualquer controlo aplicado) para valores entre 0.9 e 1.

2.3.1 Software

Existem várias formas de fazer a modelação da iluminação no plano de trabalho. Uma das formas mais utilizadas é recorrer a software especializado nessa tarefa, em que é possível modelar o ambiente pretendido e as fontes de iluminação existentes para o software simular a distribuição luminosa nesse ambiente. Existem programas como o ESP-r ou o EnergyPlus que servem para modelação energética de edifícios, o que inclui previsões de temperatura, humidade, luz, e consumo de energia elétrica ao longo do tempo. Existem também programas dedicados especificamente ao cálculo luminotécnico, que permitem também o cálculo da distribuição de iluminação numa área, como por exemplo o DIALUX e DIALUX evo, RELUX, e RADIANCE (engine e sub-programas). Strachan [55] faz uma revisão dos vários projetos encontrados na literatura em que tenha sido usado o programa ESP-r. Deste destaca-se Reinhart and Herkel [56] que fez uma comparação para o cálculo de iluminação natural num ponto dentro de um escritório ao longo de 1 ano entre 6 métodos baseados no engine RADIANCE. Os métodos/programas foram 1-método do daylight factor (DF), 2-ADELIN, 3-CLASSIFIED, 4-ESP-r, 5-DC total e 6-DC diffuse (novos métodos criados para este trabalho). No final, concluiu que ESP-r e DC total mostravam os melhores resultados com um root mean square error entre 3 e 5% dependendo do tipo de céu. Referencia também ainda que a performance destas simulações depende muito da modelação da fachada e o sistemas de persianas. Em [57] é feita uma comparação entre a modelação de persianas nos programas ESP-r e EnergyPlus. A comparação foi feita avaliando o arrefecimento causado pelo uso das mesmas em diferentes casos. Montadas do lado de dentro, do lado de fora e entre a janela, com as lâminas a 0° e 45°. Concluiu-se que os resultados entre os dois programas era muitos similares. Em [58] foi feito um estudo sobre o potencial de poupança energética proveniente de iluminação que algumas salas num edifício educacional, ELSC da Universidade de Nottingham, poderiam ter. Foram feitas simulações anuais com recurso ao programa RELUX, que foi validado com algumas medidas experimentais, tendo os desvios entre previsões e medidas reais ficado abaixo dos

20%, o que é um resultado positivo. Segundo a estimativa que apresentam, naquele caso as poupanças estimadas estariam entre 40 e 46%, sendo que este valor não tem em conta a otimização que vem de controlar o uso de luminárias consoante a ocupação da sala. Shikder et al. [59] faz a comparação entre 4 softwares de iluminação, DIALUX, RELUX, RADIANCE, e AGI32. Ao comparar a iluminância calculada para 8 pontos do mesmo cenário pelos 4 programas, os 4 produzem resultados similares, tendo um desvio máximo entre eles de 0.46%.

Baloch et al. [60] apresenta uma revisão muito detalhada sobre as ferramentas que são utilizadas para simular e avaliar a iluminação em edifícios. A simulação permite simular o impacto de janelas e lâmpadas e variações de utilização dos equipamentos. Assim a utilização de uma ferramenta de simulação permite projetar e selecionar o conforto visual dos edifícios. Esta trabalho categoriza as plataformas de simulação em ferramentas simples e ferramentas integradas. Nessa revisão são indicadas vários trabalhos em que as ferramentas de simulação de iluminação são utilizadas para desenvolver estratégias de controlo de iluminação. Destes destacam-se três exemplos. Em [61], a ferramenta DIALUX é utilizada para o controlo de iluminação de um edifício de escritórios no Dubai, a partir da combinação da iluminação natural e artificial. Em [62], o Energyplus é utilizado para apoiar o processo de optimização da utilização do sistema de persianas e iluminação em edifícios de escritórios de 4 cidades diferentes dos EUA. Neste trabalho, é ainda feita a revisão de vários outros estudos que utilizam o Energyplus para controlo de iluminação. Em [63] foi projetado um modelo para prever a performance energética de um sistema de AVAC e luz natural através de uma Artificial Neural Network (ANN) utilizando o Matlab. Foram usadas simulações do EnergyPlus e medições reais de iluminação para treinar a rede neuronal. O sistema de previsão foi depois copulado com uma otimização recorrendo a um algoritmo genético para minimização do consumo energético. Esse modelo resultou em poupanças energéticas de 13.7% num período de 3 meses de Inverno.

[64] e [38] foram dois trabalhos feitos no IST sobre os efeitos de Solar Control Films (SCF). [64] teve como objetivo avaliar o conforto (térmico e visual), e performance energética e ambiental de diferentes SCF's em *glazing systems*. Para tal, foram feitas simulações em EnergyPlus, cujos modelos foram calibrados com medições experimentais. Como esperado, os SCF's reduziram a iluminância e níveis de brilho, bem como os ganhos solares. Assim, o uso de aquecimento e iluminação artificial aumentou, mas o uso de arrefecimento diminuiu. Os SCF's com maior refletância foram considerados melhores, no sentido geral, quando se dava mais importância ao conforto, enquanto que os SCF's com maior selectividade espectral foram considerados melhores quando a prioridade eram as reduções de CO_2 e de consumo energético. Em [38] avaliou-se a performance térmica e luminosa de janelas de vidro simples com e sem SCF's, e também com venezianas. Foram obtidos dados experimentais, em época de Verão e em época de Inverno, de dois escritórios similares, um com um SCF aplicado do lado interno, e outro sem SCF. Mais uma vez, os dados experimentais foram usados para calibrar o modelo EnergyPlus, que foi depois utilizado para simular a performance de vários SCF's diferentes, e para diferentes orientações da fachada. As venezianas foram mantidas sempre na mesma posição durante o processo de aquisição de dados. Chegou-se a conclusões similares, nomeadamente de que, especialmente para fachadas orientadas para Este, Oeste e Sul, a aplicação de SCF's significa poupanças no

arrefecimento de até 86%, embora os consumos de iluminação e aquecimento aumentassem. Durante o horário de expediente (9h00-18h00), com o SCF instalado, as reduções de iluminância foram de 14-15% no Verão, e 49-50% no Inverno. As venezianas obtiveram resultados similares. Gomes et al. [65] realizou um trabalho sobre o efeito do formato e características de venezianas na sua transmitância, refletância e absorvância. Um modelo foi criado que permite diferentes discretizações das lamelas das venezianas, e a possibilidade de ser integrado numa ferramenta de simulação, que neste trabalho foi o EnergyPlus. As transmitâncias solares das venezianas calculadas foram comparadas com outros métodos e medições experimentais. Em maior parte dos casos houve concordância, excepto para os casos em que a radiação era maioritariamente difusa. Verificou-se que os parâmetros "sun profile angle", "slat angle" e "venetian blind geometry" tinham grande influência nas propriedades ópticas das venezianas.

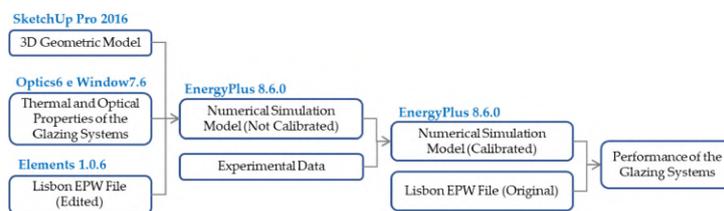


Figura 2.21: Fluxograma de [64]

DIALUX evo 9

O DIALUX evo 9.1 foi o programa escolhido para o cálculo da iluminância na sala proveniente de iluminação artificial. É um programa comercial grátis utilizado para projeto luminotécnico. O programa permite desenhar uma sala/escritório/edifício/... e os objetos que a compõem com algum detalhe, e também as luminárias que o espaço possui. É possível definir cor, transmissividade e refletividade para todos esses objetos. As luminárias são definidas pelo seu diagrama fotométrico, que contém informação sobre como é a distribuição de luz criada pela lâmpada. Permite também definir vários cenários de iluminação, isto é, diferentes configurações que quais luminárias estão ligadas. Com isto, o programa calcula a iluminância em pontos ou planos desejados do espaço, tendo em conta as componentes direta e refletida da iluminação. O programa permite considerar, ou não, o efeito da luz solar para três tipos de céu (limpo, nublado e muito nublado). Mangkuto [66] fez uma validação dos softwares DIALUX EVO 4.1 e DIALUX 4.2, realizando alguns casos teste definidos pelo CIE, concluindo que ambos os programas têm boa precisão no cálculo quando comparado com os valores de referência, tendo apenas alguns problemas nas componentes de luz do sol e luz refletido por objetos no exterior. Este último ponto não terá efeito neste trabalho, já que o DIALUX será apenas utilizado para o cálculo da iluminância proveniente de luminárias. Em [67] também foi feita uma validação do software para suporte do trabalho que consistia em comparar a eficiência energética entre lâmpadas LED e CFL. A validação foi feita comparando os resultados do software com medidas experimentais numa sala de aula na Malásia, tendo as simulações obtidos resultados precisos, melhores que o cálculo manual.

Também Fakra et al. [68] testou o programa, para tentar validar o seu uso em situações com luz na-

tural. Fê-lo comparando os valores simulados com medições experimentais de vários pontos simulando alguns casos teste definidos pelo CIE, num cenário de laboratório. No geral, apresentou resultados satisfatórios, tendo os vários casos erros médios globais entre 1 e 13.55%. No entanto, em alguns pontos, nalguns casos o erro chegou a ser 81%.

Vizeu da Silva et al. [69] para tentar tornar a Calçada Santa Isabel, em Coimbra, num local mais confortável e seguro, e, assim talvez melhor o turismo, fizeram um estudo em que testaram vários tipos de lâmpadas e localizações das mesmas. Concluíram que a utilização de LEDs conseguiria melhor a qualidade luminosa da zona com relativa facilidade. Para além disso, o uso dessas lâmpadas traria reduções de CO₂. Mencionaram também como programas como o DIALUX evo são essenciais neste tipo de projeto.

EnergyPlus

O EnergyPlus 6 é um programa open source desenvolvido pelo *Department of Energy* dos E.U.A. para modelar consumos de energia (aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, outros consumos elétricos) e uso de água em edifícios, e neste trabalho foi o escolhido para o cálculo da iluminação natural.

Alguns dos recursos e capacidades mais frequentemente utilizados do EnergyPlus são:

- Solução integrada e simultânea das condições da zona térmica e resposta do sistema AVAC que não assume que o sistema AVAC pode atender às cargas da zona e pode simular espaços não-condicionados e sub-condicionados.
- Solução baseada em balanço de calor de efeitos radiantes e convectivos que produzem conforto térmico de temperaturas de superfície e cálculos de condensação.
- Etapas de tempo sub-horárias definidas pelo usuário para interação entre zonas térmicas e o ambiente; com intervalos de tempo automaticamente variados para interações entre zonas térmicas e sistemas AVAC. Isso permite que o EnergyPlus modele sistemas com dinâmica rápida e, ao mesmo tempo, troque a velocidade de simulação por precisão.
- Modelo combinado de transferência de calor e massa que considera o movimento do ar entre as zonas.
- Modelos de janelas avançados, incluindo persianas controláveis, vidros eletrocromáticos e balanços de calor camada por camada que calculam a energia solar absorvida pelos vidros das janelas.
- Cálculos de iluminação e brilho para relatar conforto visual e controles de iluminação de direção.
- AVAC baseado em componentes que suporta configurações de sistema padrão e inovadoras.
- Um grande número de AVAC embutido e estratégias de controle de iluminação e um sistema de script de tempo de execução extensível para controle definido pelo usuário.

- Importação e exportação de interface de maquete funcional para co-simulação com outros motores.
- Resumo padrão e relatórios detalhados de saída, bem como relatórios definíveis pelo usuário com resolução de tempo selecionável de anual a sub-horária, todos com multiplicadores de fonte de energia.

EnergyPlus é um programa que lê a entrada e grava a saída em ficheiros de texto. O ficheiro de input com todas as características do ambiente ou edifício a modelar estão num chamado ficheiro IDF (Input Data File), um ficheiro de texto. A edição deste ficheiro pode ser feita diretamente no mesmo, já que é um ficheiro de texto, ou então, com recurso a um IDF Editor disponibilizado com o programa, onde é possível alterar o ficheiro numa interface como uma spreadsheet. Neste editor é possível realizar várias operações como adicionar materiais, alterar as propriedades dos mesmos, adicionar objetos como venezianas e alterar também as suas propriedades, alterar as condições da simulação, etc. Para a modelação da cena, o procedimento mais comum consiste em usar algum programa de desenho e modelação 3D para criar essa mesma cena, recorrendo ao programa de desenho SketchUP e ao software OpenStudio, um programa complementar do EnergyPlus que permite a ligação entre este último e o programa de desenho e modelação. Naturalmente, o clima tem um papel extremamente importante na projeção de edifícios e no cálculo energético dos mesmos. Para a simulação esse clima é definido por um EPW weather file, também um ficheiro de texto. No website do EnergyPlus estão disponíveis weather files com um "ano meteorológico típico" para várias cidades do mundo, incluindo Lisboa. Estes ficheiros possuem uma aproximação do clima ao longo de um ano, com valores de hora a hora. Para além disso, ainda vêm incluídas as aplicações EP-Launch para gerir ficheiros de entrada e saída e realizar simulações em lote, e EP-Compare para comparar graficamente os resultados de duas ou mais simulações.

