



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Nuno Manuel dos Santos Vieira

ILUMINAÇÃO NATURAL E GANHOS SOLARES
EM EDIFÍCIOS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia civil, na área de
Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Paulo
Fernando Antunes dos Santos e apresentada ao Departamento de Engenharia
Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Nuno Manuel dos Santos Vieira

Iluminação natural e ganhos solares em edifícios

Natural lighting and solar heat gains in buildings

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Setembro de 2020



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Santos, pela disponibilidade, prontidão e conhecimentos transmitidos durante o decorrer desta dissertação.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e paciência que tiveram durante o meu percurso académico.

Aos meus amigos que tiveram um papel muito importante ao longo deste caminho, estando sempre ao meu lado.

Por fim, ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, a todos os docentes e funcionários.

RESUMO

Um dos grandes desafios da atualidade é tornar os edifícios mais sustentáveis e ecológicos, de forma a reduzir os seus consumos de recursos durante o seu tempo de vida útil, assim como na sua construção.

Na União Europeia, num espaço habitacional, 20% do consumo de energia elétrica é devido a gastos com iluminação artificial, sendo que no sector de serviços representa 60% do consumo elétrico. Em Portugal, o consumo de energia no inverno para aquecimento no sector residencial é superior a 28%. Por outro lado, no verão a existência de ganhos solares excessivos irão provocar um aumento das necessidades de arrefecimento. Assim, diminuir a utilização de iluminação artificial e reduzir as necessidades energéticas torna-se essencial para tornar os edifícios mais sustentáveis. Os sistemas de iluminação natural e de sombreamento podem desempenhar um papel muito importante neste objetivo.

Os sistemas de iluminação natural permitem um melhor aproveitamento da luz de dia no interior dos edifícios, originando uma redução de consumos elétricos da iluminação artificial, sendo que os sistemas de sombreamento possibilitam controlar os ganhos solares. No entanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre as necessidades de iluminação e as necessidades térmicas.

Nesta dissertação, para além de uma revisão do estado da arte sobre as diferentes estratégias de sombreamento e iluminação natural, pretende-se estudar a relação entre as necessidades de iluminação natural e o seu impacto nas necessidades energéticas. Para este estudo utilizou-se o *software DesignBuilder* para modelar uma sala de aula com os parâmetros construtivos reais e assim, através de simulações, avaliar os ganhos solares, consumos de energia e o conforto térmico. A utilização de uma pala de sombreamento horizontal, particularmente orientada a sul, permite reduzir os ganhos solares no verão, sem provocar um aumento do consumo de energia elétrica para iluminação.

Palavras-Chave: Iluminação natural, ganhos solares, conforto térmico, consumos energéticos, *DesignBuilder*, estudo paramétrico.

ABSTRACT

One of the great challenges of today is to make buildings as sustainable and ecological as possible, in order to reduce their consumption of resources during their life cycle as well as in their construction.

In the European Union, in a residential space 20% of the electricity consumption is due to the artificial lighting, where in the service sector it represents 60% of the electrical consumption. In Portugal, energy consumption for heating in the residential sector is over 28%. On the other hand, in the summer, the existence of excessive solar heat gains will cause an increase in cooling needs. Therefore, reducing the use of artificial lighting and reducing energy needs is essential to make buildings more sustainable.

Natural lighting and shading systems can play a very important role in this objective. Natural lighting systems allow a better use of daylight inside buildings, resulting in a reduction of electrical consumption with artificial lighting and shading systems make it possible to control solar gains. However, it is necessary to find a balance between lighting needs and thermal needs.

In this dissertation, in addition to a review of the state of the art on the different approaches to shading and natural lighting, it is intended to study the relationship between the need for natural lighting and its impact on energy needs. For this study, DesignBuilder software was used to model a classroom with the real construction parameters and, through simulations, to evaluate solar gains, energy consumption and thermal comfort. The use of a horizontal overhang, particularly oriented to the south, allows to reduce the solar gains in summer, without increasing the consumption of electricity for lighting.

Keywords: Natural lighting, solar gains, thermal comfort, energy consumption, DesignBuilder, parametric study.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e Metodologia.....	1
1.3	Estrutura da Dissertação.....	2
2	ESTADO DA ARTE.....	3
2.1	Geometria Solar.....	3
2.2	Orientação dos vãos envidraçados.....	3
2.3	Iluminação Natural.....	5
2.3.1	Fontes de luz natural.....	5
2.3.2	Sistemas de iluminação natural.....	6
2.4	Sistemas de sombreamento.....	12
2.4.1	Sistemas fixos e móveis.....	13
2.4.2	Sistemas dinâmicos.....	15
2.4.3	Sombreamento com árvores e vegetação.....	17
3	CASO DE ESTUDO.....	18
3.1	Metodologia.....	18
3.2	DesignBuilder.....	18
3.3	Modelação tridimensional.....	19
3.3.1	Descrição da sala.....	19
3.3.2	Parâmetros construtivos.....	20
3.3.3	Modelação.....	21
3.4	Medições.....	27
3.5	Calibração do modelo.....	28
4	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	33
4.1	Modelação.....	33
4.2	Discussão de resultados.....	36
4.2.1	Ganhos solares.....	36
4.2.2	Consumos energéticos.....	38
4.2.3	Conforto térmico.....	40
4.2.4	Resultados com alteração das temperaturas de funcionamento do sistema de climatização.....	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
5.1	Conclusões.....	46
5.2	Trabalhos futuros.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Exposição solar dos vãos envidraçados: a) Vão envidraçado orientado a Sul no inverno; b) Vão envidraçado orientado a Este no inverno; c) Vão envidraçado orientado no verão; d) Vão envidraçado orientado no verão (H. Gonçalves & Graça, 2004).	4
Figura 2.2 - Fachadas sul e nascente-norte (H. Gonçalves et al., 2006).....	5
Figura 2.3. Sistemas de iluminação natural: a) sem sombreamento (helióstato) (Wyckmans, 2005) ; b) com sombreamento (prateleira de luz) (Raphael, 2010).....	7
Figura 2.4. Sistemas de Iluminação Natural (IEA, 2010; Kischkoweit-lopín, 2002; Wong, 2017).....	8
Figura 2.5. Painel Cortado a Laser (@reserchgate, 2020).....	8
Figura 2.6. Sistema de teto anidólico (@springer, 2020).....	9
Figura 2.7. Tubo de luz (Oliveira, 2016).....	10
Figura 2.8. Sistema de dispersão de luz (Kischkoweit-lopín, 2002).	10
Figura 2.9. Prateleira de luz (@designingbuildings, 2019; @ 2030palette,2019).....	11
Figura 2.10. Painel prismático (@northernarchitecture, 2017).	11
Figura 2.11. Comprimento ideal de uma pala horizontal (Yao, 2017).....	13
Figura 2.12. Dispositivos fixos de sombreamento exteriores: a) Pala horizontal (@gardenista); b) Palas verticais (@archiexpo).....	14
Figura 2.13. Quebra sol (@archiexpo, 2019; @directindustry, 2019).	14
Figura 2.14. Tipos de sistemas dinâmicos: a) Circuito de ciclo aberto; b) Circuito de ciclo fechado (Adaptado de Al-masrani & Al-obaidi, 2019).	16
Figura 2.15. Sistemas de sombreamento reativo aplicado nas Torres Al-Bahr, Abu Dhabi (@livinspace, 2020; @blogdaarquitectura, 2020).	16
Figura 2.16. Sombreamento com árvore de folha caduca no inverno e no verão (@nzeb, 2019).....	17
Figura 3.1. Interface do DesignBuilder.	19
Figura 3.2. Localização da sala S.C. 3.6 no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (@google/maps, 2020).	19
Figura 3.3. Planta da sala S.C. 3.6, Departamento de Engenharia Civil, FCTUC.	20
Figura 3.4. Planta parcial dos gabinetes no 2º Piso, Departamento de Engenharia Civil, FCTUC.	23
Figura 3.5. Secções dos elementos construtivos: a) Laje de cobertura; b) Laje interior na sala; c) Laje interior no corredor; d) Parede interior; f) Parede Exterior.	25
Figura 3.6. Janela de modelação de tipo de vidro no DesignBuilder.	26
Figura 3.7. Data logger - Tinytag Plus 2 - TGP-4500 (@geminidataloggers, 2020).	27
Figura 3.8. Posicionamento dos data-loggers na sala.	27

Figura 3.9. Registo de temperatura no interior da sala com o sistema de sombreamento ativo.	28
Figura 3.10. Registo de temperatura no interior da sala sem sistema de sombreamento.	28
Figura 3.11. Comparação entre temperaturas registadas e simuladas, considerando infiltrações com uma taxa de 0.4 rph.....	29
Figura 3.12. Comparação entre temperaturas registadas no interior da sala e temperaturas simuladas em diferentes cenários de infiltrações de ar.....	30
Figura 3.13. Parâmetros editáveis do dispositivo de sombreamento.....	31
Figura 3.14. Comparação entre temperaturas registadas no interior da sala e temperaturas simuladas em diferentes cenários de dispositivos de sombreamento.	31
Figura 3.15. Resultados finais para validação de modelo: a) infiltrações de ar; b) sistema de sombreamento.....	32
Figura 4.1. Janela de modelação de atividade no DesignBuilder.....	34
Figura 4.2. Janela de modelação da iluminação no DesignBuilder.....	35
Figura 4.3. Janela de modelação de sistemas AVAC no DesignBuilder.....	36
Figura 4.4. Ganhos solares no interior da sala em: a) janeiro; b) junho.....	38
Figura 4.5. Consumos elétricos em: a) janeiro; b) junho.	40
Figura 4.6. Temperatura operativa em: a) janeiro; b) junho e índice PMV em: c) janeiro; d) junho.	42
Figura 4.7. Novos pontos de ajuste de temperatura.....	43
Figura 4.8. Temperatura operativa em: a) janeiro; b) junho e índice PMV em: c) janeiro; d) junho, com as novas temperaturas de funcionamento no sistema de climatização.	44
Figura 4.9. Consumos elétricos em: a) janeiro; b) junho, com as novas temperaturas de funcionamento no sistema de climatização.	45

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1. Dados geográficos.	21
Quadro 3.2. Parâmetros climáticos registados na empresa CoolHaven.	22
Quadro 3.3. Especificações térmicas dos elementos construtivos da envolvente opaca.	24
Quadro 3.4. Especificações dos elementos da envolvente envidraçada.	26
Quadro 3.5. Cenários para calibração do parâmetro infiltrações de ar.	30
Quadro 3.6. Cenários para calibração do sistema de sombreamento.	31
Quadro 4.1. Categorias e níveis de conforto para PPD-PMV (percentagem previsível de insatisfeitos – voto previsto médio) e temperatura operativa para ambientes com atividade sedentária, conforme a norma EN 15251 (2006).	41

ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado

CIE – Comissão Internacional de Iluminação

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

GTM – “*Greenwich Mean Time*”

IEA – “*International Energy Agency*”

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PMV – “*Predicted Mean Vote*”

PPD – “*Predicted Percentage of Dissatisfied*”

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos edifícios de Comércio e Serviços

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RMSE – “*Root Mean Square Error*”

SIMBOLOGIA

Símbolo	Descrição	Unidades
CoP	Coeficiente de desempenho	-
g	Fator solar	-
R	Resistência térmica	[m ² .°C/W]
R _{se}	Resistência térmica superficial exterior	[m ² .°C/W]
R _{si}	Resistência térmica superficial interior	[m ² .°C/W]
U	Coeficiente de transmissão térmica	[W/(m ² .°C)]
TL	Transmissão luminosa	-
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
λ	Condutibilidade térmica	[W/m.°C]

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Segundo a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), na União Europeia a energia elétrica gasta para iluminação artificial representa 20% da fatura de eletricidade numa residência habitacional sendo que, no sector de serviços pode representar cerca de 60% do consumo elétrico. Em Portugal, a iluminação artificial representa aproximadamente 12% do consumo de energia no setor doméstico, subindo para 20% no sector de serviços (@DGEG, 2020).

Em 2018, no sector residencial, o consumo de energia para aquecimento do ambiente representou 28,2% do consumo global de energia sendo que, a energia despendida para arrefecimento verificou-se ser apenas de 0,6% (@europa, 2020).

Tendo em consideração os dados referidos, observa-se a necessidade de reduzir os gastos de energia com iluminação e climatização de edifícios. Um aproveitamento adequado da iluminação natural pode ter um impacto bastante significativo na redução do consumo de energia para iluminação, proporcionando ao mesmo tempo condições de conforto visual para os ocupantes dos edifícios. Além da redução das necessidades de iluminação, um maior aproveitamento dos ganhos solares no inverno, também reduzirá a necessidades de aquecimento. No entanto, no verão, o aumento de ganhos solares devido à iluminação natural poderá originar um aumento das necessidades de arrefecimento.

Neste contexto, de forma a atingir uma maior eficiência energética, é muito importante conseguir equilibrar as necessidades de iluminação com as necessidades térmicas. Assim, os sistemas de sombreamento, assim como os sistemas de iluminação natural, podem desempenhar um papel muito importante na redução dos consumos de energia.

1.2 Objetivos e Metodologia

Na presente dissertação tem-se como objetivo fazer uma revisão do estado da arte sobre as diferentes estratégias de sombreamento existentes, assim como, estratégias de iluminação natural. Além desta revisão do estado da arte, pretende-se estudar a relação entre as necessidades de iluminação natural e o seu impacto nas necessidades energéticas. Para este efeito, é realizado um caso de estudo, numa sala de aula do Departamento de Engenharia Civil

da Universidade de Coimbra, onde são avaliados os ganhos solares, os consumos de energia e o conforto térmico num mês de inverno e num mês de verão.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos. No primeiro capítulo é feito um enquadramento ao tema, a apresentação dos objetivos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo é referente ao estado da arte. Inicialmente é analisada a geometria solar e a orientação das fachadas envidraçadas, sendo estes fatores importantes na conceção de um edifício para um melhor aproveitamento solar. De seguida, são apresentadas as fontes de luz natural, os sistemas de iluminação natural, assim como, os sistemas de sombreamento.

No terceiro capítulo é feita a descrição de metodologia usada para o caso de estudo, sendo também apresentado o *software* utilizado. É feita uma explicação de como se fez a modelação tridimensional da sala em estudo, sendo depois apresentados os dados recolhidos para efetuar a calibração e validação do modelo termicamente. Por fim, é apresentado o método aplicado para realizar esta calibração e validação.

No quarto capítulo é efetuado um estudo paramétrico com o base no modelo validado no capítulo anterior. São estudados quatro cenários diferentes, sendo dois atualmente existentes e outros dois gerados através da introdução de palas de sombreamento na fachada. O objetivo é estudar os ganhos solares, os consumos energéticos e o conforto térmico em cada um dos cenários e assim, analisar a relação entre as necessidades de iluminação natural e o consequente aumento das necessidades energéticas de arrefecimento.

Por fim, no capítulo cinco são apresentadas as principais conclusões desta dissertação.

2 ESTADO DA ARTE

O desenvolvimento deste capítulo tem como objetivo o estudo das diversas estratégias de sombreamento existentes atualmente. No entanto, é essencial perceber inicialmente alguns conceitos mais básicos, tais como a geometria solar, a orientação dos vãos envidraçados e as fontes de iluminação natural. Assim, primeiramente serão abordados estes conceitos iniciais, abordando também os sistemas de iluminação natural, uma vez que estes também podem desempenhar um papel importante na eficiência energética de um edifício, concluindo o capítulo com os diversos sistemas e estratégias de sombreamento existentes.

2.1 Geometria Solar

De forma a conseguir ter um melhor aproveitamento da exposição solar dos edifícios é relevante conhecer os diferentes percursos do sol ao longo do dia, para as diferentes estações do ano. Assim, é possível conseguir um maior aproveitamento solar quando este é conveniente, estação de aquecimento, ou reduzir a exposição dos vãos envidraçados quando é prejudicial, estação de arrefecimento (H. Gonçalves e Graça, 2004).

O solstício de Verão ocorre no dia 21 de junho e é neste dia que o ângulo da altura do sol toma valores mais altos de todo o ano. O sol nasce relativamente próximo de Nordeste e põe-se relativamente próximo de Noroeste. O solstício de Inverno acontece a 21 de Dezembro, sendo neste dia que o ângulo da altura do Sol toma os valores mais baixos do ano inteiro. O sol nasce relativamente próximo de Sudeste e põe-se relativamente próximo de Sudoeste. Em relação aos equinócios, ocorrem a 21 de Março e a 21 de Setembro, o sol nasce a Este e põe-se a Oeste (H. Gonçalves e Graça, 2004).

2.2 Orientação dos vãos envidraçados

A orientação das fachadas dos edifícios têm um papel crucial na forma como é possível fazer o melhor aproveitamento dos ganhos solares, sempre que bem projetadas.

No inverno, sendo a estação de aquecimento, é necessário aquecer os edifícios, como tal, deve-se captar a maior radiação solar possível. Por outro lado, no verão é necessário reduzir os ganhos solares de forma a minimizar as necessidades de arrefecimento. Para este efeito as fachadas

orientadas a sul conseguem potenciar estes princípios da melhor forma (H. Gonçalves & Graça, 2004).

As fachadas orientadas a Sul, recebem um maior nível de radiação solar anual do que as fachadas orientadas noutras direções, sendo no verão mais facilmente protegidas contra ganhos solares indesejáveis. Assim sendo, no verão é necessário minimizar os ganhos solares, uma vez que o sol desde que nasce (nordeste) até quando se põe (noroeste) incide sobre todas as orientações sendo a cobertura a receber maior nível de radiação. Verifica-se que o percurso do sol, quando próximo do seu ponto mais alto, apresenta um ângulo de incidência com a normal de valor mais elevado. Apresenta menos ganhos solares, que são facilmente atenuáveis caso exista uma pala de sombreamento horizontal sobre o vão envidraçado. Em relação ao Inverno, uma vez que é necessário aquecer os edifícios, a orientação a sul é aquela que se traduz em maiores ganhos solares. O percurso do sol no Inverno efetua-se para azimutes muito próximos do Sul o que se torna vantajoso para esta orientação (H. Gonçalves e Graça, 2004).

Na Figura 2.1 apresenta-se a comparação entre exposição solar de uma fachada orientada a Sul e de outra fachada orientada Nascente, no inverno e no verão.

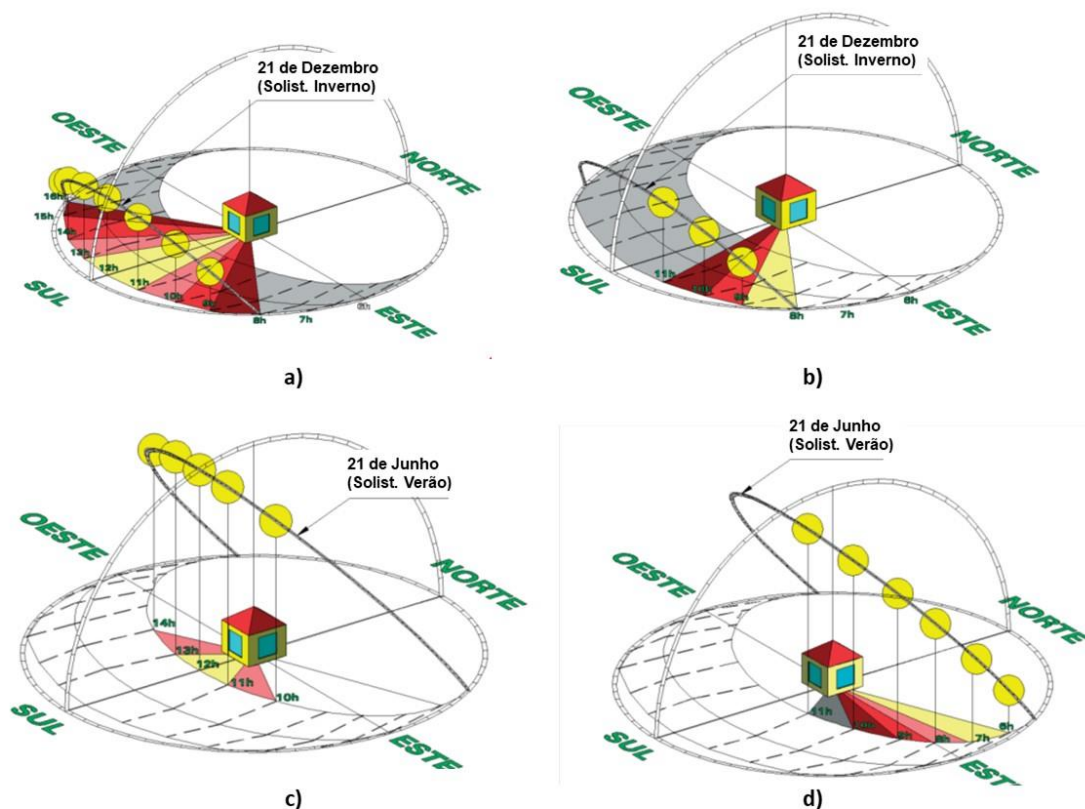


Figura 2.1. Exposição solar dos vãos envidraçados: a) Vão envidraçado orientado a Sul no inverno; b) Vão envidraçado orientado a Este no inverno; c) Vão envidraçado orientado a Sul no verão; d) Vão envidraçado orientado a Este no verão (H. Gonçalves & Graça, 2004).

Em Portugal, um edifício que teve estes princípios em consideração no desenvolvimento do seu projeto foi o Edifício Solar XXI. O edifício, com o objetivo de potenciar os ganhos solares, apresenta uma fachada orientada a sul a qual representa o maior elemento de captação de energia solar, sendo que as outras fachadas têm vãos envidraçados mais pequenos, como é possível ver na Figura 2.2. Para além desta atenção aos ganhos solares, como sendo um edifício de referência a nível de sustentabilidade, também integra muitos outros sistemas e estratégias de forma a atingir uma maior sustentabilidade (H. Gonçalves et al., 2006).



Figura 2.2 - Fachadas sul e nascente-norte (H. Gonçalves et al., 2006).

2.3 Iluminação Natural

2.3.1 Fontes de luz natural

As fontes de luz natural caracterizam-se em dois tipos: a luz do sol e a luz do céu. A luz do sol tem origem diretamente neste, causando uma iluminação direta com iluminâncias muito superiores à luz do céu. Por outro lado, a luz do céu tem origem em todo o hemisfério celeste provocando iluminação difusa (Martins, 2010).

Ainda segundo Martins (2010), a iluminação com origem direta na luz solar pode causar encadeamento, uma vez que esta só ilumina uma parte de uma divisão o que provoca um grande contraste entre a parte iluminada e restante área. Mas uma iluminação difusa evita o contraste dentro das divisões e assim não provoca encadeamento.

Para estudos qualitativos e quantitativos de luz natural, a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) definiu três tipos de céus: (1) céu limpo, (2) céu parcialmente encoberto e (3) céu encoberto. Nas condições de céu limpo, o sol é completamente visível onde há uma ausência de nuvens. Nesta situação os níveis de iluminância variam entre 60.000 e 100.000 lux. O céu parcialmente nublado representa uma situação intermédia entre o céu limpo e o céu nublado,

ou seja, representa o céu parcialmente limpo ou parcialmente nublado. Apesar de ser a situação mais comum a CIE não recomenda a utilização deste modelo. Por fim, o céu encoberto caracteriza-se pelo sol não ser visível devido a uma elevada densidade de nuvens presentes na atmosfera. No entanto existem dois modelos, o céu encoberto uniforme e o céu encoberto padrão. O modelo de céu encoberto uniforme não representa a realidade, visto que considera a luz constante em todo hemisfério. Sendo aconselhado a utilização do modelo de céu padrão para cálculo de iluminação natural, devido à representação de condições mais desfavoráveis. Este modelo tem iluminâncias entre os 5.000 e os 20.000 lux e considera-se que a luz emitida no zénite é três vezes superior à luz emitida no horizonte (Coutinho, 2009; S. Santos, 2009).

2.3.2 Sistemas de iluminação natural

Segundo Jackson et al. (1999), os ocupantes de um edifício sentem necessidade de ver a luz do dia e ficam insatisfeitos quando isto não é possível. Além deste facto, a iluminação natural desempenha um papel importante dentro de um edifício uma vez que, em comparação com luz artificial, fornece melhor condições de visibilidade porque tem alterações consistentes de intensidade, direção e composição espectral (Wong, 2017). Diversos estudos indicam que o uso desta fonte luz pode beneficiar a produtividade e concentração de um individuo (Gago et al, 2015).

Ainda de acordo com Gago et al. (2015), um melhor aproveitamento da iluminação natural por si só pode traduzir-se numa redução de 25 a 30% no uso total de energia. No caso de um edifício de escritórios convencional, o consumo de energia elétrica com fins de iluminação pode chegar até aos 35% da energia elétrica total consumida, sendo que grande parte deste consumo tem origem durante o dia quando há luz diurna disponível.

Contudo, a iluminação natural não tem só vantagens. Esta também pode causar ganhos solares indesejados e encandeamento devido ao excesso de brilho. Como tal, em certos períodos do ano pode ser necessário tomar algumas medidas de controle de forma a ter um aproveitamento adequado deste recurso (Phillips, 2004).

Segundo Oliveira (2016), as estratégias de iluminação natural dividem-se em dois grupos, sendo um composto por aberturas laterais e o outro por aberturas zenitais. Os exemplos mais simples destas duas estratégias são a janela e a claraboia, respetivamente, que permitem a entrada de luz natural dentro dos edifícios. Mas, por outro lado, atualmente existem soluções e novas tecnologias que melhoraram o desempenho dos sistemas convencionais. Estas novas soluções funcionam a partir da introdução de componentes refletivos ou refrativos nos envidraçados, sendo que também podem ter uma componente de sombreamento. Assim, conseguem aumentar o aproveitamento da luz natural em diversos contextos, como por exemplo

em zonas mais afastadas das janelas ou até fazer o transporte de luz para espaços sem janelas (IEA, 2010).

Como referido anteriormente, os novos sistemas de iluminação natural podem-se dividir em duas categorias, sistemas sem sombreamento e sistemas com sombreamento (Figura 2.3). Sendo que, nos sistemas que tem a componente de sombreamento existem sistemas que aproveitam a luz solar direta, redirecionando-a para o teto ou para zonas acima da altura dos olhos, ou por outro lado, sistemas que usam essencialmente a luz difusa impedindo a luz solar direta (IEA, 2010).