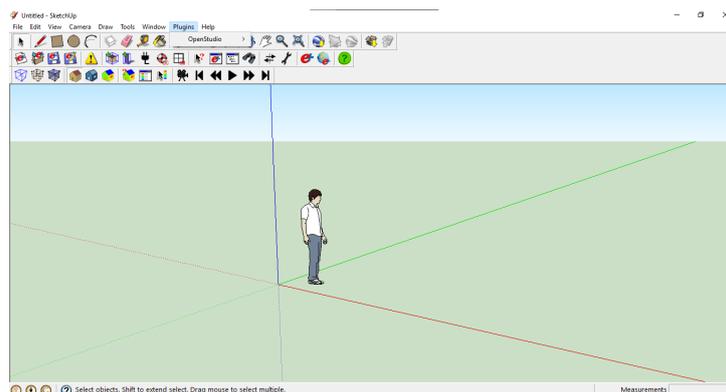


Figura 2.22: Programa SketchUP juntamente EnergyPlus

2.3.2 Proposta de Controlo

Posto que os tempos entre cada ação do sistema são extremamente longos (10-30 min) quando comparados com o tempo de resposta, que é instantâneo, do mesmo às alterações que nele atuam,

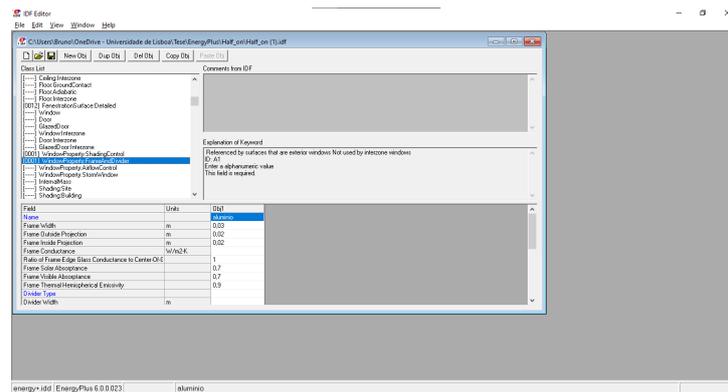


Figura 2.23: Interface do IDF Editor

então, para o controlo, uma análise das dinâmicas do sistema não é necessário. Quando o sistema reage a uma alteração no mesmo, as não linearidades e o período transiente do próprio são de tal forma insignificantes que o sistema está instantaneamente estável, e, portanto, uma análise em frequência, dos pólos, ou da função transferência do sistema são desnecessárias. Para solucionar o problema do controlo várias abordagens podem ser tomadas. É bastante importante referir que, durante a realização deste trabalho (2020/2021), estava-se perante a pandemia SARS-CoV-2, e que portanto, as instalações da faculdade, incluindo a sala, estiveram encerradas durante uma parte muito significativa deste período. Isto, juntamente com o facto da sala estar muito frequentemente ocupada com aulas durante o período em que as instalações estavam abertas, resultou numa reduzida possibilidade do uso da mesma. Os sensores disponíveis na sala foram lá colocados previamente e, como também não era objetivo desta tese estudar a aquisição de dados dos mesmos, acabaram por ter pouca utilidade, já que, os dados de lá obtidos não traduziam com precisão a realidade. Outras condicionantes a ter em conta, que dificultam uma automatização completa e mais elaborada do sistema de iluminação, são, por exemplo, o facto de não existir nenhuma forma de saber diretamente a posição dos estores, o facto das luminárias não poderem ser automatizadas como os estores por não estarem configuradas para tal, e também o facto dos comandos para a movimentação dos estores não funcionarem, seja pelos mesmos terem sido deixados em modo manual por algum utilizador da sala, ou por outro qualquer motivo não aparente. Tendo em conta a literatura e as características do problema algumas das opções poderiam passar por tentar prever a configuração em que os estores e luminárias se encontram, prever a distribuição da iluminância usando essa informação e/ou a informação da estação meteorológica do IST (que estava indisponível durante parte da realização deste trabalho). Isto poderia ser feito partindo das equações físicas que regem os processos deste sistema, ou através de um modelo de dados, ou recorrendo a software de simulação. Como já foi mencionado, o conforto do utilizador depende, não apenas da componente visual, mas também de outros fatores como temperatura, humidade e concentração de partículas ou gases nocivos. Destes, aquele que é mais influenciado pela iluminação é a temperatura. Isto porque os ganhos solares possuem um efeito significativo na mesma, como já fora exposto na figura 2.16, o que não acontece com a iluminação artificial. Portanto, uma estratégia de controlo de iluminação deve ter em atenção os efeitos que as suas ações de controlo provocam na temperatura do espaço. Além disso, os gastos energéticos do controlo de temperatura, como o AVAC, tendem a ser superiores

àqueles de iluminação, o que poderia tornar o controlo luminotécnico contraproducente no seu objetivo de eficiência energética. Olhando para as opções acima citadas, bem como o software disponível e a configuração e condicionantes da sala sobre o qual esta dissertação incide, o que é proposto para um controlo por modelo para esta sala segue aproximadamente o seguinte procedimento:

- **Valor do sensor** Isto permite medir a iluminância média no interior da sala
- **Dia e hora** Importante porque a altura do sol faz variar a iluminância na sala
- **Disposição dos estores** Esta informação é importante para poder modelar corretamente a distribuição luminosa na sala. No entanto, não está disponível já que não há nenhuma forma de retirar este valor diretamente. Para dar a volta a este problema:
 - **Os estores foram colocados no modo manual** Ao voltar ao modo automático têm de se colocar numa posição conhecida
 - **Mantiveram-se no modo automático** Assume-se que estão na posição do último comando
- **Luminárias Ativas** O mesmo que a disposição dos estores, mas para as luminárias.
- **Modelação Inicial** São utilizadas as 4 informações acima para, através de um programa de modelação, neste caso o EnergyPlus para a componente de iluminação natural e DIALUX para a componente artificial, para simular a distribuição da iluminância pelo plano de trabalho da sala.
- **Avaliação** Primeiro passo de controlo. Avalia o conforto do resultado modelado acima simplesmente verificando se todos os pontos da distribuição criada estão entre os limites definidos para conforto. Se estiver e não houverem luminárias ativas então não é necessário o passo seguinte. Caso contrário, segue-se o passo seguinte
- **Teste de configurações** São feitos modelos para a distribuição da iluminância na sala, usando à mesma o EnergyPlus para a componente natural e o DIALUX para a componente artificial. Desta vez, a hora, dia e valor no sensor mantêm-se, mas as configurações de estores e luminárias são variáveis. São modelados os vários casos e escolhe-se a solução que simultaneamente verifique os limites e tenha o menor consumo energético possível (menos luminárias acesas)
- **Execução da Solução Ótima** Executar a solução decidida

2.4 Trabalho Prévio na mesma sala

Já alguns trabalhos foram feitos sobre esta sala, nomeadamente o de Oom [70], em que se estudou o efeito de várias estratégias de controlo da temperatura da sala, usando o sistema de AVAC, abrir de janelas, e sombreamento/iluminação da sala com estores (apenas c1 ou c2) ou luzes. Concluiu-se que o controlo automático é mais eficiente energeticamente, especialmente quando comparado ao controlo não consciencializado que é geralmente feito pelos utilizadores. O algoritmo de controlo teve poupanças previstas nos gastos de iluminação de 26%. Referencia ainda que o facto das luminárias

não se conseguirem controlar individualmente pode reduzir a quantidade de poupanças possíveis, e que o sombreamento causado por árvores e prédios tem um impacto significativo na radiação que chega à sala.

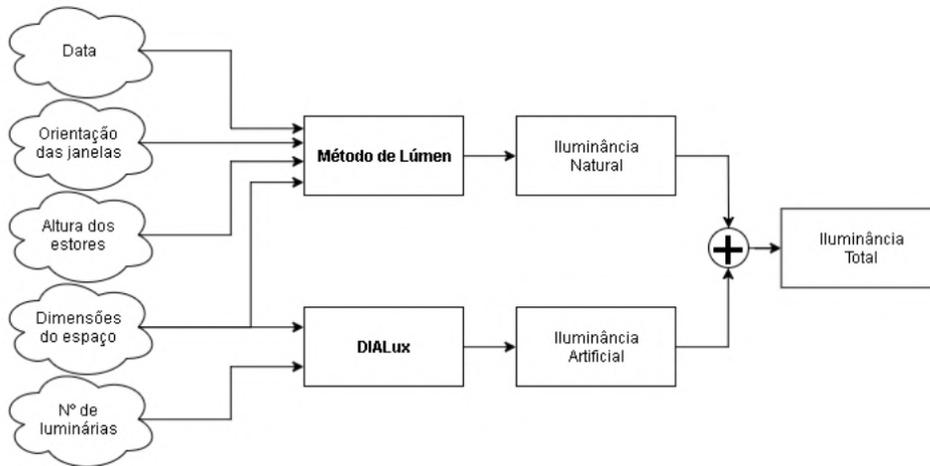


Figura 2.24: Fluxograma de controlo de iluminação de Oom [70]

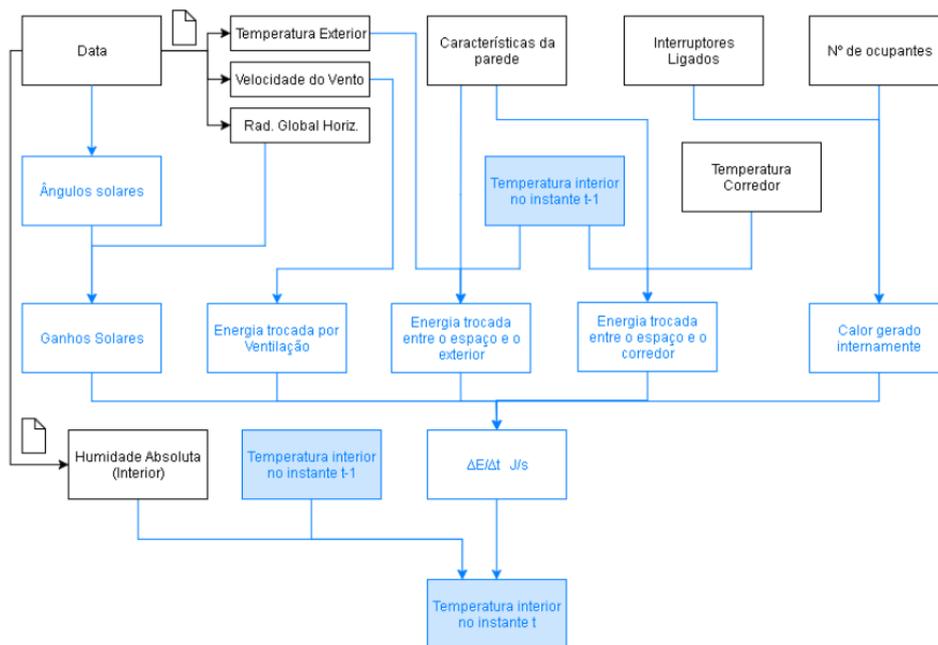


Figura 2.25: Fluxograma de controlo térmico de Oom [70]

Em [71] foram usados dois modelos, um puramente teórico e um feito através de redes neuronais, para prever e controlar a temperatura da sala. No entanto, os resultados não foram precisos o suficiente, chegando a ter um root mean square error de 2°C.

O trabalho de Martins [72] consistiu em algo similar ao que se pretende com este trabalho. Uma parte significativa do trabalho concentra-se no cálculo da transmissividade da janela, valor esse que, segundo os cálculos do mesmo, variava entre 60 e 90% ao longo do dia. Para além disso, tenta prever a distribuição luminosa na sala através da posição dos estores, das luminárias ligadas e da radiação

solar medida pela estação meteorológica do IST (informação que para esta dissertação não esteve disponível) e, a partir disso decidir se o uso das venezianas ou de luz artificial é necessário. Vários métodos foram testados para a previsão da iluminância na sala. No final, as previsões de iluminância foram consideradas como tendo um erro admissível, focando mais na precisão para valores baixos de iluminância, já que para valores muito altos esta precisão não foi considerada importante. Segundo as previsões do mesmo, podia-se esperar uma poupança de 540kWh do consumo elétrico daquela sala por semestre.

Uma outra tese sobre o mesmo tema foi a de Salvador [73], que não foi feita na mesma sala, mas foi feita na mesma faculdade, num laboratório do *Tagus Park*, em que se conseguiu prever com erro aceitável (11-17%) a iluminância e controlar a mesma automaticamente através da variação da intensidade luminosa (*dimming*) das luminárias. Os resultados a nível de poupança energética estimados foram entre 53 e 75%, o que é bastante bom, mas depende muito do facto das luminárias terem a capacidade de *dimming* e de venezianas em que é controlado o ângulo de abertura das lamelas, o que não acontece na sala sobre a qual esta dissertação foi feita. O cálculo para a iluminância nos vários pontos da sala causada pelas luminárias foi feito seguindo um "método por secções".

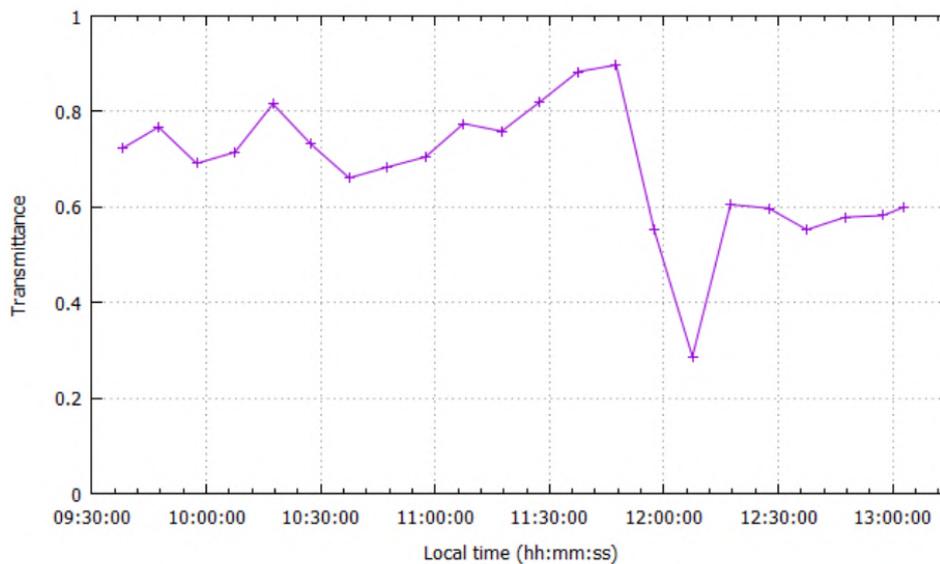


Figura 2.26: Transmissividade da janela segundo Martins [72]

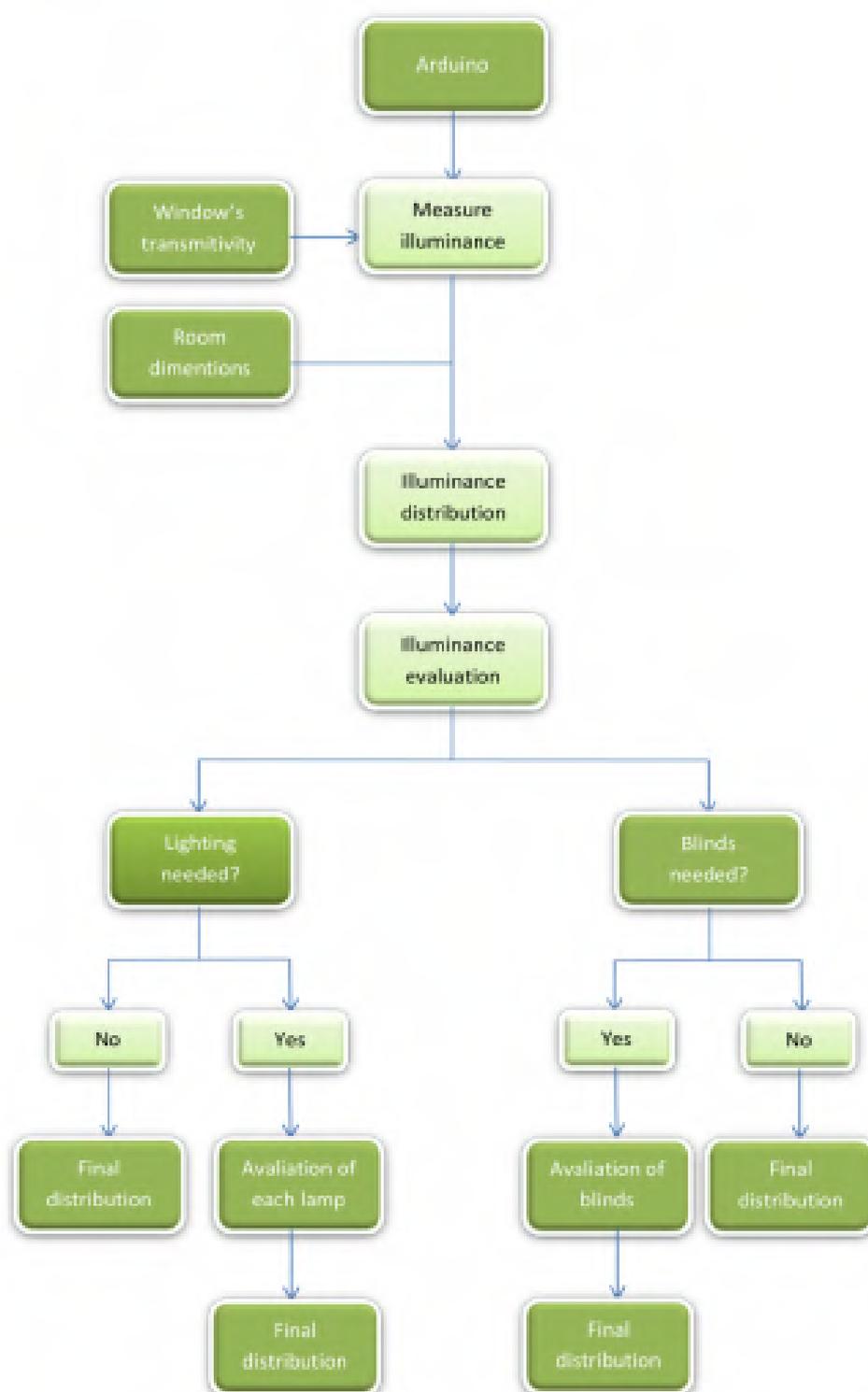


Figura 2.27: Fluxograma de controlo de iluminação de Martins [72]

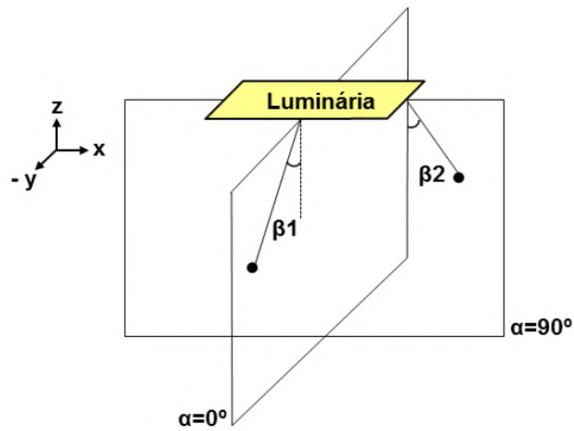


Figura 2.28: Definição dos ângulos para o cálculo de iluminância Salvador [73]

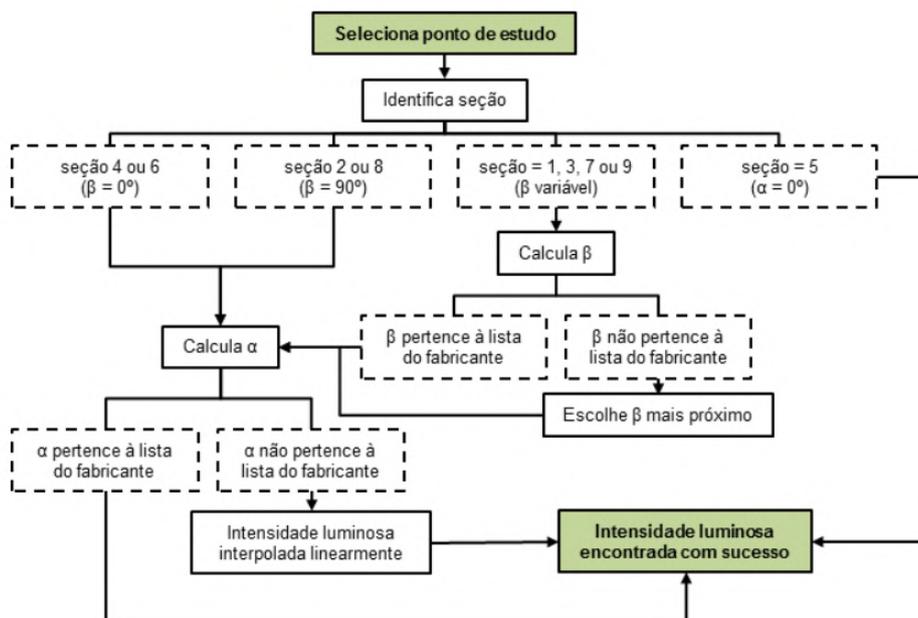


Figura 2.29: Fluxograma de cálculo de iluminância de Salvador [73]

Capítulo 3

Implementação

3.1 Metodologia

3.1.1 Algoritmo de Comando

Para a automação do sistema de iluminação existem, entre outras, duas estratégias possíveis. Uma delas, normalmente referida simplesmente como controlo, requer algum tipo de modelação do sistema, e pode ser do tipo anel aberto ou anel fechado, dependendo se utiliza alguma medição/previsão do output para usar como feedback no cálculo da ação a tomar. Por outro lado, quando não se utiliza nenhum tipo de modelação, e em vez disso o algoritmo que decide a ação de controlo segue apenas um sistema de regras, então denomina-se tipicamente como um algoritmo de comando. A forma mais simples de automatizar o sistema de iluminação é simplesmente usar um horário, de maneira a que a posição dos estores seja a melhor para a posição que se espera estar do Sol. Assim, esta forma de automação classifica-se como um algoritmo de comando. Enquanto o Sol está baixo (a partir das 7h), para evitar luz solar direta ou refletida nos olhos, mas entrar o máximo de luz possível, a melhor posição será c3. Aproximadamente meio da manhã (9h), como o sol já estará mais alto, então têm que se trocar esta configuração de modo a tapar a luz direta, que agora vem mais alta, isto é, c4 ou c1. Aqui, o que vai ser usado para decidir entre qual usar é o valor do sensor. Definiu-se que até 93, inclusive, o algoritmo escolhe c4. Acima disso, escolhe c1. Assim se mantém até ao meio dia solar, que aqui se vai considerar ser 12:30. Após este, então já não existe problema de luz direta na visão do utilizador e, portanto, pode-se abrir completamente os estores para entrar o máximo de luz solar possível. Como, no entanto, isso pode significar luz a mais deve-se escolher entre c4 ou c2, que, mais uma vez é feito utilizando o sensor da sala. Desta vez, até 86 escolhe-se c2, e acima disso c4. E assim se mantém até ao final do dia.

Para a decisão das luminárias, o que foi definido foi simplesmente que quando o algoritmo de comando decide a configuração c1 então a configuração das luminárias deve ser 2/4, já que muito provavelmente será necessária iluminação artificial em toda a sala. Caso a posição dos estores definida seja c2, c3 ou c4, então as luminárias devem ter a configuração 1/4p, pois para estas posições os níveis de iluminância junto à janela tendem a ser suficientes, enquanto junto à porta o mesmo não ser

verifica. Como já foi mencionado, a posição dos estores têm um efeito significativo na temperatura e, conseqüentemente, esse efeito deve ser ponderado. Usualmente, o intervalo de temperatura do ar considerado confortável é de 19 a 24°C, aproximadamente. Assim sendo, como a posição c2 é aquela que possui um efeito claro no aumento da temperatura, então, caso a temperatura interna da sala, medida pelo sensor existente, seja igual ou superior a 24.0°C então o algoritmo deve impedir que essa posição seja definida. Para evitar que a temperatura esteja abaixo do limite inferior, não é necessário definir nenhuma medida extra no controlo dos estores, visto que o algoritmo já tenta maximizar a iluminação natural, que gera calor.

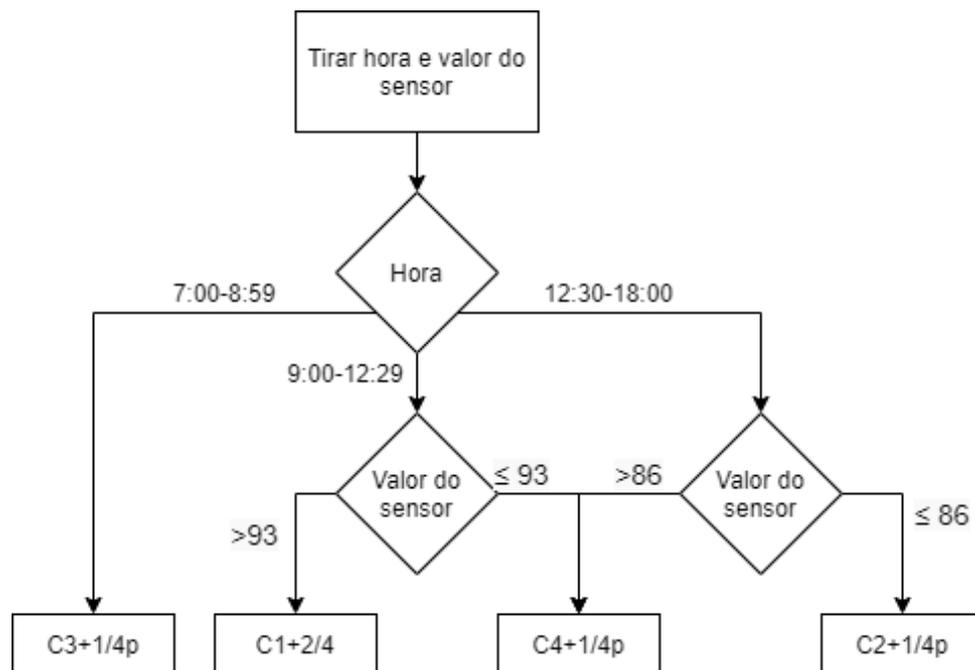


Figura 3.1: Fluxograma do algoritmo de comando

3.1.2 Controlo por Previsão

Outra estratégia de controlo consiste em, perante uma situação que é considerada não corresponder a conforto para o utilizador, prever os efeitos que certas alterações teriam e escolher uma ação de controlo a tomar consoante essas previsões. Para isso é necessário saber os efeitos que cada configuração de estores e luminárias têm na iluminância no plano de trabalho da sala. Para obter essa

informação foram utilizados 2 programas de simulação, Dialux Evo 9 para o cálculo do efeitos das luminárias, e EnergyPlus 6.0 para o efeito dos estores. A escolha do Dialux Evo é justificada pelo que se verificou em Mangkuto [66] e Kamaruddin et al. [67] em que referem que o programa obteve bons resultados, simulando bem o que se verificava na realidade, melhor que por cálculo manual. E o único problema do mesmo acontecia quando era usado para cálculos com luz natural (já que o programa também permite isso), mas como para isso se vai utilizar o EnergyPlus esse mesmo problema não afeta os resultados. O EnergyPlus é um programa muito utilizado e por isso foi escolhido. Face a testes feitos em outros casos para testar a validade do programa, nuns foi considerado satisfatório e dentro de margens (Queiroz et al. [74]) e noutros já nem tanto, referindo alguns problemas com a difusão interna e que o mesmo acaba sobrestimar os valores da iluminância (Ramos and Ghisi [75])

Para se ter uma ideia dos efeitos que as várias configurações de estores e luminárias têm na iluminância e também para validar em parte os resultados obtidos pelo software utilizado foram feitas algumas medições na sala. Essas medições foram feitas em diferentes alturas do dia, em dias próximos e em que as condições climáticas eram semelhantes. Foi medida a iluminância no plano de trabalho (mesas) com o sensor de mão ISO-TECH ILM 1332A (2.2.2) em seis pontos da sala, os 4 cantos, o centro, e o lugar da fila do meio junto à janela (fig. 3.2). O lugar junto à porta dessa fila mediu de forma consistente os mesmos valores que o lugar da fila de trás. Isto foi feito em várias configurações que se consideraram prováveis de ser utilizadas àquela hora.

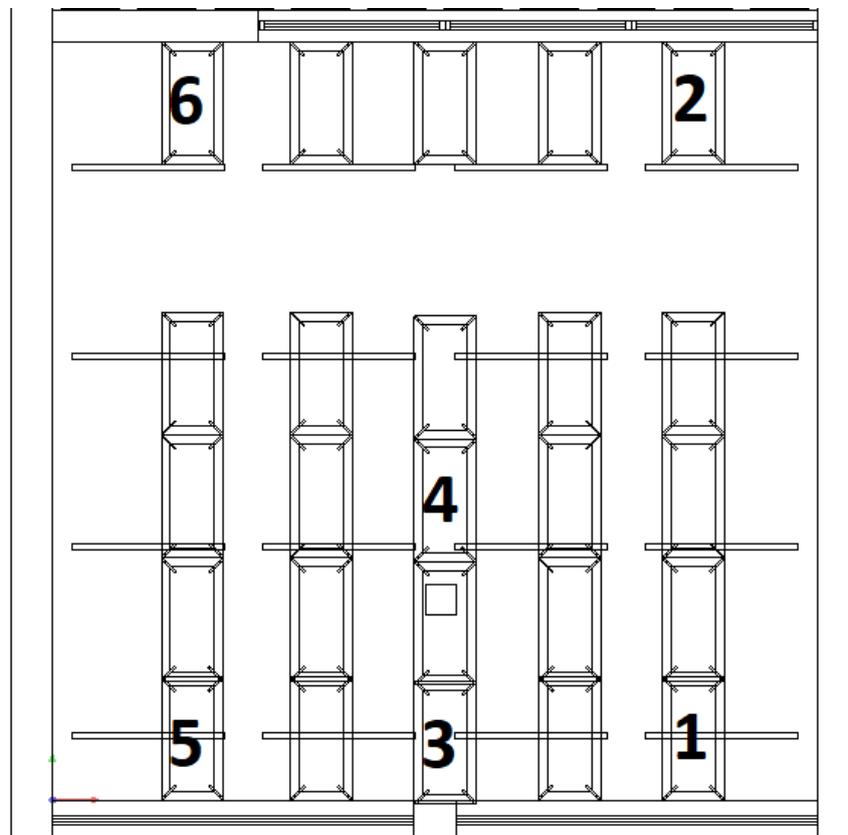


Figura 3.2: Pontos de medição na sala para testes

Tabela 3.1: Características das lâmpadas da sala e das utilizadas na simulação

Nome	Tipo	Potência	Fluxo Luminoso	CCT	CRI	Comprimento
Philips CorePro LEDtube	LED tubular	20 W	2200 lm	4000 K	80	1500mm
Maznor M456L60LED2	LED tubular	19 W	2200 lm	4000 K	80	600 mm

Luz Artificial - Dialux evo

Para calcular os efeitos da iluminação artificial na iluminância foi usado o software Dialux evo, versão 9.1. A escolha deste software para este fim, do cálculo da iluminação artificial, vem do que é mencionado em 2.3.1. O que se pretende retirar deste software são os valores de iluminância horizontal no plano de uso (como é denominado no software), isto é, nas mesas, causada por várias configurações de luminárias utilizadas. Estes valores podem depois ser simplesmente adicionados à iluminância calculada (no mesmo plano) proveniente de luz natural, pelo que é mencionado na secção 2.1.1.