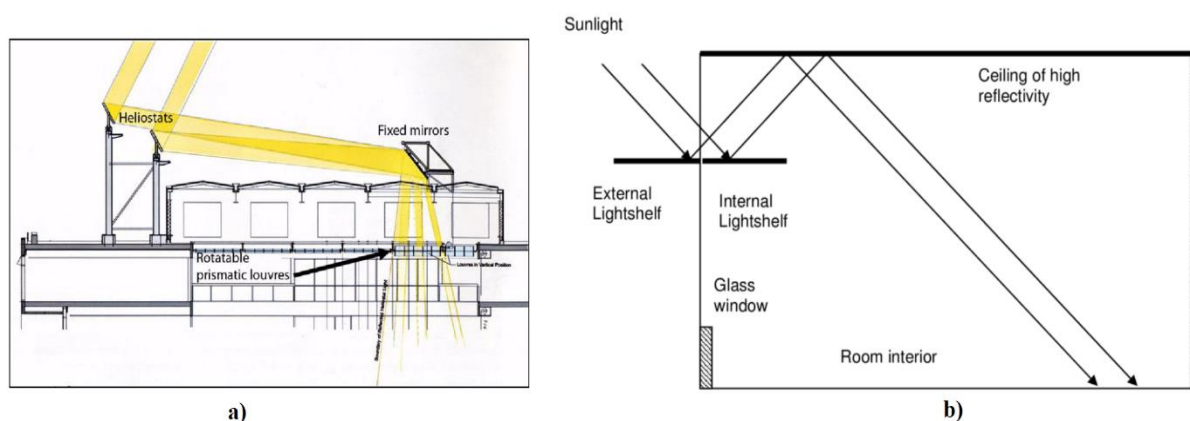


Figura 2.3. Sistemas de iluminação natural: a) sem sombreamento (helióstato) (Wyckmans, 2005) ; b) com sombreamento (prateleira de luz) (Raphael, 2010).

Em relação aos sistemas de iluminação natural sem sombreamento, segundo Wong (2017), podem ser categorizados como sistemas de orientação de luz e sistemas de transporte de luz. O primeiro é um sistema mais simples que reflete e direciona a luz para zonas de uma divisão que normalmente recebe pouca luz solar. O segundo sistema, sistema de transporte de luz, é mais complexo porque recebe, transporta e distribui a luz para zonas dentro um edifício que não estão expostas a luz solar.

Para além deste dois tipos de sistemas, também existem sistemas de dispersão de luz solar que são usados para conseguir uma distribuição uniforme da luz recebida. Contudo, estes sistemas quando usados em janelas poderão causar excesso de brilho (IEA, 2010).

De seguida na Figura 2.4 apresenta-se um esquema com uma possível distribuição dos diferentes tipos de sistemas de iluminação natural, sendo dado um exemplo para cada tipo de sistema e de seguida explicado o seu funcionamento.

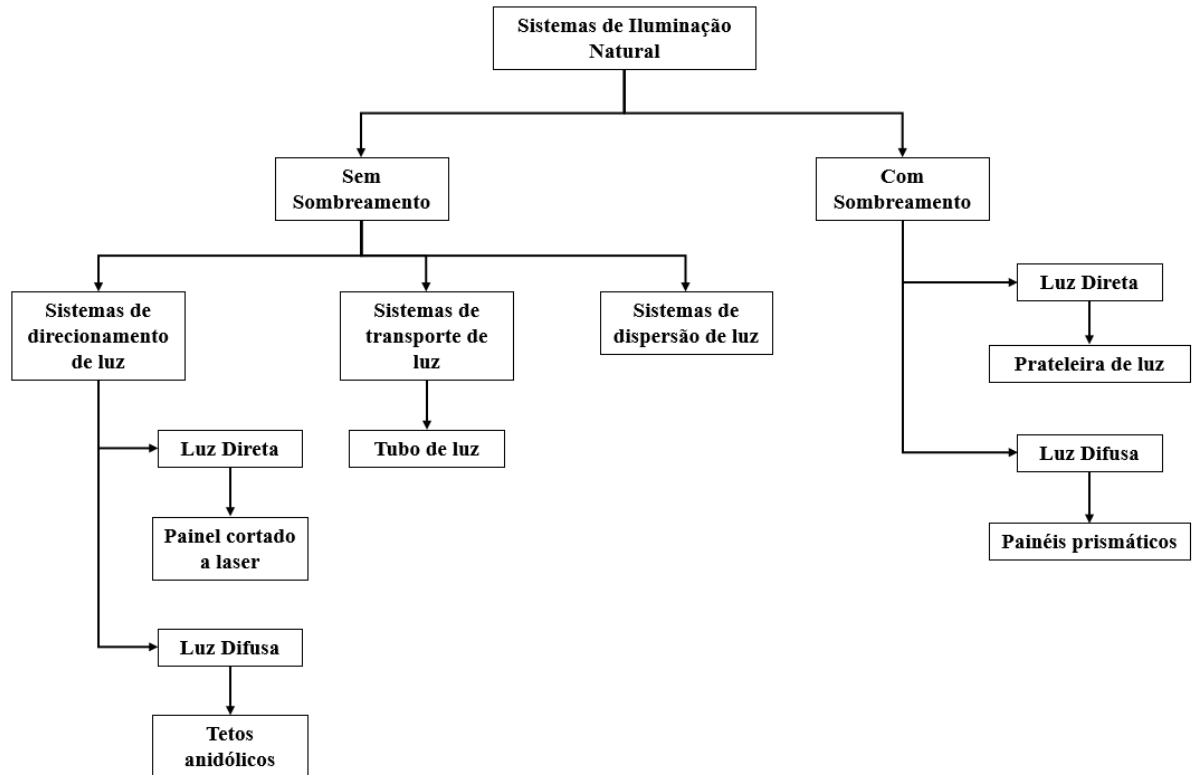


Figura 2.4. Sistemas de Iluminação Natural (IEA, 2010; Kischkoweit-Iopin, 2002; Wong, 2017).

- **Painel Cortado a Laser**

O sistema Painel Cortado a Laser (Figura 2.5) pertence à categoria de sistema de iluminação natural sem sombreamento, sendo um sistema de direcionamento de luz direta.

Este sistema consiste num painel de acrílico transparente de espessura reduzida, onde são feitos cortes a laser que dividem o painel num sistema de elementos retangulares. Tornando-se assim numa matriz de pequenos espelhos internos que refletem a luz que atravessa o painel, mantendo a vista para o exterior apesar de ser algo distorcida (IEA, 2010).

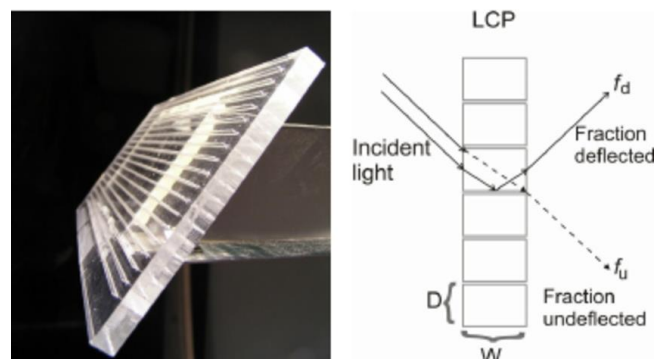


Figura 2.5. Painel Cortado a Laser (@reserchgate, 2020).

- **Tetos anidólicos**

Um sistema de teto anidólico (Figura 2.6) pertence à categoria sistema de iluminação natural sem sombreamento, sendo um sistema de direcionamento de luz difusa. Este recolhe luz difusa utilizando as propriedades óticas do concentrador parabólico. O concentrador é agregado a uma conduta polida para o transporte de luz, acima do teto, que guia a luz até ao fundo de uma divisão (IEA, 2010).

Na parte exterior do edifício, um concentrador ótico anidólico recolhe a luz difusa e concentra a luz difusa do céu nublado, direcionando posteriormente para uma conduta de luz. Esta conduta através diversos refletores, que revestem a conduta, leva a luz natural até ao fundo de uma divisão sendo distribuída para baixo, sem reflexos, por intermédio de um refletor parabólico (IEA, 2010).

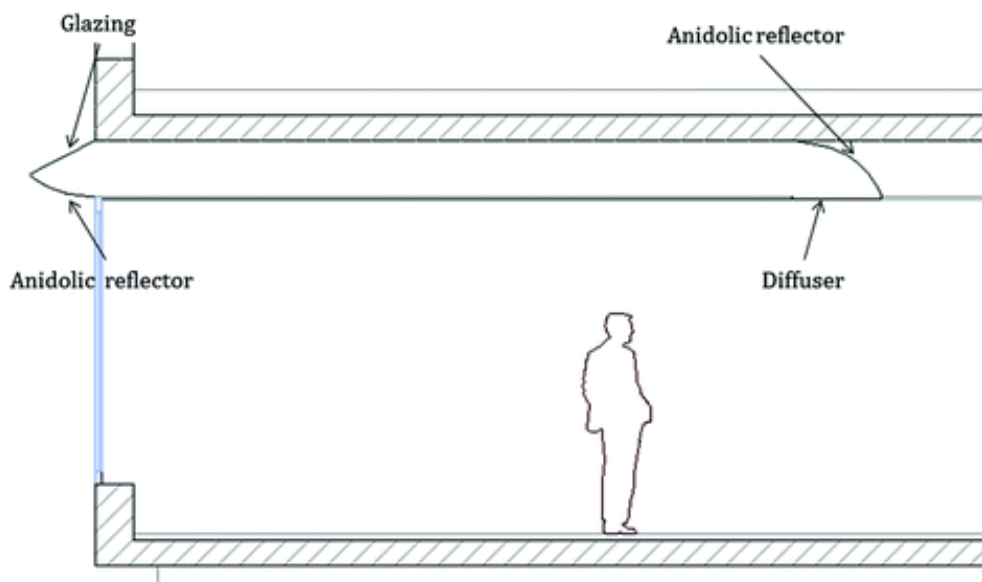


Figura 2.6. Sistema de teto anidólico (@springer, 2020).

- **Tubo de luz**

O tubo de luz (Figura 2.7) é um sistema de transporte de luz natural, que direciona os raios de luz solar recolhidos no topo do edifício, por vários andares através de um sistema de distribuição em cada andar (IEA, 2010). Este sistemas consiste numa claraboia, que deve ser resistente a raios ultravioleta e impactos, um tubo refletor e um sistema difusor colocado nos pisos que se pretendem iluminar (Gago et al., 2015).

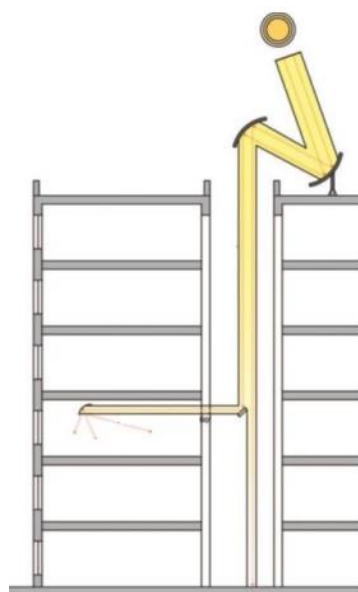


Figura 2.7. Tubo de luz (Oliveira, 2016).

- **Sistemas de dispersão de luz**

Os sistemas de dispersão de luz (Figura 2.8) são utilizados para obter distribuições uniformes de luz natural. Estes sistemas são muito úteis em divisões muito iluminadas, apesar de a sua localização ter que ser bem ponderada porque podem causar excesso de brilho quando colocados em aberturas verticais (janelas) (Kischkoweit-lopín, 2002).

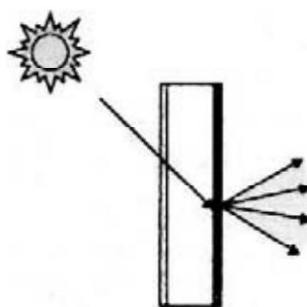


Figura 2.8. Sistema de dispersão de luz (Kischkoweit-lopín, 2002).

- **Prateleira de luz**

A prateleira de luz (Figura 2.9) é um sistema de iluminação natural direta com sombreamento. Este sistema pode ser aplicado na parte exterior ou interior de uma janela, sendo a sua posição próxima da horizontal (IEA, 2010). Sendo que, o sistema ao ser aplicado a uma altura acima do nível dos olhos, tem a vantagem de conseguir manter a visualização do exterior (Phillips, 2004).

Para além da função de proporcionar sombra e reduzir o brilho, também tem a função de refletir os raios solares para o teto (IEA, 2010). Desta forma, o sistema consegue uniformizar a luz dentro de uma sala, atingido partes mais distantes da janela, apesar de não aumentar os fatores de luz de dia (Phillips, 2004).



Figura 2.9. Prateleira de luz (@designingbuildings, 2019; @ 2030palette,2019).

- **Painéis prismáticos**

Os painéis prismáticos (Figura 2.10) são sistemas de iluminação natural de luz difusa com sombreamento. Tem a função de desviar a luz solar direta, permitindo a passagem de luz difusa refletindo-a também. São feitos de acrílico transparente, planos e de baixa espessura (IEA, 2010)

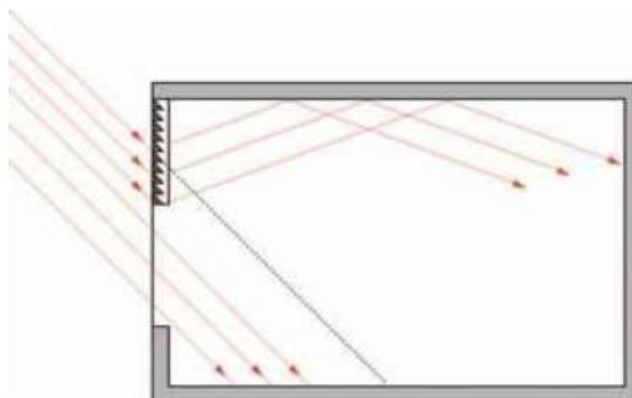


Figura 2.10. Painel prismático (@northernarchitecture, 2017).

2.4 Sistemas de sombreamento

A utilização, em novos de edifícios, de grandes áreas envidraçadas tem sido cada vez mais recorrente. Esta prática permite uma maior utilização de luz natural, bem como, uma maior visualização do exterior por parte dos ocupantes (Freewan, 2014). Contudo, esta abordagem não tem só benefícios, o aumento da área envidraçada também se traduz no aumento dos ganhos solares que podem ser prejudiciais. Na estação de aquecimento (Inverno), o aumento de ganhos solares é benéfica, uma vez que, diminui a necessidades de aquecimento, mas uma incidência excessiva de luz natural também pode causar excesso de brilho, o que provoca desconforto nos ocupantes. Por outro lado, na estação de arrefecimento (Verão), o ganhos solares excessivos irão causar uma aumento nas necessidades de arrefecimento (Yun et al., 2014). Assim, citando Freewan (2014), *“O aumento de área envidraçada requer uma significativa atenção no projeto de edifícios em termos de impacto no arrefecimento, aquecimento e iluminação”*.