Para o programa efetuar este cálculo, começou-se por modelar, dentro do software, a sala, desenhando as paredes, janelas, mesas e luminárias (fig. 3.3). Para as paredes, janelas e mesas, para além se definirem as suas dimensões, foi também necessário definir a sua transmissividade (para a janela) e refletividade (paredes e mesas), o que foi feito segundo o que está descrito em 2.2. Também foi modelado parte do corredor, para que se considerasse a iluminação proveniente do mesmo para a sala, no entanto, após os testes, verificou-se que a iluminância resultante simulada disto mesmo era praticamente nula, abaixo daquela que se verifica no ambiente real. Para as luminárias, o programa possui uma base de dados com as características e diagramas fotométricos de vários modelos de várias marcas existentes. No entanto, na mesma não se encontravam as lâmpadas existentes na sala. Portanto, foram escolhidas outras luminárias, com características similares (3.1), à exceção do seu comprimento, por não existirem lâmpadas com todas as características semelhantes. No entanto, o comprimento das lâmpadas utilizadas em simulação é próximo da metade das existentes na sala, e como tal, para superar isto pode-se simplesmente utilizar o dobro das luminárias por linha, que se prevê não ter uma influência muito significativa nos resultados.

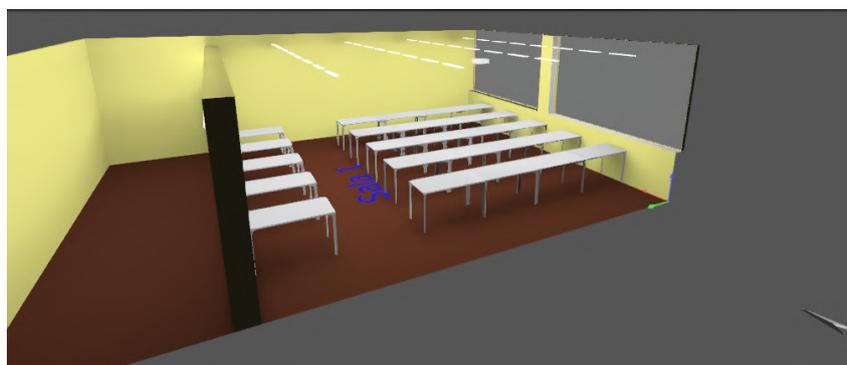


Figura 3.3: Modelação da Sala no Dialux Evo

Para se calcularem os efeitos das várias configurações possíveis, estas mesmas serão definidas por aquilo a que o software denomina de "Cenários de Luz". No programa define-se para cada cenário quais as luminárias que devem estar ligadas e as que não devem, bem como se se deve contar com

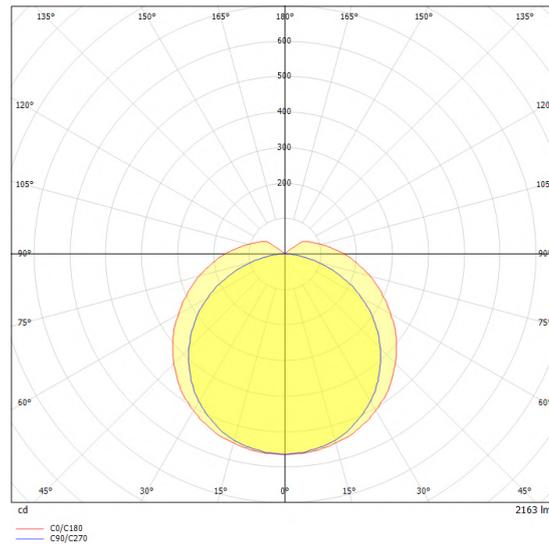
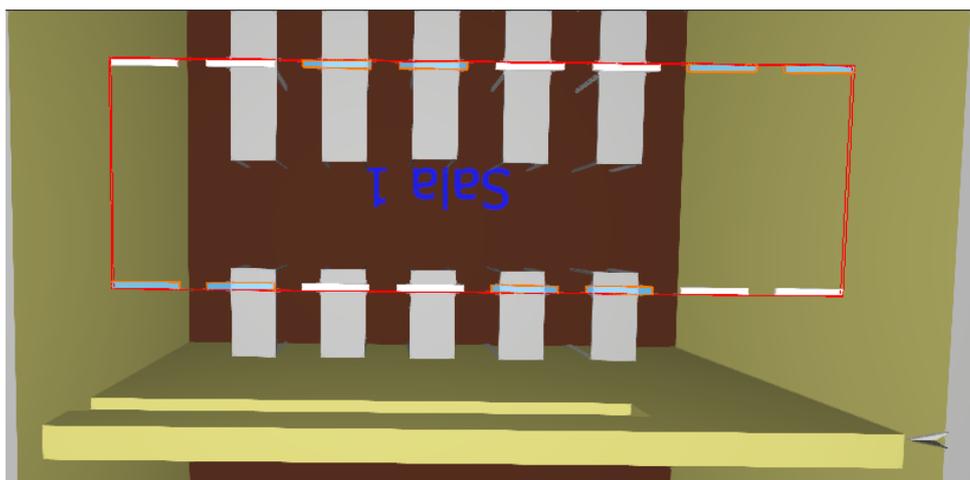
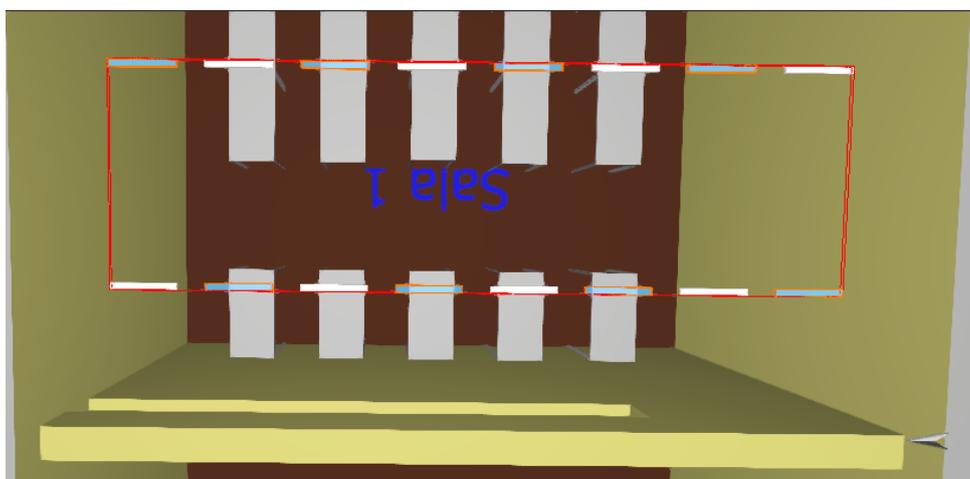


Figura 3.4: Diagrama Fotométrico das lâmpadas utilizadas

os efeitos da luz natural, que aqui não é necessário. É também necessário definir o plano de uso, que foi definido como sendo 0.75m acima do chão. É possível ainda definir pontos de cálculo específicos, que neste caso foi utilizado para criar um ponto de cálculo de iluminância horizontal na posição onde se encontra o sensor na sala real, isto é, por cima do projetor. Novamente, devido ao facto da iluminância num ponto proveniente de várias fontes luminosas ser igual à soma da iluminância resultante de cada uma das fontes luminosas nesse mesmo ponto, existem simplificações que podem ser feitas nestas simulações. Por exemplo, se se considerar o caso em que ambos os interruptores das luminárias do lado da porta estão ligados, o que na figura 2.17 seriam os casos (a) e (b), pode-se dizer que a iluminância resultante desse cenário seria o dobro da iluminância que resultasse de um cenário em as luminárias ligadas fossem uma média entre os casos (a) e (b). Este caso médio pode ser feito na simulação recorrendo ao facto de se estarem utilizar o dobro das luminárias, como se vê na figura 3.5, onde as luminárias a azul são as consideradas como ligadas. Os resultados provenientes de 4 cenários (apenas (a), apenas (b), (a) e (c), e médio) estão na figura 3.6. Da mesma forma pode-se pensar para o cenário em que estão ligadas as luminárias do lado da janela, isto é (c) e (d), donde vem o caso médio que está na figura 3.7. Assim, com os valores médios da iluminância dos cenários em que se tem ligado um interruptor do lado da porta, ou um do lado da janela, conseguem-se estimar todos os casos possíveis, adicionando linearmente estes dois.

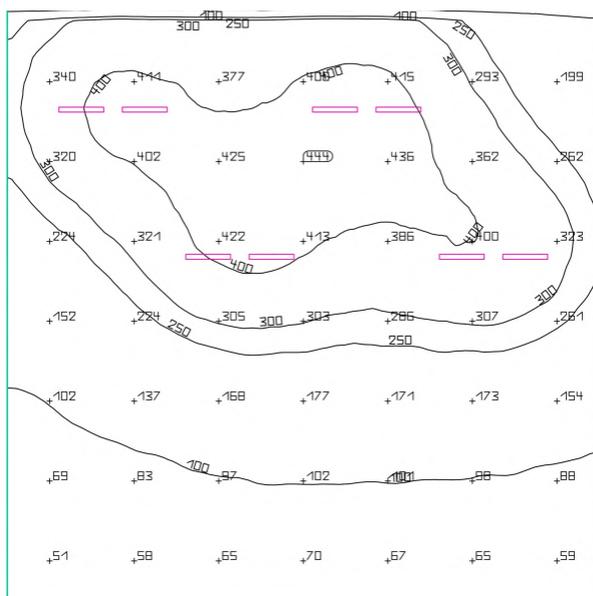


(a) Caso (b)

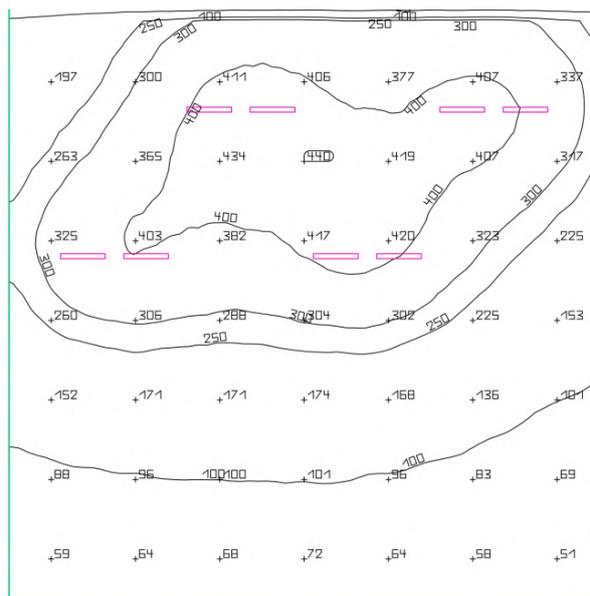


(b) Caso médio

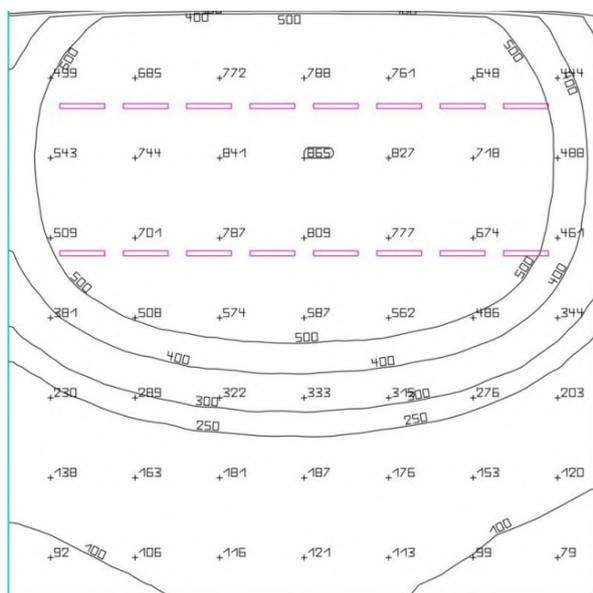
Figura 3.5: Comparação entre as luminárias ligadas para o caso médio e o caso (b)



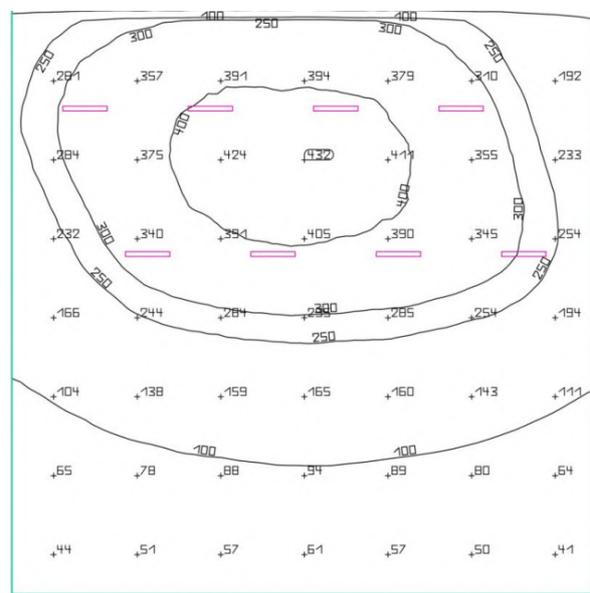
(a) caso (a)



(b) caso (b)



(c) caso (a)+(b)



(d) caso médio

Figura 3.6: Exemplos de Dialux com luminárias do lado da porta

O output do programa sai sob o formato de um relatório, como o que está disponível no Anexo A. Nesse mesmo relatório encontra-se, entre outra informação as figuras apresentadas acima, donde se vêem valores de iluminância no plano de uso dispostos regularmente criando uma matriz (7x7, definido automaticamente pelo software) e alguns valores dispersos que indicam os valores das linhas de iluminância idêntica, similares a curvas de nível. No relatório também se encontra o valor da iluminância dos pontos de cálculo definidos. Estes valores de iluminância são posteriormente guardados no Matlab, no formato de matriz, para poderem ser utilizados sem ser necessário executar estas simulações durante o controle.

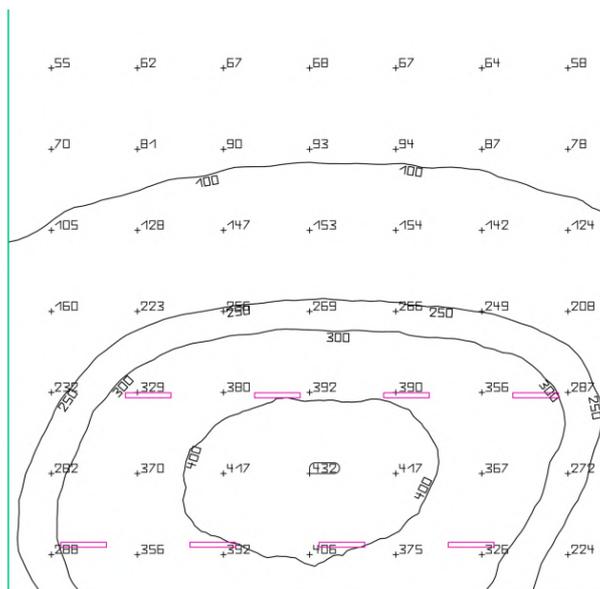


Figura 3.7: Caso médio das luminárias do lado da janela

Luz Natural - EnergyPlus

Para simular a distribuição da iluminância no plano de trabalho da sala, proveniente de luz solar foi utilizado o programa EnergyPlus (EP), versão 6, juntamente com o Google SketchUP 7 e o OpenStudio. Esta distribuição depende de 3 fatores. O 1º é a posição do Sol, isto é, o ângulo de azimute e a altitude, que por sua vez dependem da hora e dia do ano. O 2º é a posição dos estores, cujas várias configurações foram descritas em 2.2.1. O 3º é a intensidade da luz solar, que varia consoante o dia e a hora, mas também o estado do céu (nublado ou limpo) do momento em questão.

Destes 3 fatores, o terceiro tem apenas influência nos valores absolutos, não influenciando a distribuição relativa entre eles. Ou seja, se, por exemplo, a uma certa hora, com os estores numa certa posição, um lugar arbitrário *A* possuir maior iluminância que um outro lugar *B*, alterar o estado do céu ou intensidade da luz solar não vai alterar relação entre os dois lugares. Variar o 3º fator vai fazer variar a iluminância medida em ambos os lugares na mesma proporção.

Por outro lado, tanto as posições do Sol como dos estores fazem alterar a distribuição da iluminância pela sala no sentido relativo e absoluto. Por exemplo, alterar a posição dos estores de c3 para c4 fará diminuir a iluminância nos lugares mais a Oeste (lado da porta) e aumentar a iluminância nos lugares a Este. O mesmo pode ser dito quando comparando a posição do Sol numa hora da manhã mais cedo com uma hora mais próxima do meio dia.

A variação do 1º fator, a posição do Sol, é simulada no EnergyPlus, já que o EPW weather file, que considera este fator, tem a duração de um ano inteiro com valores de hora a hora. A variação da posição dos estores é também simulada no software, já que é parte da modelação, e portanto, é possível definir isso mesmo e realizar uma simulação para cada configuração desejada. O 3º fator, no entanto, não consegue facilmente ser simulado no software, já que, a informação que o weather file contém sobre a intensidade da luz solar é apenas um valor provável tendo em conta a hora e dia do ano. O estado do céu é muito variável, e portanto a informação considerada no weather file não é fiável

o suficiente para assumir que o valor considerado par simulação é próximo o suficiente daquele que se verifica no momento a controlar. Como tal, os resultados das simulações em EnergyPlus serão apenas usados para obter a distribuição da iluminância pela sala em termos relativos, sendo depois esta usada, juntamente com o valor medido pelo sensor da sala em tempo real, para obter a distribuição em termos absolutos. Para isso, o ficheiro EPW foi alterado para que a radiação solar fosse constante. Uma outra opção seria usar o valor em tempo real da radiação solar, retirada da estação meteorológica do IST, no EPW weather file e fazer a simulação com essas características, no entanto, essa informação muita vezes não está disponível ou apenas o fica após várias horas, devido a problemas na estação meteorológica. Como tal, esta estratégia não é praticável para controlo em tempo real. No entanto, já que os obstáculos a esta estratégia podem eventualmente deixar de existir, e devido a ser uma opção aparentemente interessante foram feitos alguns testes para avaliar a sua precisão, caso alguma vez se torne viável.

A modelação da sala foi feita graficamente através do software SketchUP. Tal como com o feito com o Dialux, as características dos materiais que compõem a sala foram definidos. A absorvância das paredes foi também definida como 0.7, e a transmissividade dos vidros, baseado no que foi feito em [72], como 0.79, para uma incidência perpendicular. As janelas foram modeladas como sendo 4, de forma a representar a divisão entre os dois estores (esquerda e direita) e parte de cima e de baixo. Para as lamelas dos estores foram definidas 3 configurações possíveis, todas elas com uma refletância de 0.5, variando apenas o ângulo das mesmas, medido a partir da vertical.

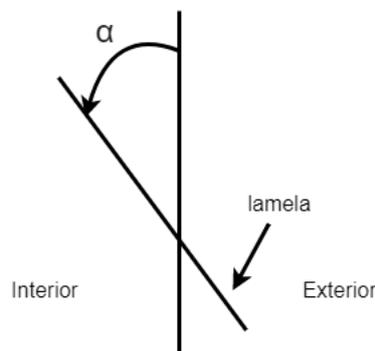


Figura 3.8: Definição do ângulo de inclinação das lamelas

Tabela 3.2: Configurações de estores e respetivos ângulos de lamelas

	c1	c2	c3	c4
parte de baixo	15°	sem estores	15°	90°
parte de cima	15	sem estores	90°	155°

Outros objetos que produzam sombras, como árvores ou outros edifícios são modelados como "shading groups". Nestes, incluem-se apenas as árvores que se encontram no exterior a Este da Sala, e o pavilhão Central, a Sudeste (3.11). Por fim, os pontos onde se pretende medir a iluminância são definidos ao definir-se um "illuminance map"(3.10), que é uma área divisível em retângulos, sendo que a cada retângulo vai corresponder uma valor de iluminância medido. Neste caso definiu-se toda a área da sala, a uma altura de 0.75m do chão, divida em 7x7 quadrados, de forma a se poder corresponder

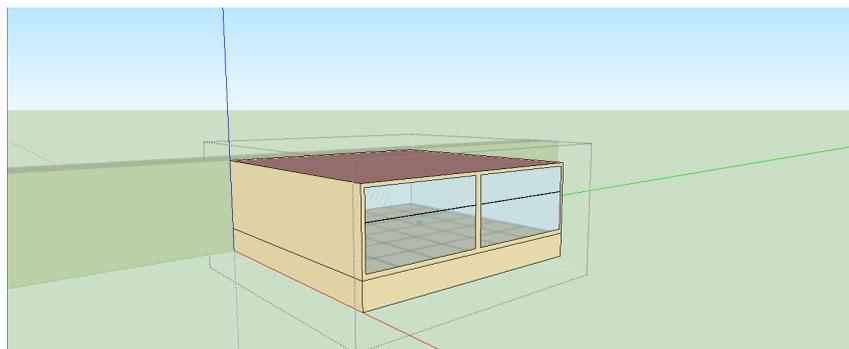


Figura 3.9: Modelação da sala em EP

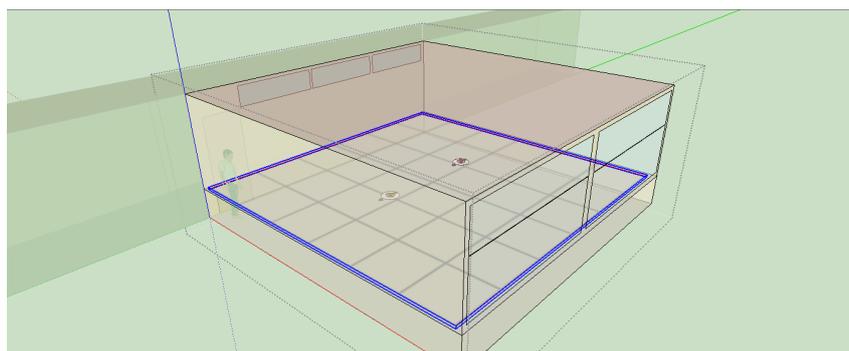


Figura 3.10: Illuminance Map

com o que é obtido pelo Dialux.

O output proveniente da simulação é um ficheiro do tipo CSV (ficheiro de valores separados por vírgulas) com a data, as coordenadas das áreas do mapa de iluminância e os respetivos valores (3.12). Este ficheiro é depois lido e passado para uma variável de Matlab como um *array* tridimensional, onde as duas primeiras dimensões (7x7) correspondem às coordenadas do ponto na sala, e a terceira o momento a que se refere. O ficheiro de output inclui valores de iluminância para todos os dias do ano, de hora a hora. No entanto, por vezes o primeiro valor de cada dia corresponde às 8:00 horas, e por outras vezes às 9:00 horas, de forma aparentemente aleatória. O mesmo se verifica para a hora do último valor de cada dia que por vezes é 17:00 e por outras 18:00.

Os resultados que daqui advém, no entanto, não são muito úteis para o controlo em tempo real já

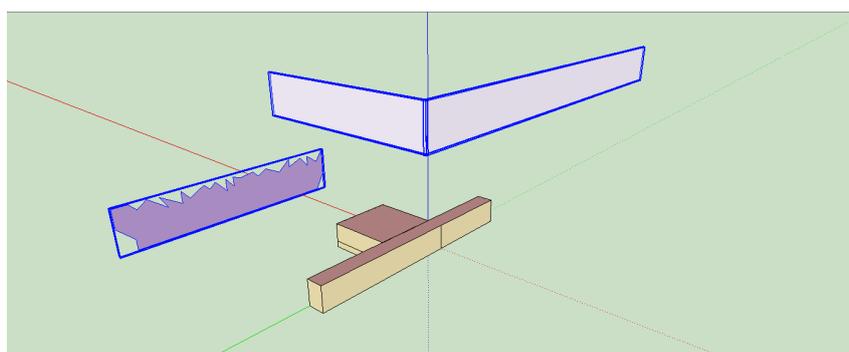


Figura 3.11: Shading Groups. Árvores e pavilhão Central

Date/Time	Libsoa PRT INE	W/MQ=685360:DAYLIGHTV1.10 at 0.80m illuminance [lux] (Hourly),RefP11=(3.50;2.50;0.80),RefP12=(3.50;5.00;0.80),
01/01/18:00	(0,20)	0.20=-11.38
02	(0,20)	0.20=-9,10,11,11,13,17,27
03	(0,20)	1.38=-10,11,12,14,16,23,37
04	(0,20)	2.57=-11,13,15,17,21,28,37
05	(0,20)	3.75=-13,15,18,23,31,38,29
06	(0,20)	4.93=-15,19,24,33,45,55,38
07	(0,20)	6.12=-18,22,30,41,54,61,38
08	(0,20)	7.30=-20,25,32,42,50,48,28
09	(0,20)	0.20=-11.38
10	01/01/19:00	(0,20)
11	(0,20)	0.20=-11.38
12	(0,20)	0.20=-75,80,85,93,107,139,223
13	(0,20)	1.38=-81,87,96,111,136,190,304
14	(0,20)	2.57=-87,97,113,137,176,233,307
15	(0,20)	3.75=-95,110,135,178,250,334,239
16	(0,20)	4.93=-103,134,162,220,323,490,321
17	(0,20)	6.12=-112,139,187,275,418,544,321
18	(0,20)	7.30=-120,150,201,282,385,431,236
19	01/01/10:00	(0,20)
20	(0,20)	0.20=-11.38
21	(0,20)	0.20=-152,200,213,234,272,359,583
22	(0,20)	1.38=-200,214,234,268,332,441,792
23	(0,20)	2.57=-210,230,262,315,406,561,798
24	(0,20)	3.75=-222,250,298,384,534,731,614
25	(0,20)	4.93=-234,272,340,473,727,1055,818
26	(0,20)	6.12=-244,300,390,545,802,1031,616

Figura 3.12: Ficheiro CSV resultante da simulação em EP

que, como mencionado acima, não têm em conta a condição climática que se verifica no instante real a avaliar. Portanto, o que se pretende com estes resultados da simulação é relacioná-los com as condições reais medidas num certo instante, que aqui será o valor lido no sensor de iluminância da sala, de modo a obter resultados que serão, em princípio, mais próximos daquilo que se verifica na realidade, nesse certo instante. Para tal, as simulações são feitas com o valor de radiação solar global constante (70 Wh/m^2) no EPW weather file. Os valores que desta simulação advém (E_{Sim}) foram depois comparados com medidas reais em certos dias (E_{Mesat}) e com o valor medido no sensor de iluminância da sala no mesmo momento das medidas (E_{St}), de forma a obter um fator (f) que permita determinar a distribuição da iluminância real na sala (E_{Mesa}), a partir dos resultados das simulações com radiação constante (E_{Sim}), juntamente com o valor da iluminância medido pelo sensor (E_S).

$$E_{Sim} \times \frac{f}{E_{St}} \times E_{St} = E_{Mesat} \quad (3.1)$$

$$E_{Sim} \times \frac{f}{E_{St}} \times E_S = E_{Mesa} \quad (3.2)$$

Algoritmo de Controlo

A implementação do controlo foi feita em MATLAB. No geral, o algoritmo segue uma estrutura semelhante à de um MPC (controlo por modelo preditivo), como está na figura 3.13. Começa por escolher uma ação de controlo possível, prevê o resultado que tal ação teria, depois avalia se essa resposta é válida/ótima, e consoante essa avaliação executa essa mesma ação de controlo ou testa outra, e assim sucessivamente. A forma como avalia os resultados previstos e escolhe que ação tentar de seguida (caso a avaliada não seja válida) segue o algoritmo presente na figura 3.14.