A utilização, de forma adequada, de sistemas de sombreamento permite controlar a entrada de luz diurna nos edifícios, melhorando o conforto térmico e reduzindo o brilho excessivo. Sendo que, diversos estudos mostram que a utilização destes sistemas pode permitir uma redução nas necessidades de arrefecimento, mas, por outro lado, pode levar a um aumento das necessidades de aquecimento e de utilização de luz artificial (Bellia, et al., 2014; Freewan, 2014).

De acordo com Santos (2016), *“os dispositivos de sombreamento podem ter de desempenhar várias funções, como sejam: i) a proteção contra os ganhos solares excessivos, ii) o controlo e modelação da iluminação natural, iii) a minimização do encandeamento, iv) a possibilidade de obscurecimento e de ocultação, v) a garantia de privacidade, e vi) a possibilidade de contacto visual com o ambiente exterior, entre outras”*.

Bellia et al., (2014), sugeriu a categorização dos diferentes sistemas de sombreamento em sistemas fixos e sistemas móveis, sendo que ambos podem ser interiores ou exteriores. Porém, com os mais recentes desenvolvimentos na área, o surgimento de sistemas dinâmicos de sombreamento capazes de fazer ajustes, de forma automática, ao longo do dia tornou estes sistemas mais tradicionais menos eficientes em termos de controlo de luz natural e eficiência energética (Al-masrani & Al-obaidi, 2019). Para além destes sistemas, existem também os sistemas de iluminação natural com sombreamento, já referidos no subcapítulo 2.3.2.

Outra forma de sombreamento possível é a utilização de árvores e vegetação. Este tipo de sombreamento possibilita a diminuição da temperatura superficial dos edifícios através do bloqueio do raios solares na copa das árvores, permitindo simultaneamente aumentar os espaços verdes nas cidades.

2.4.1 Sistemas fixos e móveis

A escolha do tipo de sistema de sombreamento a utilizar num edifício é muito importante, uma vez que um sistema fixo mal projetado pode levar a um aumento do consumo de luz artificial, como referido anteriormente. Por outro lado, um sistema móvel tem a vantagem de ser ajustável conforme as necessidades ao longo do dia (Jackson et al., 1999). Sendo também necessário ter em conta que os dispositivos externos são mais eficientes, na retenção de ganhos solares, do que os dispositivos internos (Jackson et al., 1999; Phillips, 2004).

Os sistemas externos mais frequentemente utilizados são as palas, horizontais ou verticais, grelhas fixas ou móveis, malhas metálicas, estores, portadas, telas exteriores, toldos e o quebra sol, também conhecidos como *brise soleil*. Em relação aos sistemas internos, os dispositivos mais comuns são as cortinas, estores venezianos, tanto com lâminas horizontais como com lâminas verticais e telas interiores (Oliveira, 2016; Phillips, 2004)

De seguida serão apresentados em mais detalhe alguns destes sistemas.

- **Palas horizontais e verticais**

Segundo Coutinho (2009), para fachadas orientadas a sul e a norte é recomendável usar sistemas de sombreamento horizontais (Figura 2.12 a)). Estes sistemas conseguem reduzir os ganhos solares no verão e permitem entrada de luz no inverno, uma vez que os raios solares nesta altura do ano têm uma altitude inferior. Mas para que isto seja possível, de acordo com Yao (2017), diversos estudos sugerem que há um comprimento ideal para a pala (Figura 2.11), sendo este dependente da altura do vão envidraçado (Calhau, 2014). Este tipo de palas não é capaz de controlar a entrada de luz difusa de forma eficiente, o que contribui de forma significativa para as necessidades de arrefecimento (Yao, 2017).

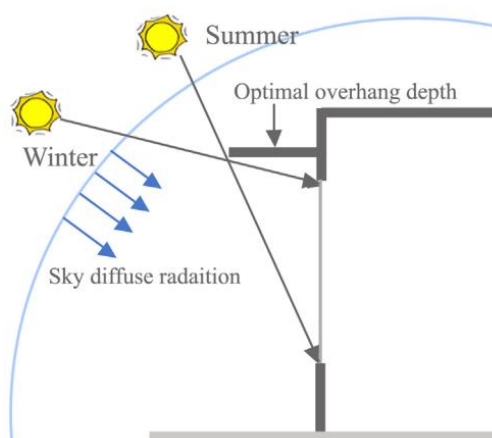


Figura 2.11. Comprimento ideal de uma pala horizontal (Yao, 2017).

As palas verticais (Figura 2.12 b)) são recomendadas para o uso em fachadas orientadas a este e oeste, porque conseguem bloquear os raios solares ao nascer e pôr-do-sol (Coutinho, 2009). A altura destas palas verticais deve ser pelo menos igual à altura das janelas (Calhau, 2014).



Figura 2.12. Dispositivos fixos de sombreamento exteriores: a) Pala horizontal (@gardenista); b) Palas verticais (@archiexpo).

- **Quebra sol (Brise soleil)**

O quebra sol (Figura 2.13) pode ser horizontal, vertical ou misto, podendo ser fixo ou móvel. Como o nome indica, um quebra sol fixo não permite qualquer tipo de regulação, por outro lado, os dispositivos móveis possibilitam fazer uma regulação conforme as necessidades mas têm custos de manutenção mais elevados (Silva, 2007).

O dispositivo horizontal protege a fachada dos raios solares de maior ângulo. O quebra sol vertical, é mais adequado para quando os raios solares se distanciam da perpendicularidade com a fachada, ou seja, nascer e pôr-do-sol. Por fim, uma solução mista acaba por ser a mais eficiente devido à existência de uma complementaridade entre os elementos (Silva, 2007).



Figura 2.13. Quebra sol (@archiexpo, 2019; @directindustry, 2019).

- **Estores venezianos**

De acordo com Calhau (2014), estores venezianos podem ser aplicados tanto no interior, como no exterior das janelas. Consistem num sistema de lamelas interligadas entre si através de fios, permitindo assim alterar as inclinações das lamelas ou mesmo recolhê-las na sua totalidade, sendo que, estas podem ser côncavas, convexas ou planas. Phillips (2004), também faz referência a sistemas mais avançados onde as lamelas podem ter inclinações diferentes, permitindo as lamelas superiores refletir os raios solares para o teto da divisão, obtendo um maior aproveitamento da luz natural, e as lamelas inferiores controlarem a luz natural indesejada refletindo-a para o exterior.

Também é de referir que existem estores venezianos verticais, tendo um funcionamento semelhante aos horizontais. Porém, tem a vantagem de permitir iluminâncias maiores nos planos de trabalho (Calhau, 2014).

2.4.2 Sistemas dinâmicos

Os sistemas de sombreamento estáticos não são capazes de responder a variações climáticas, sendo o seu maior grau de eficiência correspondente apenas a uma data e hora específicas ao longo do dia e do ano (Al-masrani & Al-obaidi, 2019). Por outro lado, os sistemas de sombreamento móveis, ao serem operados manualmente, regularmente são posicionados de forma a responderem ao pior cenário, sendo mantidos nesta posição por longos períodos provocando a ineficiência do sistema (Konstantoglou & Tsangrassoulis, 2016). Neste contexto e com o avanço das tecnologias surgiu a necessidade de criar sistemas de sombreamento dinâmicos, capazes de responder às variações externas ou internas de forma a melhorar a eficiência energética e o conforto térmico dos edifícios (Al-masrani & Al-obaidi, 2019).

Um sistema de dinâmico é composto por elementos móveis que funcionam através de um algoritmo, sendo a resposta automática às variações climáticas, externas ou internas, a principal característica. A aplicação deste tipo de sistemas necessita uma rede de sensores para recolher dados, de um controlador para determinar a ação e de atuadores mecânicos (Al-masrani & Al-obaidi, 2019).

De acordo com Al-masrani & Al-obaidi (2019) existem dois tipos de controlo destes sistemas dinâmicos, controlo através de um circuito de ciclo aberto ou um circuito de ciclo fechado como representado na Figura 2.14. O controlo feito através de um ciclo aberto controla o sistema ativando diretamente o controlador sem ter em consideração se o resultado final é realmente o desejado. Em alternativa, o um circuito de ciclo fechado compara o resultado obtido com o resultado desejado, de forma a reduzir o erro, melhorando assim a eficiência do sistema.

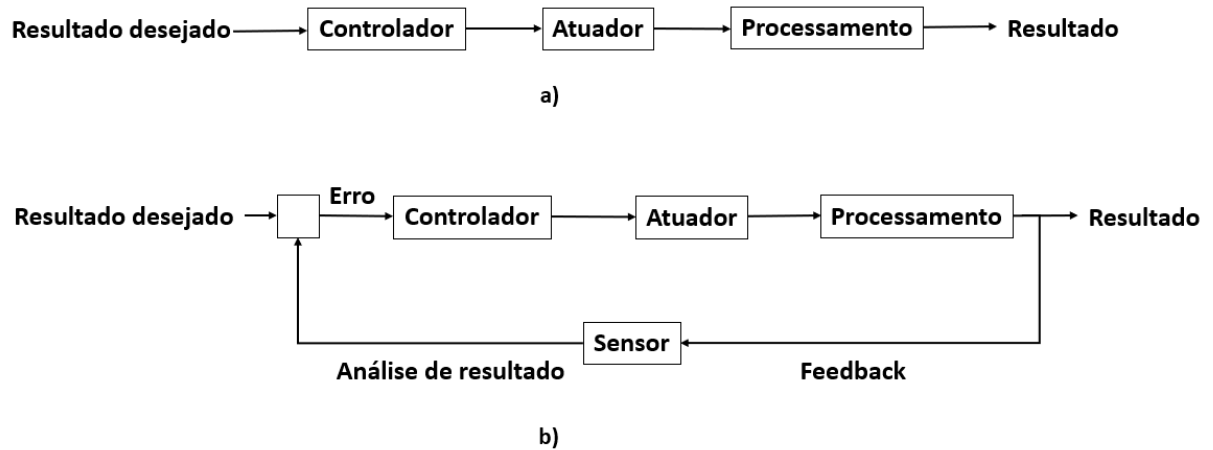


Figura 2.14. Tipos de sistemas dinâmicos: a) Circuito de ciclo aberto; b) Circuito de ciclo fechado (Adaptado de Al-masrani & Al-obaidi, 2019).

Os sistemas dinâmicos também podem ser caracterizados como sistemas reativos ou sistemas interativos. Um sistema reativo utiliza um controle de ciclo aberto para controlar os ganhos solares e iluminação natural, o qual responde de forma previamente definida a cada estímulo que receba, tais como o ângulo de incidência dos raios solares ou níveis de iluminação. As torres de Al-Bahr, (Figura 2.15) localizadas em Abu Dhabi são um exemplo de um sistema reativo, controlando a configuração dos painéis conforme o ângulo de incidência dos raios solares (Al-masrani & Al-obaidi, 2019).



Figura 2.15. Sistemas de sombreamento reativo aplicado nas Torres Al-Bahr, Abu Dhabi (@livinspaces, 2020; @blogdaarquitectura, 2020).

Os sistemas dinâmicos interativos caracterizam-se por conjugar a necessidades climáticas com as necessidades do ocupante. Para tal ser possível estes sistemas utilizam um controlo com circuito fechado podendo assim regular os ganhos solares ou a entrada de iluminação natural de acordo com as preferências ou necessidades para a execução de cada tarefa dos ocupantes do edifício (Al-masrani & Al-obaidi, 2019).

2.4.3 Sombreamento com árvores e vegetação

A existência de espaços verdes em ambientes urbanos tem um efeito positivo no combate ao efeito das ilhas de calor (Adedoyin et al., 2014). A utilização de árvores e vegetação traduz-se num efeito de arrefecimento passivo, uma vez que estas permitem fazer sombreamento através do bloqueio da luz solar na copa das árvores, reduzindo as temperaturas superficiais dos edifícios, assim como dos pavimentos, e também conseguem reduzir a temperatura da envolvente devido à evapotranspiração (Dias, 2016). Desta forma é possível reduzir o consumo energético de um edifício, por exemplo, de acordo com Adedoyin et al., (2014), uma simulação realizada na cidade de Chicago concluiu que é possível reduzir os custos de arrefecimento e aquecimento em 8% numa casa nova, apenas com a utilização de três árvores com 7.6 metros em seu redor.

Contudo, para usar árvores como forma de sombreamento deve-se ter em conta vários fatores, tais como: i) a altura da árvore, ii) o tipo de árvore selecionada, porque árvores de folha caduca protegem da radiação solar no verão, mas permitem a sua passagem na estação de aquecimento, Figura 2.16, sendo que a densidade da folhagem também é importante de forma a conseguir uma sombra mais densa e iii) a distância ao edifício (Hsieh, Li, et. al., 2018; Maleki, 2011).