O programa começa por colocar os estores na posição c3, por ser uma posição "segura", isto é, costuma ser opção válida. Depois disso, com a hora, dia e valor no sensor da sala, simula a distribuição para aquele momento nas várias configurações de estores. De seguida, verifica se todos os pontos destas se encontram dentro dos limites. Os limites escolhidos foram 200 lux para o mínimo e 2000 para o máximo. A partir daqui ele escolhe a 1ª (na ordem c1,c3,c4,c2) configuração que verifica os critérios. Se nenhuma verificar, então escolhe a última que ainda verifique o limite máximo de 2000. Após isto, caso haja, segundo a distribuição simulada, algum ponto, da metade mais perto da porta que

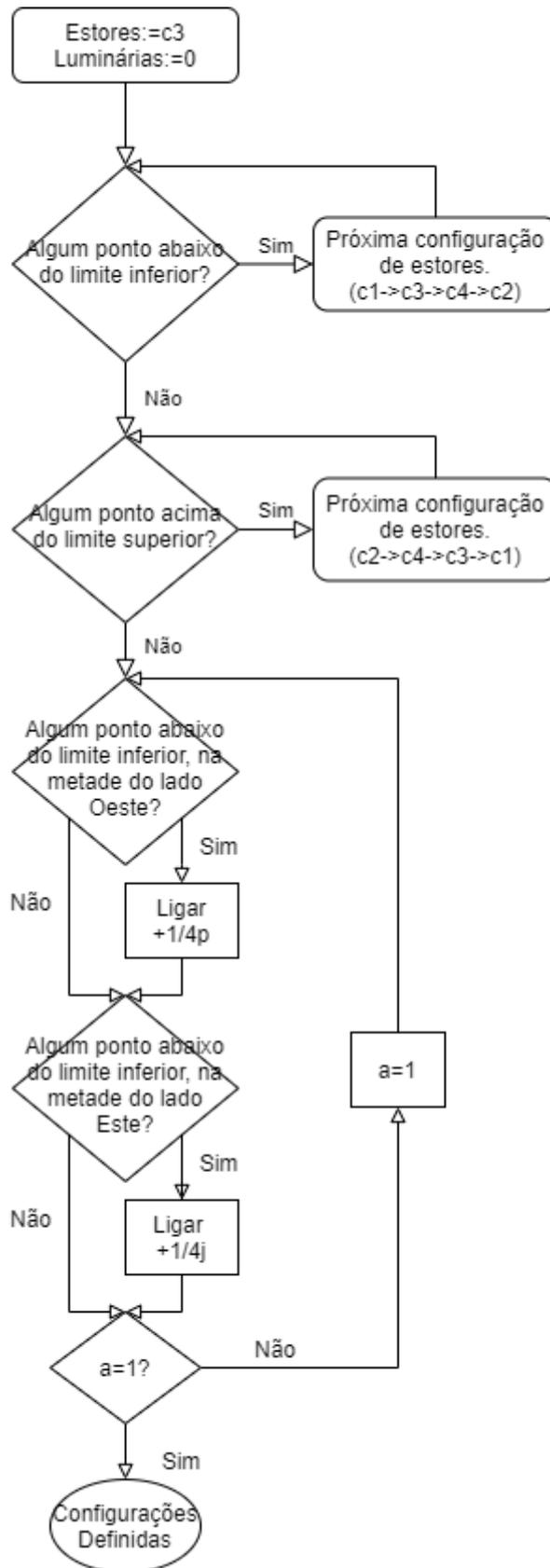


Figura 3.14: Fluxograma da escolha da configuração

3.2 Limitações

Devido à posição em que o sensor da sala está, assim como pelo facto de estar parcialmente coberto, a informação que de lá advém não é tão útil como poderia ser. As variações no mesmo não são grandes e consistentes o suficiente para fazer premissas ou cálculos com essa informação de forma precisa. Embora, no geral, o sensor indique um valor maior em alturas do dia de maior luz, como dá para ver na figura 3.15. Para verificar como os resultados não são muito consistentes ou proporcionais foi feito um pequeno teste em que se comparou os valores retirados do sensor, com valores lidos pelo sensor manual, na mesma posição, em várias situações, algumas delas com uma lanterna a apontar para o mesmo (tabela 3.3). Existe também um nível muito elevado de ruído no sensor para os valores mais baixos de iluminância, que correspondem às horas sem luz natural. Por aí também se consegue-se fazer uma proposição do nascer e por do sol, por observação do gráfico, que coincidem com as horas previstas de 06:37 para o nascer do sol e 18:51 para o ocaso do sol (valores retirados de nav.pt - Navegação Aérea de Portugal). Dito isto, como, no geral, o valor apontado pelo sensor, está efetivamente relacionado com a iluminância existente, então o mesmo será usado para os ajustes em tempo real que serão feitos às simulações da luz natural.

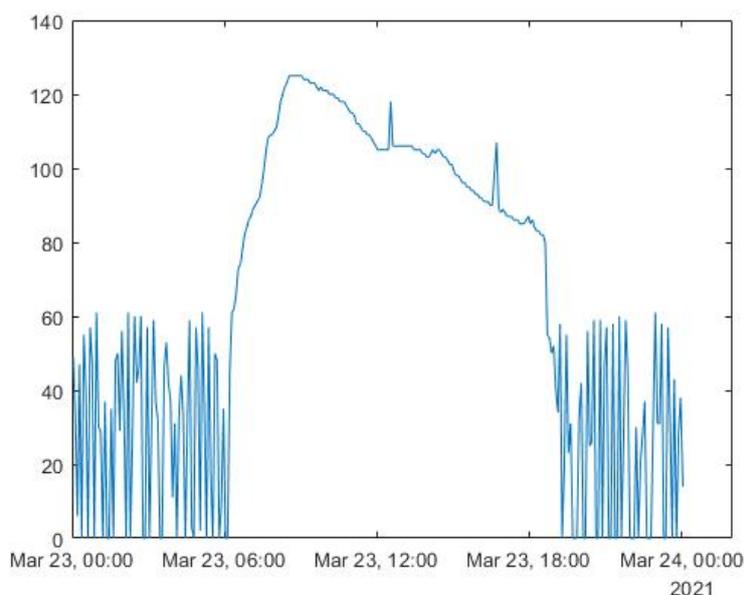


Figura 3.15: Exemplo dos valores(não em lux) do sensor de iluminância da sala ao longo de um dia

Tabela 3.3: Teste do sensor

Sensor de mão (lux)	50	1100	20	780	5	600
Sensor da sala	80	79	71	71	58	62

Capítulo 4

Resultados

4.1 Validação das Simulações

Para se avaliar a precisão das simulações feitas em Dialux e EnergyPlus comparou-se os resultados previstos pelas simulações para vários casos diferentes, e, para esta avaliação, mais do que ver quão grandes em termos absolutos ou relativos são as diferenças entre os resultados, têm de se comparar quão distantes estão os resultados simulados e experimentais na escala de conforto visual. Uma vez mais, o conforto visual é muito subjetivo, ainda assim o intervalo tipicamente preferido é de 300-2000 lux ([76]), sendo que valores mais baixos tendem a ser aceites ou preferidos quando existe o uso de computadores ([77], [78]). Isto é, para efeitos de como serão utilizados estes valores, o importante é se tanto a previsão como a medição real ficam dentro, abaixo ou acima do intervalo de conforto. Por exemplo, se o valor medido numa situação for de 50 lux e a previsão for de 150 lux, então, apesar de ser um erro relativo de 200%, estão ambos abaixo do que se considera confortável, e portanto é um bom resultado. O mesmo se aplica caso, por exemplo, o valor real for 4000 lux e o valor previsto for de 8000 lux.

4.1.1 Dialux

Na tabela 4.1 estão as comparações entre as medidas tiradas na sala, nos 6 pontos mencionados anteriormente e representados na figura 4.1, em 4 casos com configurações de luzes diferentes e estores fechados, e os valores previstos utilizando os resultados do Dialux para os mesmos casos. Olhando para os resultados, existem alguns casos em que o erro ultrapassou os 200 lux e 2 pontos em que o Dialux preveu a iluminância estar acima de 200 lux quando a medida estava abaixo, o que pode ser um problema, caso o controlo ache correto fechar todos os estores e ligar luzes nalguma situação, mas tal é muito pouco provável de vir a acontecer e de vir a afetar o sucesso do controlo. Para além disso, nos pontos junto à janela (1, 3 e 5) nota-se ter havido uma subestimação geral por parte do Dialux, o que também já era esperado porque nessas zonas, quando foram medidos os valores reais havia alguma luz proveniente da janela que passava entre os estores. Dito isto, os resultados são satisfatórios, isto é, a maior parte dos erros está próxima dos 100 lux e essas diferenças não são bem

notáveis pelo olho humano, portanto, a utilização do Dialux está validada.

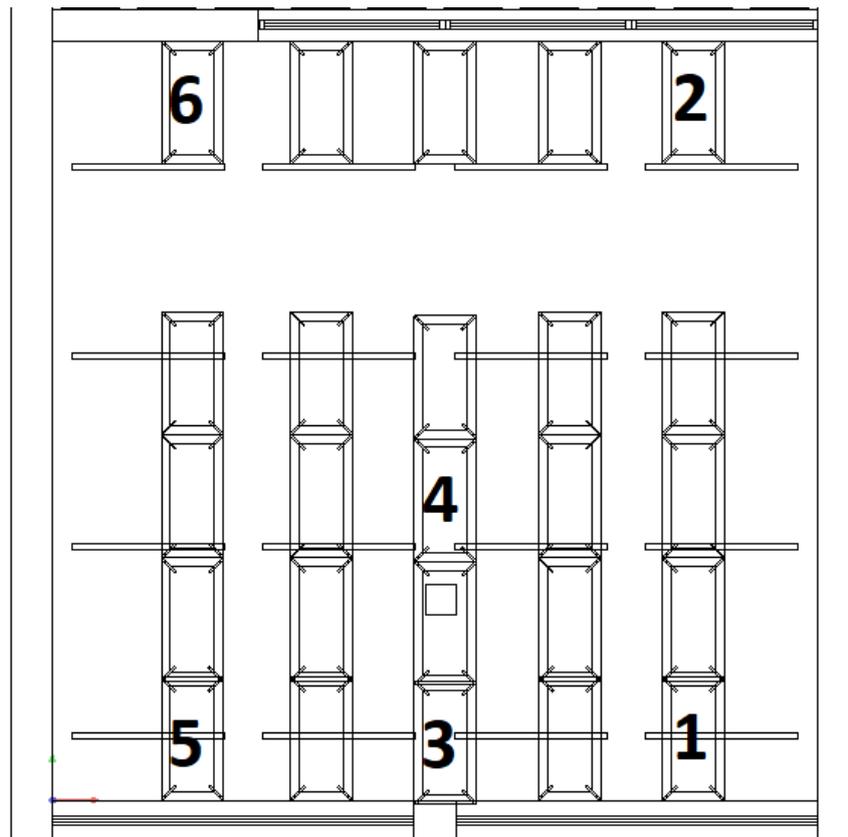


Figura 4.1: Pontos de medição na sala para testes

Tabela 4.1: Teste dos Resultados do Dialux, valores em lux

Ponto	Dialux	Medida	Erro
2/4			
1	265	535	270
2	250	240	10
3	467	540	73
4	564	600	36
5	332	500	168
6	336	360	24
1/4p			
1	41	189	148
2	192	279	87
3	61	206	145
4	295	220	75
5	44	189	145
6	281	330	49

Ponto	Dialux	Medida	Erro
2/4p			
1	82	120	38
2	384	330	54
3	122	120	2
4	590	400	190
5	88	120	32
6	562	330	232
2/4j+1/4p			
1	489	582	97
2	308	270	38
3	873	580	297
4	833	720	113
5	620	580	40
6	391	270	121

4.1.2 EnergyPlus

Para validar as previsões feitas pelo EnergyPlus, foram feitos testes como para o Dialux, nas 4 configurações utilizadas, ao longo de um dia. Os resultados estão na tabela 4.2. Olhando para os resultados, pode-se dizer que as previsões têm, no geral, um erro aceitável tendo em conta como serão

usadas. No entanto, é possível notar alguns erros frequentes. Nomeadamente, as previsões para a posição c3 durante o período da manhã, e para a posição c4 durante o período da tarde. Isto acontece pois, o momento em que foram medidos os valores que foram usados para obter o fator f foi, muito provavelmente um momento com particularmente baixa radiação.

Tabela 4.2: Resultados do teste às previsões de EnergyPlus

		Medição						Previsão					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
09:00	c1	640	100	640	280	520	75	156	52	185	127	213	52
	c2	5200	180	4300	980	3500	90	12105	263	13749	792	20046	233
	c3	1740	460	1840	1600	1550	380	51	9	62	16	62	9
	c4	1100	90	1200	520	1300	80	1215	144	1519	430	1681	144
10:00	c1	220	30	270	130	250	60	256	87	326	204	355	87
	c2	50000	800	50000	3400	50000	600	10090	525	8712	1220	14520	496
	c3	1400	250	1700	1200	1850	200	88	14	107	31	107	14
	c4	4600	460	4000	1700	4100	350	2674	259	3322	829	3686	259
11:00	c1	170	25	130	65	105	15	177	58	224	148	236	58
	c2	11000	260	10000	1440	20000	320	77834	489	10644	1177	39564	459
	c3	325	75	310	330	470	50	59	10	73	20	71	10
	c4	1950	105	1870	490	2000	85	2272	291	2784	822	3050	291
12:00	c1	325	40	300	130	255	30	131	29	170	118	183	29
	c2	11600	350	9900	1550	9100	260	8420	391	4247	1429	1009	374
	c3	330	80	360	390	400	70	291	75	342	346	342	75
	c4	1560	100	1630	500	2200	85	901	135	1105	580	1207	135
13:00	c1	270	40	330	140	275	25	115	32	144	104	158	32
	c2	6500	230	6300	1340	5600	170	2668	191	2523	721	580	180
	c3	500	125	610	600	800	120	224	64	280	235	280	64
	c4	2360	150	2420	670	2530	110	470	71	591	312	636	71
14:00	c1	175	25	185	75	127	30	59	21	74	45	81	21
	c2	5700	240	6000	940	5800	190	2655	204	2366	675	2525	191
	c3	460	105	490	420	610	85	163	76	191	192	191	76
	c4	1600	105	1600	450	1780	90	344	190	426	227	467	190
15:00	c1	100	15	105	50	115	15	64	20	71	43	78	20
	c2	6200	260	6550	1120	5100	210	2714	212	2634	720	2866	195
	c3	435	90	440	360	380	70	158	86	198	207	198	86
	c4	1250	130	1300	460	1520	100	381	209	462	244	503	209
16:00	c1	90	10	90	40	80	10	49	20	63	43	70	20
	c2	3000	150	2950	630	2730	100	1215	151	1329	495	1492	140
	c3	230	60	240	260	240	40	133	68	157	152	157	68
	c4	1230	90	1300	380	1365	80	280	164	346	184	373	164
17:00	c1	90	10	85	40	80	10	48	19	62	42	69	19
	c2	5100	190	5200	910	4800	110	1040	154	1206	491	1397	143
	c3	230	60	230	295	230	40	131	67	155	150	155	67
	c4	1120	90	1180	370	1250	70	277	162	329	182	369	162