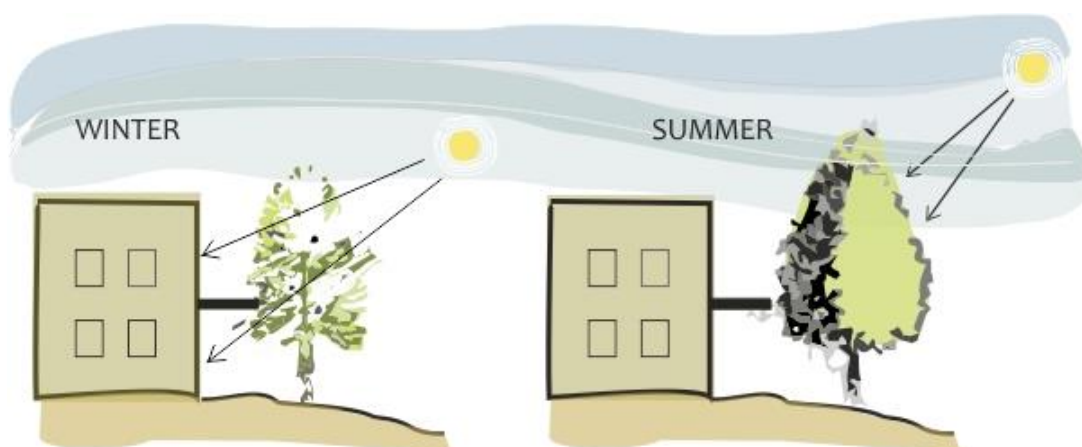


Figura 2.16. Sombreamento com árvore de folha caduca no inverno e no verão (@nzeb, 2019).

3 CASO DE ESTUDO

3.1 Metodologia

Neste capítulo pretende-se fazer uma avaliação do impacto que os ganhos solares podem ter num compartimento, mais concretamente numa sala de aulas, relativamente às suas necessidades energéticas. De forma a fazer esta avaliação realizou-se um estudo paramétrico numa sala de aula do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Para fazer este estudo recorreu-se ao software DesignBuilder (@designbuilder, 2020) para simular os possíveis ganhos energéticos que são obtidos através da radiação solar, bem como a iluminação natural. Na modelação tridimensional da sala de aula teve-se em conta os parâmetros construtivos reais da envolvente térmica, obtidos através de consulta do Caderno de Encargos, projeto de estabilidade e dissertações anteriores. Para além destes parâmetros também se calibrou e validou, termicamente, o modelo tridimensional através da comparação dos resultados simulados com registos feitos durante 36 dias na sala.

3.2 DesignBuilder

O DesignBuilder é uma programa de simulação dinâmica avançada do comportamento térmico e eficiência energética de edifícios que o utiliza de forma integrada o EnergyPlus para calcular resultados de desempenho térmico dos edifícios. Sendo utilizado normalmente para:

- Cálculo do impacto de diversas opções de projeto no consumo de energia;
- Avaliação de diferente tipos de fachada em relação ao aquecimento excessivo e aparência visual;
- Simulação térmica de edifícios ventilados naturalmente;
- Cálculo de poupança de eletricidade devido ao uso de iluminação natural;
- Previsão de distribuição de iluminação natural através de simulações Radiance ou Daysim;
- Visualização de sistemas de sombreamento;
- Dimensionamento de equipamentos de aquecimento e arrefecimento;
- Análises de ciclo de vida (@designbuilder, 2020).

Salienta-se que o Energyplus é um programa gratuito e multiplataforma, sendo o seu desenvolvimento financiado pelo *Building Technologies Office* do Departamento de Energia dos EUA. Este é um programa de simulação energética em edifícios que permite analisar os

consumos de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação e uso de água (@EnergyPlus, 2020).

O interface do programa, Figura 3.1, é bastante simples e intuitivo permitindo a criação de um modelo tridimensional com todas as características e materiais construtivos de cada projeto.

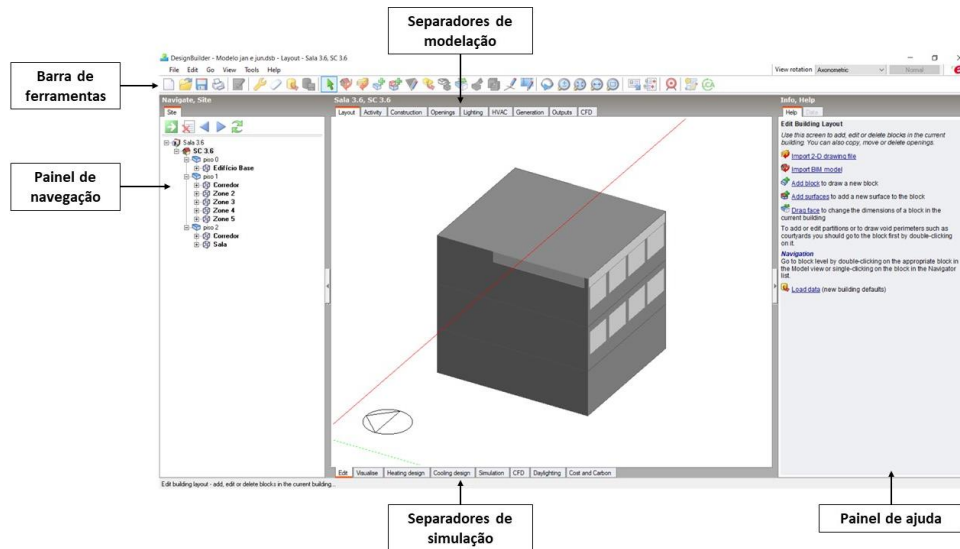


Figura 3.1. Interface do DesignBuilder.

3.3 Modelação tridimensional

3.3.1 Descrição da sala

A sala escolhida para a realização deste estudo foi a sala S.C. 3.6, Figura 3.2, situada no terceiro piso do departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, no polo II.



Figura 3.2. Localização da sala S.C. 3.6 no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (@google/maps, 2020).

A escolha recaiu sobre esta sala devido ao seu fácil acesso para realizar medições, mas também devido à sua semelhança com uma grande parte das salas do departamento em dimensões, orientação e envolvente. Relativamente às dimensões internas, esta sala tem um comprimento de 8.80 metros e largura de 6.08 metros, sendo que o corredor tem uma largura de 3.43 metros como é possível verificar na Figura 3.3. Na fachada exterior tem quatro janelas com 1.97 metros largura e 1.55 metros de altura, espaçadas 28.5 cm entre si.

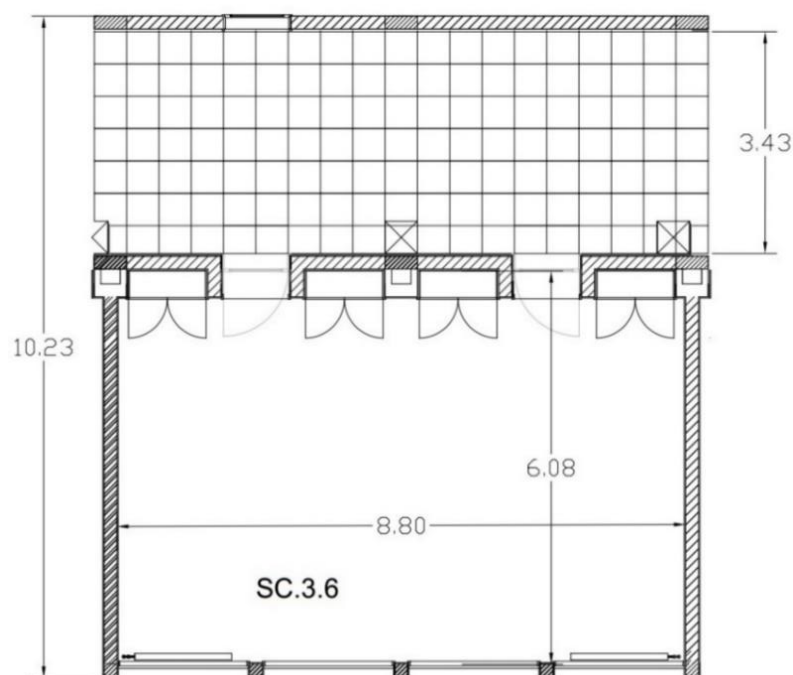


Figura 3.3. Planta da sala S.C. 3.6, Departamento de Engenharia Civil, FCTUC.

3.3.2 Parâmetros construtivos

De forma a conseguir fazer uma simulação térmica o mais real possível é necessário conhecer os parâmetros construtivos da envolvente da sala. Estes parâmetros foram recolhidos através da consulta do caderno de encargos e do projeto de estabilidade do departamento, bem como de duas dissertações (Gonçalves, 2017; Oliveira, 2016) uma vez que os dados disponíveis para consulta se revelaram insuficientes.

Assim, a envolvente da sala foi considerada da seguinte forma:

- Parede exterior com 27 cm de espessura, constituída por 21.5 cm de betão, 4 cm de isolamento XPS pelo exterior, 1 cm reboco na face interior e 0.5 cm de barramento final da face exterior.
- Paredes interiores com 22 cm, sendo 20 cm de alvenaria simples de tijolo cerâmico furado e 1 cm de reboco em cada face.

- Cobertura constituída por 1cm de reboco, 25 cm de laje fungiforme, 0.1 cm de tela em PVC, 6 cm de XPS e 5 cm de gravilha.
- Piso intermédio com 1cm de reboco, 30 cm laje fungiforme e 1 cm de parquet de eucalipto na sala e 1cm de mármore no corredor.
- Janelas com caixilharia em ferro com vidro duplo claro de 3 mm, com uma caixa de ar de 10 mm da marca Climalit e dispositivo de sombreamento de persianas laminadas orientáveis.

3.3.3 Modelação

Para efetuar o estudo pretendido com o maior rigor e exatidão possível, é fundamental replicar as condições reais existentes na sala no software. Assim é necessário definir diversos parâmetros durante a modelação, tais como a localização, os dados climáticos, parâmetros construtivos da envolvente e atividade na sala. Sendo que, o coeficiente de transmissão térmica (U) da envolvente opaca e envidraçada, as infiltrações e o sombreamento têm o maior relevo na modelação.

Refira-se que a modelação teve por base um modelo gerado pelo ex-aluno Gonçalo Oliveira durante a realização do seu trabalho de dissertação (Oliveira, 2016), mantendo-se essencialmente a estrutura tridimensional, sendo feito de seguida todas as alterações necessárias.

Apresentam-se de seguida os diversos parâmetros:

- **Localização**

Tal como referido anteriormente, a sala objeto de estudo encontra-se no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. O software tem integrada uma base de dados com as várias cidades do país onde se encontram todos os dados geográficos, no entanto estes dados foram adaptados para a localização exata da sala em estudo. No Quadro 3.1 é possível ver os dados adotados no modelo.

Quadro 3.1. Dados geográficos.

Localização	Latitude	Longitude	Elevação acima do mar	Fuso Horário
Coimbra, Portugal	40.186°	-8.415°	54 metros	GMT ⁽¹⁾

⁽¹⁾ GMT – Greenwich Mean Time

- **Dados climáticos**

Da mesma forma que a localização, no software também é possível encontrar informação sobre os dados climáticos de cada cidade. Estes dados são de extrema importância para o estudo em causa, visto que têm influência nos resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

Contudo, os dados climáticos disponíveis não são representativos do período em estudo, pois estes dados têm origem em medições realizadas durante vários anos (geralmente 30 anos), sendo por isso considerados dados climáticos típicos de cada cidade. Neste sentido recolheu-se junto da empresa CoolHaven dados meteorológicos registados por eles na sua sede em 2019. Esta empresa encontra-se instalada no Coimbra iParque em Antanhol, ficando a 4.5km, em linha reta, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Para utilizar estes dados no modelo foi necessário alterar o ficheiro “PTR_COIMBRA_IWEC” disponível no programa, sendo possível ver os parâmetros alterados no Quadro 3.2. De referir que a radiação direta normal foi obtida através de uma folha de cálculo, que tem em consideração a localização, data e hora, a radiação global e a radiação difusa.

Quadro 3.2. Parâmetros climáticos registados na empresa CoolHaven.

Temperatura Ambiente	[°C]
Temperatura de Orvalho	[°C]
Humidade Relativa	[%]
Pressão Atmosférica	[Pa]
Radiação Infravermelha	[Wh/m ²]
Radiação Global Horizontal	[Wh/m ²]
Radiação Direta Normal	[Wh/m ²]
Radiação Difusa Horizontal	[Wh/m ²]
Direção do vento	[Deg]
Velocidade do vento	[m/s]

- **Parâmetros construtivos**

A sala em estudo encontra-se no terceiro piso do edifício, como tal para modelar a sua envolvente foi utilizado um bloco com 3 metros de altura de forma a simular o 1º piso e foi modelado o 2º piso (Figura 3.4) com as mesmas características térmicas do piso em estudo. As paredes laterais, que são comuns a outras salas adjacentes, foram consideradas como adiabáticas. Representando as restantes salas no modelo, estas estariam sujeitas às “mesmas” condições, o que implicaria que as trocas de calor entre salas seriam insignificantes.

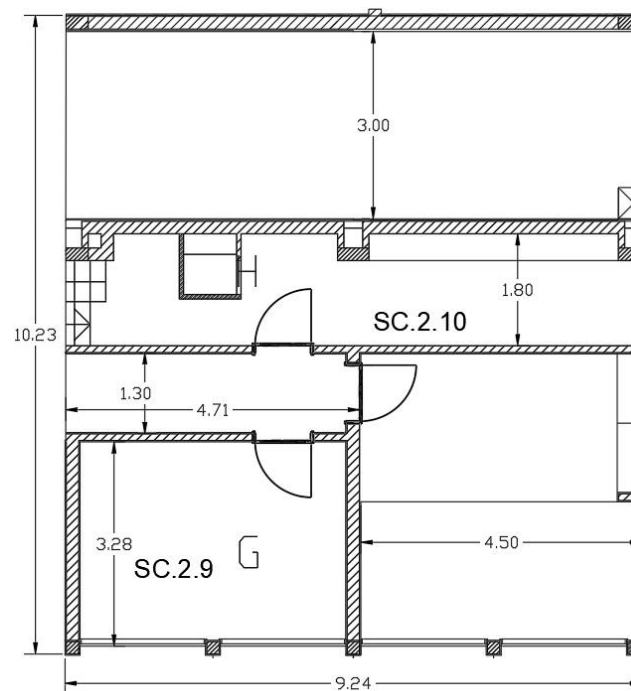


Figura 3.4. Planta parcial dos gabinetes no 2º Piso, Departamento de Engenharia Civil, FCTUC.

Utilizaram-se os parâmetros construtivos referidos no subcapítulo 3.3.2, assim optou-se por fazer a modelação por camadas utilizando os coeficientes térmicos referidos no livro “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios” do LNEC (C. Santos & Matias, 2006). Apenas para a laje fungiforme e o tijolo de alvenaria se optou por utilizar a resistência térmica tabelada, visto que a condutibilidade térmica não está referenciada. Nos restantes materiais foram aplicados os valores tabelados de condutibilidade térmica, tendo sido posteriormente calculada a resistência térmica.

As especificações adotadas, para a envolvente opaca, podem ser consultadas no Quadro 3.3, bem como o coeficiente de transmissão térmica (U) obtido através do software, tendo sido este coeficiente validado através de comparação com resultados obtidos no Excel. Na Figura 3.5 é possível ver as secções dos diferentes elementos construtivos.

Quadro 3.3. Especificações térmicas dos elementos construtivos da envolvente opaca.

Elemento	Material	Espessura [cm]	Massa volumica, ρ [kg/m ³]	Cond. térmica, λ [W/(m. ^o C)]	Resistência térmica, R ⁽³⁾ [(m ² . ^o C)/W]	Referência	Coef. de transmissão térmica, U [W/(m ² . ^o C)]; DesignBuilder
Parede exterior	Rse ⁽¹⁾	-	-	-	0.040	ITE50, Quadro I.3	0.726
	Reboco delgado	0.5	1100	0.700	0.007	DesignBuilder	
	XPS	4.0	40	0.037	1.081	ITE50, Quadro I.1	
	Betão	21.5	2400	2.000	0.108	ITE50, Quadro I.2	
	Reboco	1.0	1800	0.800	0.013	ITE50, Quadro I.2	
Paredes interiores	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.130	ITE50, Quadro I.3	1.242
	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.130	ITE50, Quadro I.3	
	Reboco	1.0	1800	0.800	0.013	ITE50, Quadro I.2	
	Alvenaria	20.0	1700	2.600	0.520 ⁽⁴⁾	ITE50, Quadro I.5	
	Reboco	1.0	1800	0.800	0.013	ITE50, Quadro I.2	
Laje interior (Sala)	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.130	ITE50, Quadro I.3	1.540
	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.170	ITE50, Quadro I.3	
	Parquet de eucalipto	1.0	565	0.150	0.067	ITE50, Quadro I.2	
	Laje fungiforme	30.0	1300	1.000	0.300 ⁽⁴⁾	ITE50, Quadro I.9	
	Reboco	1.0	1800	0.800	0.013	ITE50, Quadro I.2	
Laje interior (Corredor)	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.100	ITE50, Quadro I.3	1.708
	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.170	ITE50, Quadro I.3	
	Mármore	1.0	2800	3.500	0.003	ITE50, Quadro I.2	
	Laje fungiforme	30.0	1300	1.000	0.300 ⁽⁴⁾	ITE50, Quadro I.9	
	Reboco	1.0	1800	0.800	0.013	ITE50, Quadro I.2	
Laje de Cobertura	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.100	ITE50, Quadro I.3	0.475
	Rse ⁽¹⁾	-	-	-	0.040	ITE50, Quadro I.3	
	Gravilha	5.0	2000	2.000	0.025	ITE50, Quadro I.2	
	XPS	6.0	40	0.037	1.622	ITE50, Quadro I.1	
	Tela em PVC	0.1	1200	0.150	0.007	ITE50, Quadro I.2	
	Laje fungiforme	25.0	1300	1.200	0.300 ⁽⁴⁾	ITE50, Quadro I.9	
Laje de Cobertura	Reboco	1.0	1800	0.800	0.013	ITE50, Quadro I.2	0.475
	Rsi ⁽²⁾	-	-	-	0.100	ITE50, Quadro I.3	

⁽¹⁾ Resistência térmica superficial exterior; ⁽²⁾ Resistência térmica superficial interior; ⁽³⁾ Os valores de resistência térmica dos materiais foram calculados com base nas suas condutibilidades térmicas (λ); ⁽⁴⁾ Valores retirados diretamente da referência bibliográfica.

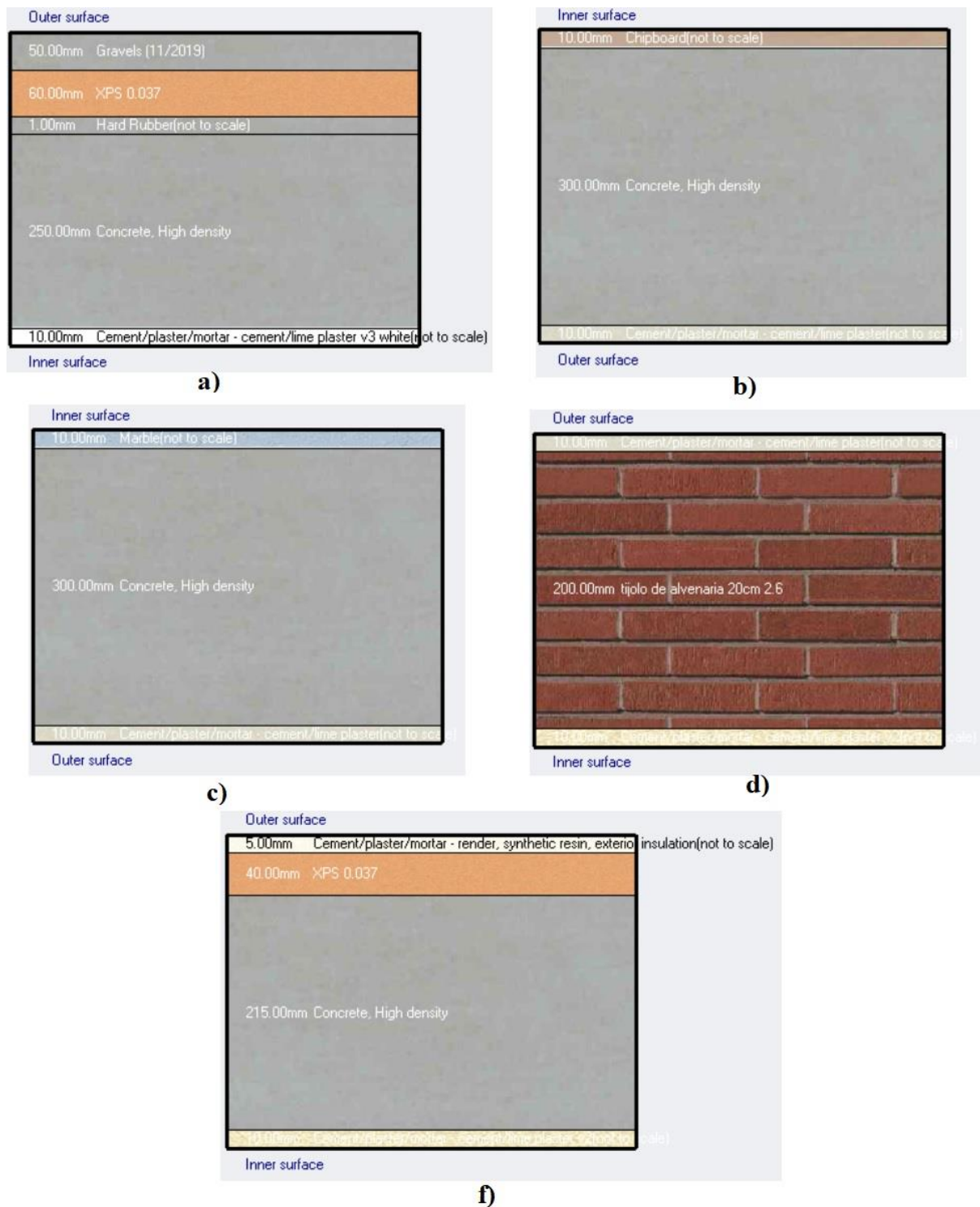


Figura 3.5. Secções dos elementos construtivos: a) Laje de cobertura; b) Laje interior na sala; c) Laje interior no corredor; d) Parede interior; f) Parede Exterior.

A envolvente envidraçada foi modelada respeitando os parâmetros construtivos indicados no subcapítulo 3.3.2. No Quadro 3.4 é possível ver as especificações de cada elemento, sendo que para os diferentes tipo de vidro o site CalumenLive.com foi a fonte de referência e a base de dados do DesignBuilder forneceu os dados relativos à caixilharia.

Quadro 3.4. Especificações dos elementos da envolvente envidraçada.

	Elemento	Material	Espessura [mm]	Coefficiente de transmissão térmica, U [W/(m ² .°C)]	Factor Solar, g	Transmissão Luminosa, TL	Referência
Janela	Vidro Duplo	Vidro corrente claro	3	3	0.81	0.83	CalumenLive
		Ar	10				
		Vidro corrente claro	3				
	Caixilharia	Ferro	50	5.88	-	-	DesignBuilder
Porta	Vidro simples	Vidro PARSOLGRAY	3	5.8	0.71	0.63	CalumenLive
	Caixilharia	Madeira	20	3.633	-	-	DesignBuilder

Na Figura 3.6 mostra-se como estes dados são inseridos no software.

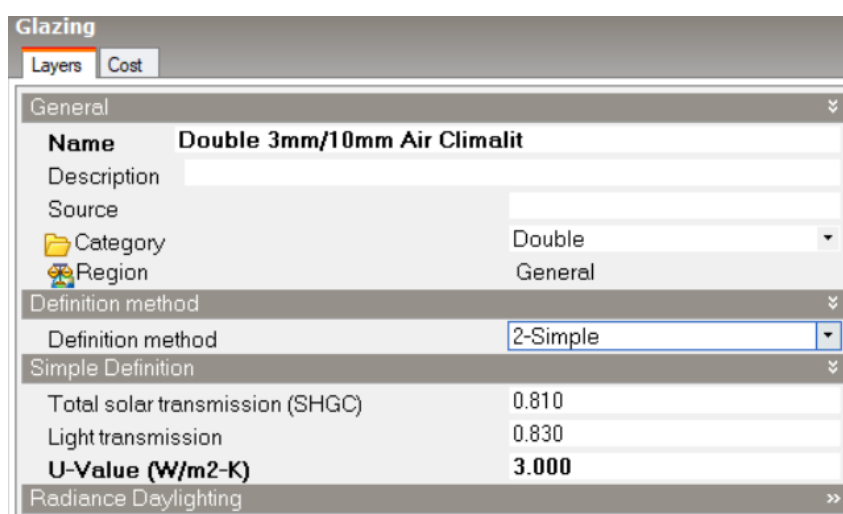


Figura 3.6. Janela de modelação de tipo de vidro no DesignBuilder.

- **Atividade, iluminação e AVAC**

Para definir no modelo a atividade, iluminação e condições de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) teve-se em consideração que os registos de temperatura foram realizados num período de férias letivas e assim sendo, a sala não teve qualquer tipo de utilização.

A sala foi considerada desocupada, assim como todos os equipamentos desativados. Relativamente à iluminação, mais uma vez, estando a sala desocupada, esta também é considerada inexistente visto não ser necessária. Por fim, todos os equipamentos de arrefecimento ou aquecimento do ar foram considerados desligados. Por outro lado, a sala também não tem ventilação mecânica, sendo esta feita naturalmente através de abertura de portas ou janelas. No entanto, como a sala esteve fechada também se considerou não haver ventilação natural, existindo apenas infiltrações a uma taxa de 0.4 rph. Este valor de infiltrações não foi possível medir, assim inicialmente foi considerado um valor plausível, sendo posteriormente alvo de calibração.

3.4 Medições

De forma a ser possível validar o modelo termicamente foram realizadas medições de temperatura na sala durante 36 dias consecutivos. Nos primeiros 21 dias, de 31/07/2019 a 20/08/2019, as medições foram efetuadas com os dispositivos de sombreamento exteriores totalmente ativos, enquanto que nos 15 dias restantes, ou seja, até 04/09/2019, os dispositivos de sombreamento não se encontrava ativos.

Estas medições foram efetuadas com dois data-loggers da marca Tinytag, modelo Plus 2 – TGP-4500 (Figura 3.7). Na Figura 3.8 é possível ver o posicionamento deste no interior da sala.



Figura 3.7. Data logger - Tinytag Plus 2 - TGP-4500 (@geminidataloggers, 2020).



Figura 3.8. Posicionamento dos data-loggers na sala.

Na Figura 3.9 apresentam-se os registos efetuados com o dispositivo de sombreamento ativo. Neste período a temperatura média exterior foi de 19.80°C e a temperatura média no interior da sala foi de 25.31°C, sendo a máxima e mínima de 26.77 °C e 23.77 °C, respetivamente. Na

Figura 3.10 apresentam-se os registo no período no qual o dispositivo de sombreamento não estava ativo. Neste espaço temporal a temperatura máxima registado foi de 32.05 °C e a mínima 24.70 °C, sendo a temperatura média interior de 28.11 °C e a temperatura média exterior de 21.40°C.