4.2 Algoritmos de Controlo

4.2.1 Algoritmo de Comando

Para testar o algoritmo de comando foi feito um teste durante um dia, das 8:30 até às 18:00, com respostas sobre que configuração de estores/luminárias deve ser executada de 30 em 30 minutos. Os resultados estão na tabela 4.3, em que "Valor no sensor" representa o valor que o sensor apresentava

Tabela 4.3: Resultados do controlo por comando

Hora (UTC+1)	Valor no sensor	Resposta	Temperatura	1	2	3	4	5	6
08:30	119	c3+1/4p	20.5	1710	830	1760	3300	1680	760
09:00	95	c4+1/4p	21.4	1140	280	1260	820	1340	360
09:29	96	c1+2/4	21.7	470	280	680	660	530	360
10:00	89	c1+2/4	21.6	490	280	740	690	580	400
10:30	86	c1+2/4	22.3	490	280	740	690	580	400
11:00	96	c4+1/4p	22.1	1990	300	1930	790	2040	370
11:30	102	c4+1/4p	22.5	2570	340	2400	930	2540	420
12:00	92	c4+1/4p	22.3	3140	390	2860	1070	3040	470
12:30	94	c4+1/4p	22.6	1500	250	1500	670	1650	350
13:00	95	c4+1/4p	22.5	1520	400	1500	620	1500	300
13:30	97	c4+1/4p	22.5	1750	300	1650	730	1640	380
14:00	97	c4+1/4p	22.5	800	430	960	600	1100	290
14:30	101	c4+1/4p	22.5	830	400	950	550	1000	280
15:00	96	c4+1/4p	22.6	750	380	830	480	830	230
15:30	91	c4+1/4p	22.6	1050	300	1150	600	1200	340
16:00	91	c4+1/4p	22.5	800	400	900	500	960	230
16:30	94	c4+1/4p	22.5	880	230	880	500	890	320
17:00	90	c4+1/4p	22.4	400	240	430	390	400	330
17:30	89	c4+1/4p	22.4	430	275	485	370	410	300
18:00	86	c2+1/4p	22.3	430	570	460	690	420	500

no respetivo momento, antes de ser executada a ação de controlo. "Resposta" é a configuração que o algoritmo pede para ser executada, e abaixo de cada número, correspondente mais uma vez aos pontos de medição, encontra-se a iluminância medida no plano de trabalho nesse ponto, após ser executada a "Resposta" pedida pelo algoritmo. "Temperatura" refere-se à temperatura no interior da sala em graus Celsius.

Os resultados do algoritmo de comando são bastante positivos, já que em todos os momentos a opção apresentada se traduziu em conforto. Para além disso, as opções definidas pelo mesmo, para este dia, foram quase sempre a melhor opção. O único momento em que se pode dizer que isto não se verificou foi às 8:30, onde se verificou que existia alguma luz direta nos olhos, para quem estivesse sentado em alguns dos lugares do centro. Algo que apenas não se verificaria caso os estores estivessem na posição c1.

4.2.2 Controlo Preditivo

Para testar o controlo por previsão foi feito um teste durante o mesmo dia que o controlo por comando, para obter respostas sobre que configuração de estores/luminárias deve ser executada de 30 em 30 minutos. Os resultados estão na tabela 4.4. Olhando para os resultados pode-se afirmar que os mesmos foram em parte similares aos obtidos pelo algoritmo de comando, especialmente durante o período da tarde, onde a opção escolhida foi sempre a mesma em ambos os métodos. No entanto, estes resultados não podem ser considerados tão benéficos, já que, durante a manhã, especialmente entre as 9:30 e 10:30, a opção definida não foi uma que resultasse em conforto para os utilizadores.

Tabela 4.4: Resultados do teste do controlo Preditivo

Hora (UTC+1)	Valor no sensor	Resposta	Temperatura	1	2	3	4	5	6
08:30	119	c1	20.5	700	200	700	315	90	400
09:00	95	c1	21.4	640	100	640	280	520	75
09:29	96	c2+1/4p	21.7	3000	220	3000	670	2500	330
10:00	89	c2+1/4p	21.6	50000	800	50000	3400	50000	600
10:30	86	c2+1/4p	22.3	4600	460	4000	1700	4100	350
11:00	96	c1	22.1	520	70	570	230	70	520
11:30	102	c1+2/4	22.5	740	260	900	1000	760	400
12:00	92	c2+1/4p	22.3	5000	520	4650	1390	3650	310
12:30	94	c4+1/4p	22.6	1500	250	1500	670	1650	350
13:00	95	c4+1/4p	22.5	1520	400	1500	620	1500	300
13:30	97	c4+1/4p	22.5	1750	300	1650	730	1640	380
14:00	97	c4+1/4p	22.5	800	430	960	600	1100	290
14:30	101	c4+1/4p	22.5	830	400	950	550	1000	280
15:00	96	c4+1/4p	22.6	750	380	830	480	830	230
15:30	91	c4+1/4p	22.6	1050	300	1150	600	1200	340
16:00	91	c4+1/4p	22.5	800	400	900	500	960	230
16:30	94	c4+1/4p	22.5	880	230	880	500	890	320
17:00	90	c4+1/4p	22.4	400	240	430	390	400	330
17:30	89	c4+1/4p	22.4	430	275	485	370	410	300
18:00	86	c4+1/4p	22.3	390	380	400	390	380	220

Para o período do teste, o consumo estimado de energia seria de 0.92 kWh e 0.72 kWh para o algoritmo de comando e controlo por previsão, respetivamente.

$$E_{comando} = (8.5h \times 4 \text{ lâmpadas} + 1.5h \times 8 \text{ lâmpadas}) \times 20W = 0.92kWh$$

$$E_{preditivo} = (8h \times 4 \text{ lâmpadas} + 0.5h \times 8 \text{ lâmpadas}) \times 20W = 0.72kWh$$

No geral, os resultados de ambos os métodos podem ser considerados positivos na medida em que se traduzem em poupanças a nível energético, pois os valores estimados estão abaixo do consumo diário habitual da sala que ronda os 1.2 kWh (proveniente de medições diretas do consumo elétrico da sala), que representaria uma poupança no consumo associado a iluminação a rondar os 22 e os 40%, respetivamente. Estes resultados estão alinhados com o que foi obtido por trabalhos semelhantes, mencionados em 2.3, que obtiveram poupanças estimadas entre os 11 e 60%

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Resultados

No final, pode-se dizer que o objetivo principal foi conseguido. Dois algoritmos para automatizar a iluminação na sala foram desenvolvidos e testados. Um deles recorre apenas a informação disponível no conjunto de sensores disponíveis na sala e a um sistema de regras baseado na hora do dia. O outro recorre a simulações feitas em software específico para tentar prever a distribuição de iluminância no plano de trabalho, e com esta informação tentar ser mais preciso no controlo da iluminação. Ambos obtiveram resultados que se podem considerar favoráveis do ponto de vista da redução do consumo energético, com poupanças previstas de aproximadamente 22 e 40% para cada um dos algoritmos, respetivamente. No entanto, o facto do algoritmo por previsão não assegurar conforto durante a manhã é um problema grave que não o torna uma opção segura. Para além disso, por ser necessário para a forma de controlo preditivo apresentada, foram feitas simulações em EnergyPlus e Dialux para prever a distribuição da iluminância no plano de trabalho, donde se pode concluir que estes softwares são indicados e podem ser usados neste tipo de projetos, sendo que a sua precisão depende, naturalmente, da quantidade de informação que se tem sobre o sistema e o grau de exatidão com que são feitas. No geral, pode se dizer que a opção mais simples, do algoritmo de comando, é a melhor entre as duas, já que garantiu sempre o conforto nos testes feitos, e por ser de programação mais simples pode evitar problemas no futuro, dependendo da forma como é implementado.

5.2 Trabalho Futuro

Com isto que foi alcançado, uma das coisas a fazer seria implementar um dos algoritmos no Raspberry Pi da sala que controla os estores e que tira os valores do sensor para que o controle seja realmente automático. Isto, no entanto, também requer que seja feita a ligação entre as luminárias e o mesmo, ou outro, Raspberry Pi para que funcione tudo de forma junta. No entanto, existem vários pormenores que não foram aqui tidos em conta, ou abordagens diferentes que podem ser vantajosas e estudadas. Uma delas seria a criação de algo como um mapa das sombras existentes na sala, para se

caracterizar melhor as diferenças de luz pela sala, e compreender a existência de luz direta incidente nos utilizadores. Será possivelmente importante dar uso da informação disponível na estação meteorológica, juntamente com a dos sensores existentes na sala para se prever e/ou controlar a iluminância ou outros aspetos da sala. No entanto, já que a esta informação pode não estar frequentemente disponível seria também de interesse procurar uma forma de predição solar a curto prazo. Caso seja implementado algum tipo de automação na sala é interessante considerar a ocupação da mesma. Isto pode ser feito com uso do horário da mesma disponível no sistema *Fenix*, ou através de uma outra forma de deteção de pessoas em tempo real. Para além disso, a aplicabilidade deste trabalho não se restringe à sala sobre o qual incidiu, mas também às outras salas do edifício, especialmente aquelas que partilham esta fachada. Sendo que apenas pequenos ajustes podem ser necessários. Para as salas do lado Oeste, utilizar exatamente o mesmo algoritmo não é recomendado, visto que o Sol possui uma trajetória inversa, mas a mesma abordagem pode ser tida. Como já foi mencionado, o conforto não depende apenas da iluminância, mas também de outras características. Destas, é importante mencionar a temperatura, já que tende a ser muito frequente a necessidade do controlo da mesma, e porque o controlo térmico é, por regra geral, mais dispendioso energeticamente do que a iluminação, apesar desta sala não possuir sistema de AVAC. Para todos os efeitos, caso seja feito algum tipo de controlo térmico, então deve ser integrado num sistema de controlo do edifício por completo, já que, ao contrário da iluminação, a temperatura no interior da sala influencia a temperatura dos arredores da mesma. Caso seja esta a abordagem a tomar torna-se ainda mais interessante a possibilidade do processamento integrado desta informação, de forma a interligar a informação de cada sala e a seleção de uma opção de controlo integrada.

Bibliografia

- [1] U. Berardi. Building energy consumption in us, eu, and bric countries. *Procedia Engineering*, 118: 128 – 136, 2015. ISSN 1877-7058. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.411>. Defining the future of sustainability and resilience in design, engineering and construction.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3):394 – 398, 2008. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
- [3] O. Masoso and L. Grobler. The dark side of occupants' behaviour on building energy use. *Energy and Buildings*, 42(2):173 – 177, 2010. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.009>.
- [4] J. A. Roberson, C. A. Webber, M. C. McWhinney, R. E. Brown, M. J. Pinckard, and J. F. Busch. After-hours power status of office equipment and energy use of miscellaneous plug-load equipment. 5 2004. doi: 10.2172/824857.
- [5] J. Rovamo, A. Raninen, and K. Donner. The effects of temporal noise and retinal illuminance on foveal flicker sensitivity. *Vision Research*, 39(3):533 – 550, 1999. ISSN 0042-6989. doi: [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(98\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00120-5).
- [6] J. Rovamo, J. Mustonen, and R. Näsänen. Modelling contrast sensitivity as a function of retinal illuminance and grating area. *Vision Research*, 34(10):1301 – 1314, 1994. ISSN 0042-6989. doi: [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90204-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90204-6).
- [7] C. Waddington and J. Kofman. Analysis of measurement sensitivity to illuminance and fringe-pattern gray levels for fringe-pattern projection adaptive to ambient lighting. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(2):251 – 256, 2010. ISSN 0143-8166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.07.001>. Fringe Projection Techniques.
- [8] R. P. Najjar, C. Chiquet, P. Teikari, P.-L. Cornut, B. Claustrat, P. Denis, H. M. Cooper, and C. Gronfier. Aging of non-visual spectral sensitivity to light in humans: Compensatory mechanisms? *PLOS ONE*, 9(1):1–10, 01 2014. doi: 10.1371/journal.pone.0085837.
- [9] K. T. . B. D. Schnapf, J. Spectral sensitivity of human cone photoreceptors. 1986. doi: 10.1038/325439a0.

- [10] E. J. Patterson, G. Bargary, and J. L. Barbur. Understanding disability glare: light scatter and retinal illuminance as predictors of sensitivity to contrast. *J. Opt. Soc. Am. A*, 32(4):576–585, Apr 2015. doi: 10.1364/JOSAA.32.000576.
- [11] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra. Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(4):2047–2077, 2015. doi: 10.1109/COMST.2015.2476474.
- [12] C. E. Becker. The new ieee standard 739: Energy conservation and cost effective planning in industrial facilities. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-21(2):464–468, 1985. doi: 10.1109/TIA.1985.349668.
- [13] Á. Borbély, Á. Sámson, and J. Schanda. The concept of correlated colour temperature revisited. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur*, 26(6):450–457, 2001.
- [14] Q. Wang, H. Xu, F. Zhang, and Z. Wang. Influence of color temperature on comfort and preference for led indoor lighting. *Optik*, 129:21 – 29, 2017. ISSN 0030-4026. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.10.049>.
- [15] W. Yang and J. Y. Jeon. Effects of correlated colour temperature of led light on visual sensation, perception, and cognitive performance in a classroom lighting environment. *Sustainability*, 12(10), 2020. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su12104051.
- [16] B. Shamsul, C. Sia, Y. Ng, and K. Karmegan. Effects of light's colour temperatures on visual comfort level, task performances, and alertness among students. *American Journal of Public Health Research*, 1(7):159–165, 2013. ISSN 2327-6703. doi: 10.12691/ajphr-1-7-3.
- [17] M. T. E. L. S. Pulay, A.; Read. Examining student behavior under two correlated color temperature levels of lighting in an elementary school classroom. 2018.
- [18] R.-H. Huang, L. Lee, Y.-A. Chiu, and Y. Sun. Effects of correlated color temperature on focused and sustained attention under white led desk lighting. *Color Research & Application*, 40(3):281–286, 2015. doi: <https://doi.org/10.1002/col.21885>.
- [19] P. F. Boray, R. Gifford, and L. Rosenblood. Effects of warm white, cool white and full-spectrum fluorescent lighting on simple cognitive performance, mood and ratings of others. *Journal of Environmental Psychology*, 9(4):297 – 307, 1989. ISSN 0272-4944. doi: [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(89\)80011-8](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(89)80011-8).
- [20] H. B. Gunay, W. O'Brien, I. Beausoleil-Morrison, and S. Gilani. Development and implementation of an adaptive lighting and blinds control algorithm. *Building and Environment*, 113:185 – 199, 2017.

ISSN 0360-1323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.027>. Advances in daylighting and visual comfort research.