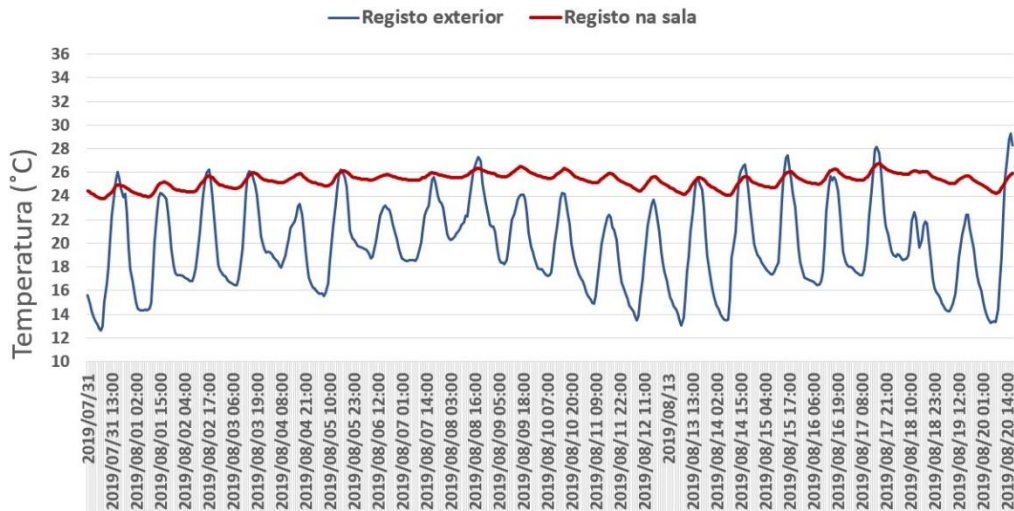


Figura 3.9. Registo de temperatura no interior da sala com o sistema de sombreamento ativo.

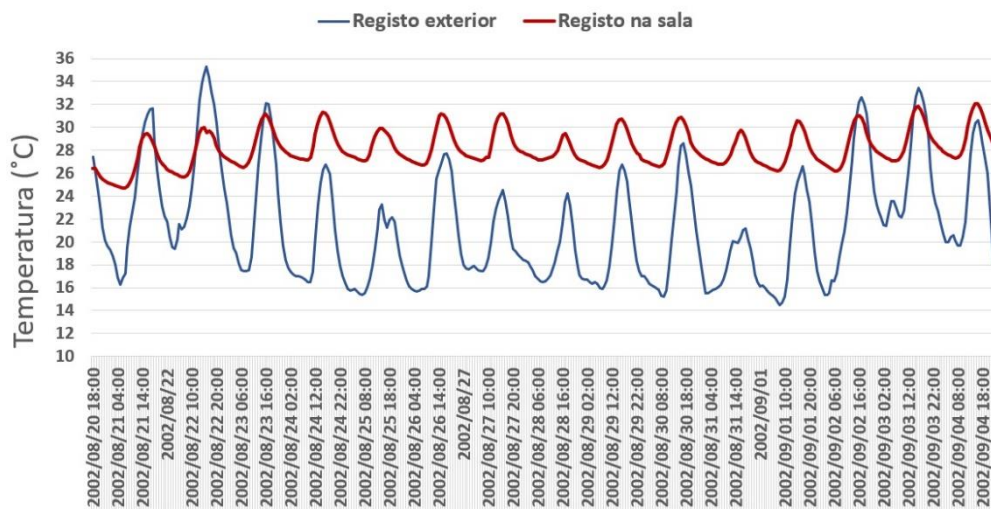


Figura 3.10. Registo de temperatura no interior da sala sem sistema de sombreamento.

3.5 Calibração do modelo

De forma a garantir que os resultados obtidos através de simulações são válidos e confiáveis, é indispensável calibrar o modelo em relação a dados reais. Esta calibração é feita através da comparação dos dados obtidos através de simulações com o dados registados, sendo que ao existirem discrepâncias é necessário avaliar o motivo e fazer os ajustes necessários ao modelo.

Para comparar os dois conjuntos de dados foi utilizada a função raiz do erro quadrático médio (“*root mean square error*”, RMSE), Equação 3.1. Esta função compara o erro existente entre os dados registados e os resultados obtidos através de simulações, tendo unidades iguais às unidades dos dados em análise. Quanto menor for o erro, mais próximos os resultados simulados estarão dos dados registados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3.1)$$

Avaliaram-se os resultados obtidos para o modelo inicial na situação em que a sala se encontra sem sombreamento, visto neste caso a maior incerteza ser a taxa de infiltrações de ar. Esta simulação foi realizada a partir do dia 23 de agosto, uma vez que não foi possível replicar o período de transição entre o período em que o dispositivo de sombreamento esteve ativo e o período sem sombreamento.

Como é possível observar na Figura 3.11, existe um erro de 0.75°C entre os registos e os resultados gerados através do modelo.

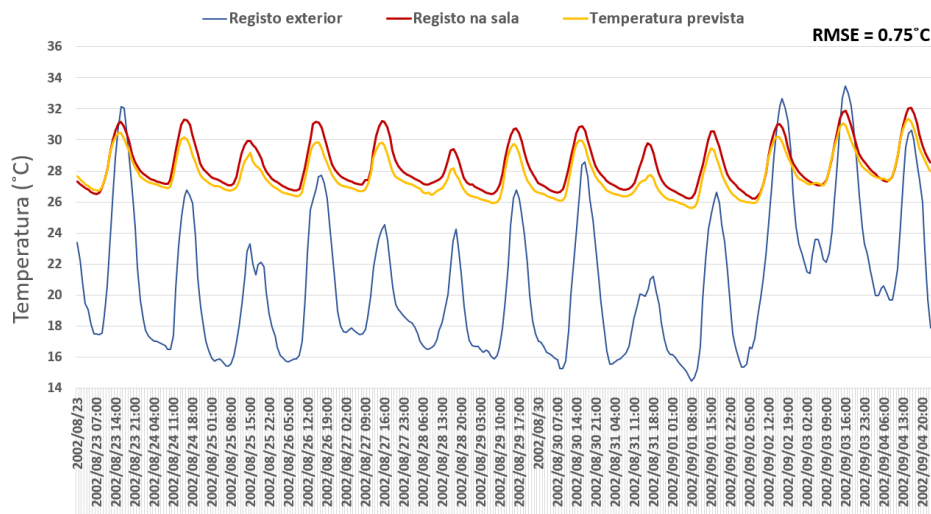


Figura 3.11. Comparação entre temperaturas registadas e simuladas, considerando infiltrações com uma taxa de 0.4 rph.

De forma a melhorar os resultados gerados pelo modelo foi feito um estudo paramétrico para as duas variáveis no modelo que não foram possíveis obter através de dados reais. Assim, começou-se por estudar o parâmetro de infiltrações de ar, tendo sido de seguida avaliado o sistema de sombreamento, com as lâminas em diferentes inclinações.

No Quadro 3.5 apresenta-se os cinco cenários estudados para o parâmetro de infiltrações de ar.

Quadro 3.5. Cenários para calibração do parâmetro infiltrações de ar.

	Registo na sala	Cenário 1 rph=0.10	Cenário 2 rph=0.20	Cenário 3 rph=0.25	Cenário 4 rph=0.30	Cenário 5 rph=0.40
Temp. média [°C]	28.31	29.43	28.75	28.44	28.17	27.69
RMSE [°C]	-	1.22	0.63	0.46	0.45	0.75

Na Figura 3.12, de forma a facilitar a análise gráfica, apenas se apresenta graficamente os três cenários que apresentaram os melhores resultados. Assim conclui-se que o cenário 4 representa melhor a realidade, apresentando apenas um erro de 0.45°C em relação aos dados registados no período de comparação.

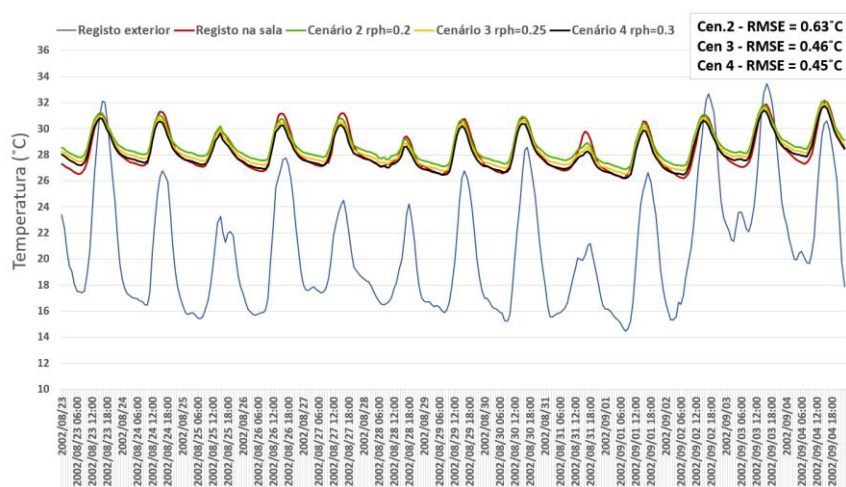


Figura 3.12. Comparação entre temperaturas registadas no interior da sala e temperaturas simuladas em diferentes cenários de infiltrações de ar.

Tendo assim estabelecido o valor mais correto para o parâmetro de infiltrações de ar. De seguida fez-se um estudo paramétrico de forma avaliar qual seria a opção mais válida em relação ao dispositivo de sombreamento.

Os dispositivos de sombreamento, para este estudo paramétrico, foram escolhidos a partir da base de dados do DesignBuilder, visto, como referido anteriormente, não se conhecer as características reais do dispositivo instalado na sala. Na Figura 3.13 apresentam-se os parâmetros que é possível editar no software em relação aos dispositivos de proteção solar disponíveis na base de dados. Para este estudo foram escolhidos dois tipos de dispositivos, um com lâminas de alta refletividade e outro de baixa refletividade, tendo-se apenas modificado o ângulo de inclinação em ambos os dispositivos. Este ângulo de inclinação é o ângulo entre a normal do vidro exterior e a normal da lâmina de sombreamento, ou seja, com um ângulo de 0° as lâminas estarão na vertical.

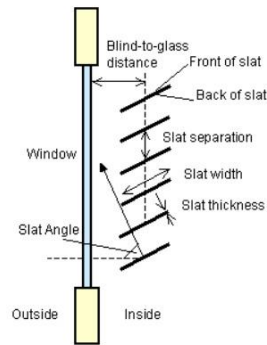


Figura 3.13. Parâmetros editáveis do dispositivo de sombreamento.

No Quadro 3.6 apresentam-se os seis diferentes cenários que foram alvo de estudo, de forma a avaliar qual seria a melhor opção para o modelo.

Quadro 3.6. Cenários para calibração do sistema de sombreamento.

	Registo na sala	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Cen. 4	Cen. 5	Cen. 6
		Persiana de alta refletividade				Persiana de baixa refletividade	
		Lamelas a 45°	Lamelas a 120°	Lamelas a 135°	Lamelas a 160°	Lamelas a 135°	Lamelas a 160°
Temp. média [°C]	25.31	24.38	25.75	25.75	26.34	24.35	25.44
RMSE [°C]	-	1.02	0.65	0.68	1.24	1.05	0.64

Novamente, de forma a facilitar a análise gráfica, apenas se apresentam os três que obtiveram melhor resultados na Figura 3.14. Estes três cenários obtiveram resultados bastante semelhantes, no entanto o cenário 6 é que apresenta melhores resultados com um erro de 0.64°C em relação à temperatura registada na sala no mesmo período.

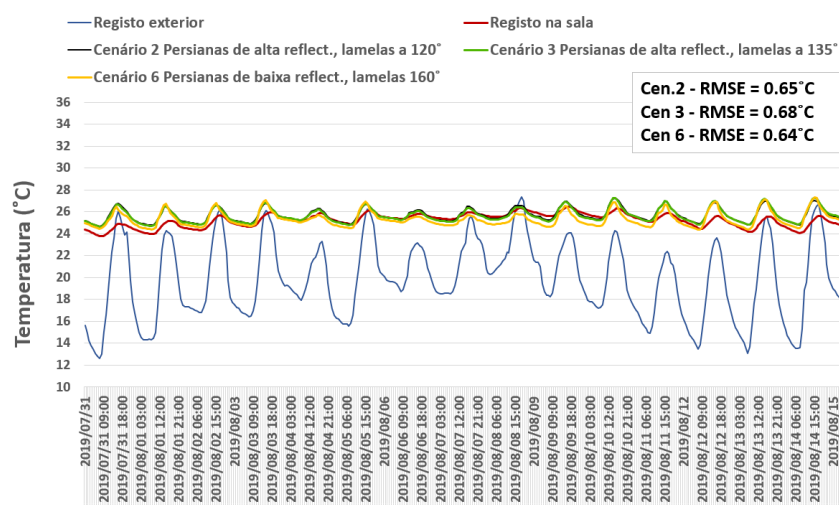


Figura 3.14. Comparação entre temperaturas registadas no interior da sala e temperaturas simuladas em diferentes cenários de dispositivos de sombreamento.

Assim com os resultados finais ilustrados na Figura 3.15, adotou-se para o modelo final infiltrações de ar com uma taxa de 0.3 rph e um dispositivo de sombreamento com lamelas de baixa refletividade e com uma inclinação de 160°. Desta forma considerou-se o modelo termicamente válido em ambos os casos, quer com o dispositivo de proteção ativo ou desativado. Como tal, os resultados que serão obtidos para diferentes simulações em diferente cenários podem ser considerados como válidos.