- [21] C. Reinhart and K. Voss. Monitoring manual control of electric lighting and blinds. *Lighting Research & Technology*, 35(3):243–258, 2003. doi: 10.1191/1365782803li064oa.
- [22] D. Hunt. The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy. *Building and Environment*, 14(1):21 – 33, 1979. ISSN 0360-1323. doi: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(79\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0360-1323(79)90025-8).
- [23] J. Love. Manual switching patterns in private offices. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 30(1):45–50, 1998. doi: 10.1177/096032719803000107.
- [24] A. Rubin, B. Collins, and R. Tibbott. Window blinds as a potential energy saver: a case study. building science series (final). [effects of building orientation]. 1978.
- [25] G. Y. Yun, H. Kim, and J. T. Kim. Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption. *Energy and Buildings*, 46:152 – 158, 2012. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.034>. Sustainable and healthy buildings.
- [26] L. Kumar, A. Skidmore, and E. Knowles. Modelling topographic variation in solar radiation in a gis environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11:475–497, 07 1997. doi: 10.1080/136588197242266.
- [27] M. Pinto, R. Almeida, P. Pinho, and L. Lemos. Characterization of lighting in classrooms of viseu city schools. 11 2013.
- [28] M. Pinto, R. Almeida, P. Pinho, L. Lemos, and A. Santos. Daylighting in classrooms - the daylight factor as a performance criterion. 09 2014. doi: 10.13140/RG.2.1.3501.4563.
- [29] M. Wei, K. Houser, A. David, and M. Krames. Perceptual responses to led illumination with colour rendering indices of 85 and 97. *Lighting Research & Technology*, 47(7):810–827, 2015. doi: 10.1177/1477153514548089.
- [30] W. A. Thornton. Luminosity and color-rendering capability of white light. *J. Opt. Soc. Am.*, 61(9): 1155–1163, Sep 1971. doi: 10.1364/JOSA.61.001155.
- [31] J. Kowalska and I. Fryc. Colour rendition quality of typical fluorescent lamps determined by cie colour fidelity index and colour rendering index. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, 07 2019. doi: 10.15199/48.2019.07.20.
- [32] W. Davis and Y. Ohno. Toward an improved color rendering metric. In *fifth international Conference on Solid State lighting*, volume 5941, page 59411G. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [33] P. Bodrogi, P. Csuti, P. Hotvath, and J. Schanda. Why does the cie colour rendering index fail for white rgb led light sources. 2004.

- [34] N. Sándor and J. Schanda. Visual colour rendering based on colour difference evaluations. *Lighting Research & Technology*, 38(3):225–239, 2006.
- [35] Ledil catalogue, optics 101.
- [36] E. Hecht, editor. *Optics*. Addison-Wesley, 2001.
- [37] R. Lakshmanan, A. K. Ramasamy, S. K. Ahmed, and R. Sinnadurai. Efficient illumination design and energy saving through occupancy control for building. In *2013 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (CSUDET)*, pages 80–85. IEEE, 2013.
- [38] J. Pereira, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, and M. Almeida. Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making. *Energy and Buildings*, 198:431 – 443, 2019. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.003>.
- [39] M. A. G. Maureira, D. Oldenhof, and L. Teernstra. Thingspeak—an api and web service for the internet of things. *World Wide Web*, 2011.
- [40] A. Carranza, S. Zaidi, C. DeCusatis, H. Carranza, and D. Moonasar. Home automation with arduino for the internet of things (iot).
- [41] E. B. Ilyas, M. Fischer, T. Iggena, and R. Tönjes. Virtual sensor creation to replace faulty sensors using automated machine learning techniques. In *2020 Global Internet of Things Summit (GloTS)*, pages 1–6, 2020. doi: 10.1109/GIOTS49054.2020.9119681.
- [42] J. H. K. Yujie Wu and J.-L. Scartezzini. Characterization of a quasi-real-time lighting computing system based on hdr imaging. *Energy Procedia*, 122:649 – 654, 2017. ISSN 1876-6102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.364>. CISBAT 2017 International Conference Future Buildings Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale.
- [43] C. Humann and A. McNeil. Using hdr sky luminance maps to improve accuracy of virtual work plane illuminance sensors. 2017.
- [44] M. Drakoulelis, G. Filios, V. Georgopoulos Ninos, I. Katsidimas, and S. Nikolettseas. Virtual light sensors in industrial environment based on machine learning algorithms. In *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pages 709–716, 2019. doi: 10.1109/DCOSS.2019.00126.
- [45] F. C. Sangogboye, K. Arendt, A. Singh, C. T. Veje, M. B. Kjærgaard, and B. N. Jørgensen. Performance comparison of occupancy count estimation and prediction with common versus dedicated sensors for building model predictive control. In *Building Simulation*, volume 10, pages 829–843. Springer, 2017.
- [46] D. Sturzenegger, D. Gyalistras, M. Morari, and R. S. Smith. Model predictive climate control of a swiss office building: Implementation, results, and cost–benefit analysis. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(1):1–12, 2016. doi: 10.1109/TCST.2015.2415411.

- [47] S. Matta and S. M. Mahmud. An intelligent light control system for power saving. In *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 3316–3321, 2010. doi: 10.1109/IECON.2010.5675331.
- [48] C. de Bakker, M. Aries, H. Kort, and A. Rosemann. Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review. *Building and Environment*, 112:308 – 321, 2017. ISSN 0360-1323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.042>.
- [49] L. Xu, W. Kim, and Y. Kim. Energy performance of dimmable fluorescent lamps in the integrated daylighting control system in cold climate. In *6th Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning, ACRA 2012*, pages 694–701. Chinese Association of Refrigeration (CAR), Jan. 2012. ISBN 9781632660152. 6th Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning, ACRA 2012 ; Conference date: 26-08-2012 Through 28-08-2012.
- [50] D. Suszanowicz. Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems. In *E3S Web of Conferences*, volume 19, page 01024. EDP Sciences, 2017.
- [51] F. Oldewurtel, D. Sturzenegger, and M. Morari. Importance of occupancy information for building climate control. *Applied Energy*, 101:521 – 532, 2013. ISSN 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.014>. Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.
- [52] M. W. M. Z. J. Z. S. B. J. S. Z. Z. D. K. K. K. K. A.S. Lamano, S. Yang. Energy performance of an integrated automated blinds and dimmable lighting system with model-predictive control (mpc). In *COBEE2018 - 4th International Conference On Building Energy, Environment*, pages 487–174, 2018.
- [53] B. Roisin, M. Bodart, A. Deneyer, and P. D'Herdt. Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. *Energy and Buildings*, 40(4):514 – 523, 2008. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.006>.
- [54] R. Yang and L. Wang. Multi-zone building energy management using intelligent control and optimization. *Sustainable Cities and Society*, 6:16–21, 2013. ISSN 2210-6707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.07.001>.
- [55] P. Strachan. Esp-r: Summary of validation studies. *Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Scotland, UK*, 2000.
- [56] C. F. Reinhart and S. Herkel. The simulation of annual daylight illuminance distributions — a state-of-the-art comparison of six radiance-based methods. *Energy and Buildings*, 32(2):167 – 187, 2000. ISSN 0378-7788. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00042-6).
- [57] B. A. Lomanowski and J. L. Wright. The complex fenestration construction: a practical approach for modelling windows with shading devices in esp-r. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(3):185–198, 2012. doi: 10.1080/19401493.2011.552735.

- [58] X. Yu, Y. Su, and X. Chen. Application of relux simulation to investigate energy saving potential from daylighting in a new educational building in uk. *Energy and Buildings*, 74:191 – 202, 2014. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.024>.
- [59] S. H. Shikder, A. Price, and M. Mourshed. Evaluation of four artificial lighting simulation tools with virtual building reference. 2009.
- [60] A. A. Baloch, P. H. Shaikh, F. Shaikh, Z. H. Leghari, N. H. Mirjat, and M. A. Uqaili. Simulation tools application for artificial lighting in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:3007 – 3026, 2018. ISSN 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.035>.
- [61] P. K. Soori and M. Vishwas. Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design. *Energy and Buildings*, 66:329 – 337, 2013. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.039>.
- [62] W. Bustamante, D. Uribe, S. Vera, and G. Molina. An integrated thermal and lighting simulation tool to support the design process of complex fenestration systems for office buildings. *Applied Energy*, 198:36 – 48, 2017. ISSN 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.046>.
- [63] W. Kim, Y. Jeon, and Y. Kim. Simulation-based optimization of an integrated daylighting and hvac system using the design of experiments method. *Applied Energy*, 162:666 – 674, 2016. ISSN 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.153>.
- [64] H. Teixeira, M. G. Gomes, A. Moret Rodrigues, and J. Pereira. Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films. *Building and Environment*, 168:106474, 2020. ISSN 0360-1323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106474>.
- [65] M. G. Gomes, A. M. Rodrigues, and J. A. Bogas. Numerical and experimental study of the optical properties of venetian blinds. *Journal of Building Physics*, 36(1):7–34, 2012. doi: 10.1177/1744259112444022.
- [66] R. A. Mangkuto. Validation of dialux 4.12 and dialux evo 4.1 against the analytical test cases of cie 171:2006. *LEUKOS*, 12(3):139–150, 2016. doi: 10.1080/15502724.2015.1061438.
- [67] M. A. Kamaruddin, Y. Z. Arief, and M. H. Ahmad. Energy analysis of efficient lighting system design for lecturing room using dialux evo 3. In *Progress in Energy and Thermal Sciences*, volume 818 of *Applied Mechanics and Materials*, pages 174–178. Trans Tech Publications Ltd, 2 2016. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.818.174.
- [68] A. H. Fakra, H. Boyer, and F. Maamari. Experimental validation for software DIALUX: application in CIE test Cases for building daylighting simulation. In *International Conference on Building Energy and Environment (COBEE 2008)*, Dalian, China, July 2008.
- [69] A. F. C. Vizeu da Silva, A. O. Godinho, C. I. F. Agreira, and M. M. Travassos Valdez. An educational approach to a lighting design simulation using dialux evo software. In *2016 51st International*

- Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–6, 2016. doi: 10.1109/UPEC.2016.8114127.
- [70] I. P. C. F. Oom. Gestão colaborativa da iluminação e climatização. Master's thesis, Técnico Lisboa, 2017.
- [71] R. T. E. Assis. Model based predictive control for thermal comfort maximization in classrooms. Master's thesis, Técnico Lisboa, 2019.
- [72] J. P. P. Martins. Optimized management of lighting conditions in spaces with multiple users. Master's thesis, Técnico Lisboa, 2017.
- [73] B. N. Salvador. Metodologia integrada de gestão de iluminação em edifícios de serviços aplicada aos edifícios do campus do ist. Master's thesis, Técnico Lisboa, 2015.
- [74] N. Queiroz, F. S. Westphal, and F. O. Ruttkay Pereira. A performance-based design validation study on energyplus for daylighting analysis. *Building and Environment*, 183:107088, 2020. ISSN 0360-1323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107088>.
- [75] G. Ramos and E. Ghisi. Analysis of daylight calculated using the energyplus programme. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7):1948 – 1958, 2010. ISSN 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.040>.
- [76] Y. Bian and T. Luo. Investigation of visual comfort metrics from subjective responses in china: A study in offices with daylight. *Building and Environment*, 123:661–671, 2017. ISSN 0360-1323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.035>.
- [77] M. Schüler. Building simulation in application developing concepts for low energy buildings through a co-operation between architect and engineer integral interdisciplinary planning of buildings-a fairy tale or practicable? an experience report of 3 years of application in around 30 projects.
- [78] J. Y. Suk. Luminance and vertical eye illuminance thresholds for occupants' visual comfort in daylight office environments. *Building and Environment*, 148:107–115, 2019.
- [79] A. J. K. Phillips, P. Vidafar, A. C. Burns, E. M. McGlashan, C. Anderson, S. M. W. Rajaratnam, S. W. Lockley, and S. W. Cain. High sensitivity and interindividual variability in the response of the human circadian system to evening light. *PNAS*, 116(24):12019–12024, 2019. doi: 10.1073/pnas.1901824116.
- [80] E. Guerry, C. D. Gălăţanu, L. Canale, and G. Zissis. Optimizing the luminous environment using dialux software at “constantin and elena” elderly house – study case. *Procedia Manufacturing*, 32:466 – 473, 2019. ISSN 2351-9789. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.241>. 12th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2018, 4–5 October 2018, Tirgu Mures, Romania.
- [81] S. Kozák and A. Pytel. Mpc controller as a service in iot architecture. In *2018 Cybernetics Informatics (KI)*, pages 1–6, 2018. doi: 10.1109/CYBERI.2018.8337550.

- [82] M. Schuß, R. Zach, K. Orehounig, and A. Mahdavi. Empirical evaluation of a predictive simulation-based control method. 2011.
- [83] D. Kyriazis, T. Varvarigou, D. White, A. Rossi, and J. Cooper. Sustainable smart city iot applications: Heat and electricity management eco-conscious cruise control for public transportation. In *2013 IEEE 14th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*, pages 1–5, 2013. doi: 10.1109/WoWMoM.2013.6583500.
- [84] M. Janak. Coupling building energy and lighting simulation. In *Proc. Building Simulation*, volume 2, pages 313–319, 1997.
- [85] S. A. Kalogirou. Chapter 2 - environmental characteristics. In S. A. Kalogirou, editor, *Solar Energy Engineering (Second Edition)*, pages 51–123. Academic Press, Boston, second edition edition, 2014. ISBN 978-0-12-397270-5. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397270-5.00002-9>.
- [86] M. S. Rana, H. Pota, and I. Petersen. Model predictive control of atomic force microscope for fast image scanning. 12 2012. doi: 10.1109/CDC.2012.6426103.
- [87] J. Clarke, J. Cockroft, S. Conner, J. Hand, N. Kelly, R. Moore, T. O'Brien, and P. Strachan. Simulation-assisted control in building energy management systems. *Energy and Buildings*, 34(9):933–940, 2002. ISSN 0378-7788. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00068-3). A View of Energy and Building Performance Simulation at the start of the third millennium.
- [88] S. Matour, M. Mahdavinejad, and R. Fayaz. Horizontal and vertical illuminance correlations in a case study for shaded south facing surfaces. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(12):1046–1051, 2017.

Sala 1 · Andar Sala 1 · Sala 1 (1/2)

Resumo

Resultados

	Tamanho	Calculado	Nominal	Check
Plano de uso	Ē	336 lx	≥ 500 lx	✗
	g ₁	0.018	-	-
Dimensões de consumo	Consumo	530 - 840 kWh/a	máx. 2650 kWh/a	✓
Potência de ligação específica	Sala	4.09 W/m ²	-	-
		1.22 W/m ² /100 lx	-	-

Perfil de utilização: Configuração DIALux, Padrão (escritório)

Lista de luminárias

Un.	Fabricante	Nº do artigo	Nome do artigo	P	Φ	Rendimento luminoso
16	Mazinoor	M456L60LE D2	ISOLA 2200 Lm 19W Low Power LED luminaire with PC Body and Diffuser, 4000K	19.0 W	2200 lm	115.8 lm/W