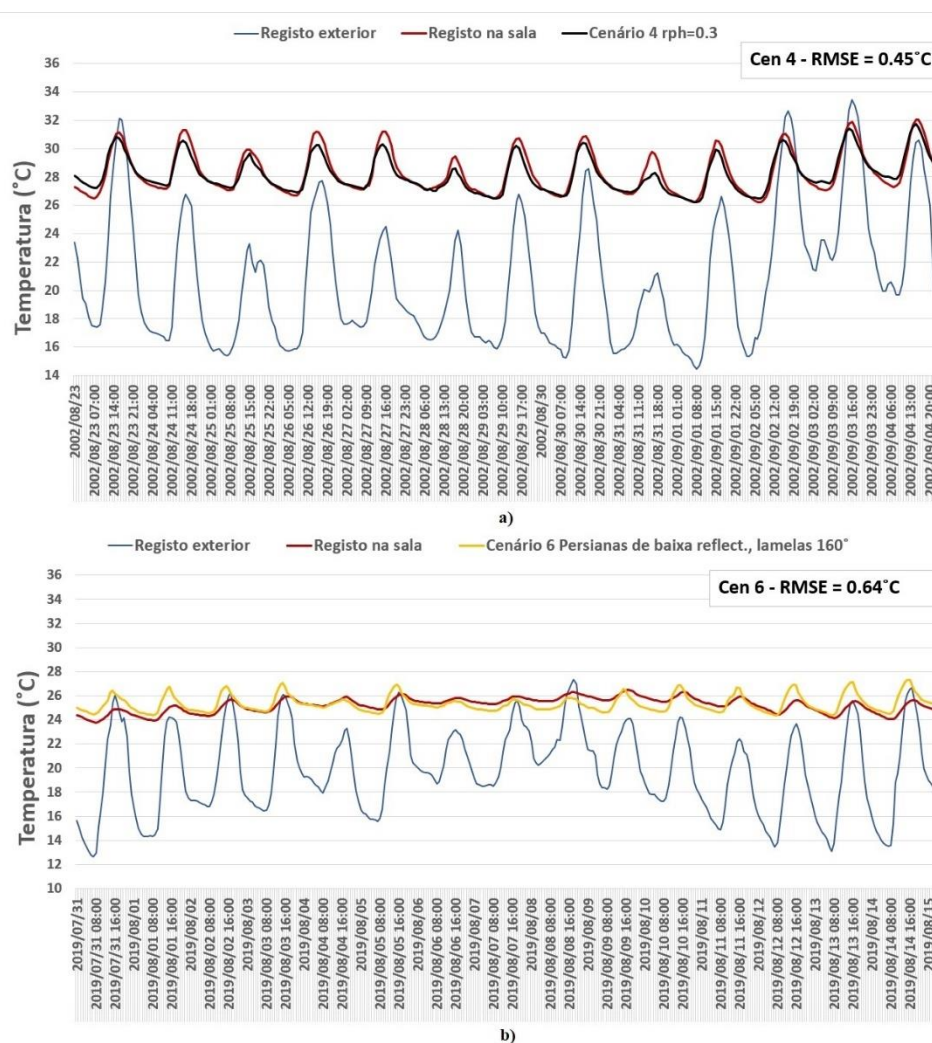


Figura 3.15. Resultados finais para validação de modelo: a) infiltrações de ar; b) sistema de sombreamento.

Apenas foi possível validar o modelo termicamente, ou seja, em termos de iluminação natural dentro da sala o modelo não foi validado. Isto deve-se ao facto de após o contacto com diversas entidades tais como, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) ou o Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA), entre outras, não ter sido possível obter o registo dos valores de iluminação natural exteriores.

4 ESTUDO PARAMÉTRICO

Neste estudo paramétrico tem-se como objetivo estudar o conforto térmico, os consumos energéticos e a sua relação com os ganhos solares na sala de aula numa situação de inverno e verão, tendo sido estudados os meses de janeiro e junho. Os dados climáticos utilizados foram, uma vez mais, os dados recolhidos nas instalações da empresa CoolHaven referentes ao ano 2019.

Foram estudados quatro cenários com o objetivo de concluir qual a melhor solução em termos de consumos energéticos, assim como de conforto térmico. Foi essencial estudar as estações de aquecimento e a de arrefecimento porque é expectável que a melhor solução para um mês de verão, não seja a melhor solução num mês de inverno, sendo assim necessário atingir um equilíbrio em termos anuais. Os quatro cenários estudados foram:

- Cenário 1 – Sala de aula sem dispositivo de sombreamento ativo;
- Cenário 2 - Sala de aula com o dispositivo de sombreamento totalmente ativo;
- Cenário 3 – Sala de aula com uma pala horizontal de sombreamento com 0.5 m;
- Cenário 4 – Sala de aula com uma pala horizontal de sombreamento com 1 m.

O cenário 1 e 2 são reais, tendo o modelo sido validado termicamente nestas duas situações, sendo os cenários 3 e 4 alternativas estudados de forma a comparar se seriam mais eficientes do que as existentes atualmente. Optou-se por estes dois cenários com palas visto ser um sistema de sombreamento passivo que tem a vantagem de protegerem os vãos envidraçados dos raios solares no verão, enquanto no inverno permitem a passagem destes devido ao menor ângulo de incidência na fachada.

4.1 Modelação

O modelo tridimensional foi previamente validado em termos térmicos, no entanto nesta fase foi necessário definir alguns parâmetros que não foram considerados previamente, visto não serem necessários por a sala não estar em atividade.

- **Horário de atividade**

Foi necessário definir um horário de atividade da sala de aula, tendo este sido também atribuído a todos os componentes tais como iluminação e sistema de AVAC. O horário definido de

funcionamento foi das 08:30h às 13:00h na parte da manhã e das 14:00h às 18:30h na parte da tarde.

- **Atividade**

Na modelação da atividade na sala, Figura 4.1, foi considerada uma ocupação de 20 pessoas, que corresponde 0.396 pessoas/m². A definição das temperaturas ideais foram feitas de acordo com o Regulamento de Desempenho de Energético dos Edifícios de Habitação (REH, 2013), o qual considera as temperaturas interiores de referência de 18°C e 25°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Em relação ao mínimo de ar fresco dentro da sala, mais uma vez, foi aplicada a legislação nacional utilizando o método prescritivo no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS, 2013), atribuindo assim um caudal de ar de 6.7 l/s-pessoa. Por fim, a iluminância pretendida no plano de trabalho, foi considerada de acordo com a norma EN12464-1 (2011), a qual recomenda 300 lux para uma sala de aula.

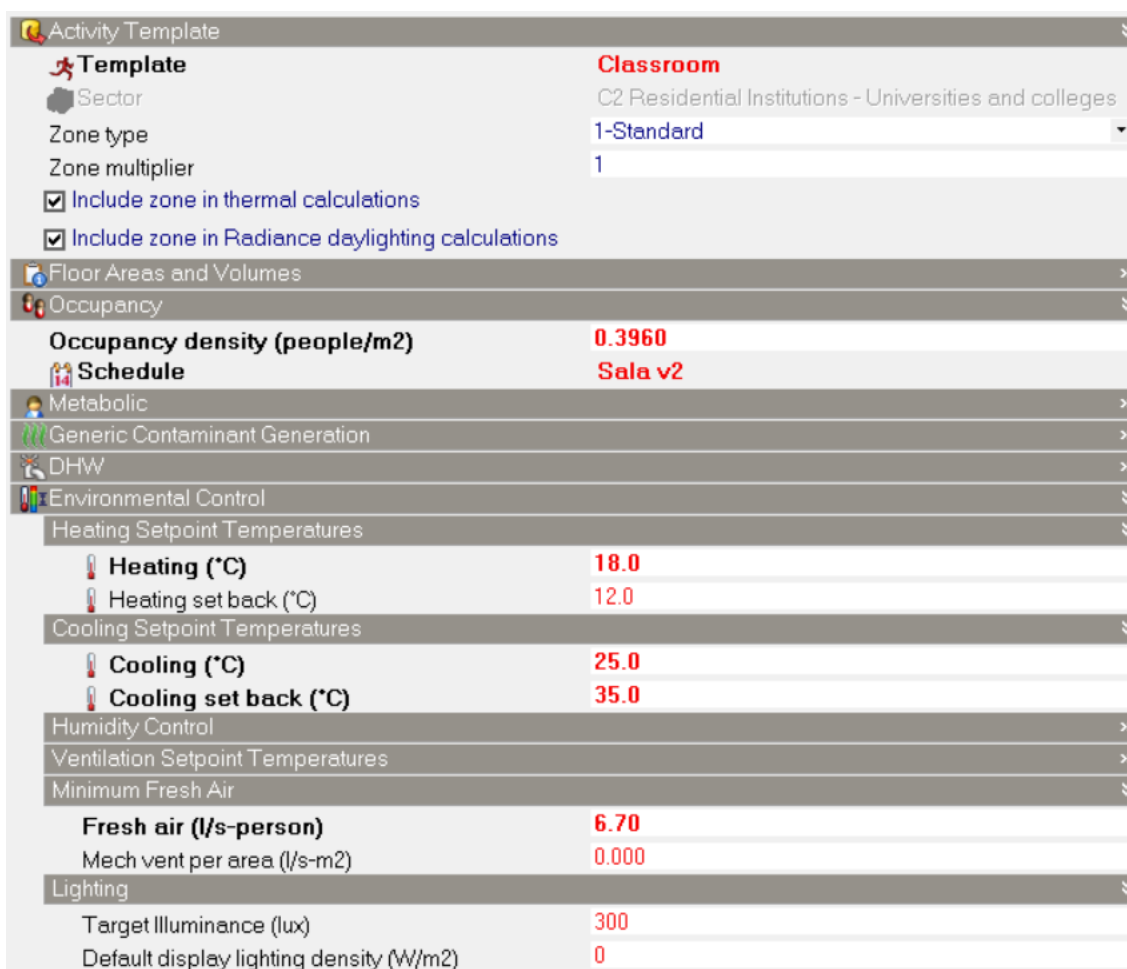


Figura 4.1. Janela de modelação de atividade no DesignBuilder.

- **Iluminação**

Na Figura 4.2 é possível ver os parâmetros utilizados para a modelação da iluminação na sala de aula. Esta tem 11 lâmpadas fluorescentes suspensas com uma potência de 58W cada uma, sendo que sala tem 59.30 m², ou seja, existe uma densidade de potência de 10.759 W/m². O tipo de controlo escolhido, para uma altura do plano de trabalho de 0.8m, foi “*linear/off*”. Este controlo liga a iluminação, na sua totalidade, sempre que a iluminação natural não conseguir cumprir os requisitos pretendidos (300 lux), sendo esta a solução que representa da melhor forma o que acontece na realidade.

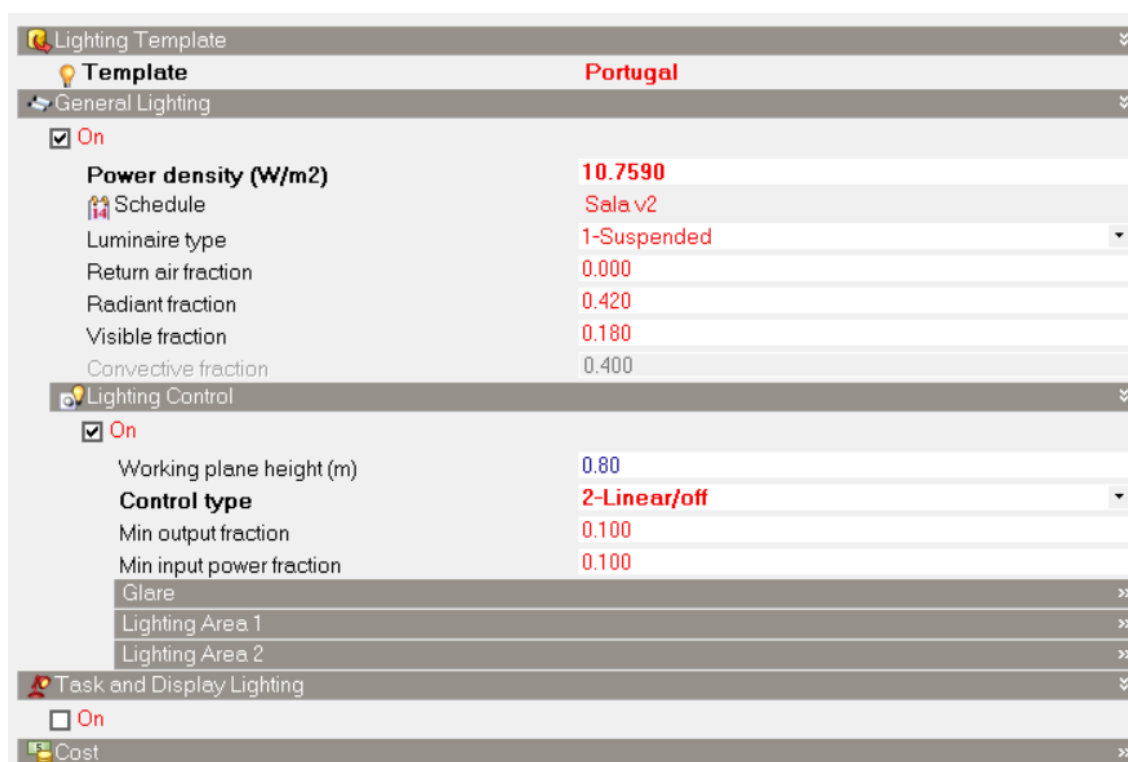


Figura 4.2. Janela de modelação da iluminação no DesignBuilder.

- **AVAC**

Na sala existe um sistema de ar condicionado, o qual permite aquecer e arrefecer, e um sistema de aquecimento de radiadores. No entanto em termos de modelação, considerou-se apenas o sistema de ar condicionado, uma vez que não foi possível quantificar a energia despendida e eficiência do sistema de radiadores apenas para a sala visto este sistema funcionar com uma unidade central para o edifício inteiro.

Na Figura 4.3 é possível ver os dados de modelação do sistema de AVAC, este é da marca Daikin tendo uma capacidade de aquecimento e arrefecimento de 5 kW. No entanto, apresenta coeficientes de desempenho (CoP) diferentes para aquecimento e arrefecimento. Enquanto

sistema de aquecimento apresenta um CoP de 3.23, mas como sistema de arrefecimento tem um CoP de 5.63 (@Daikin).

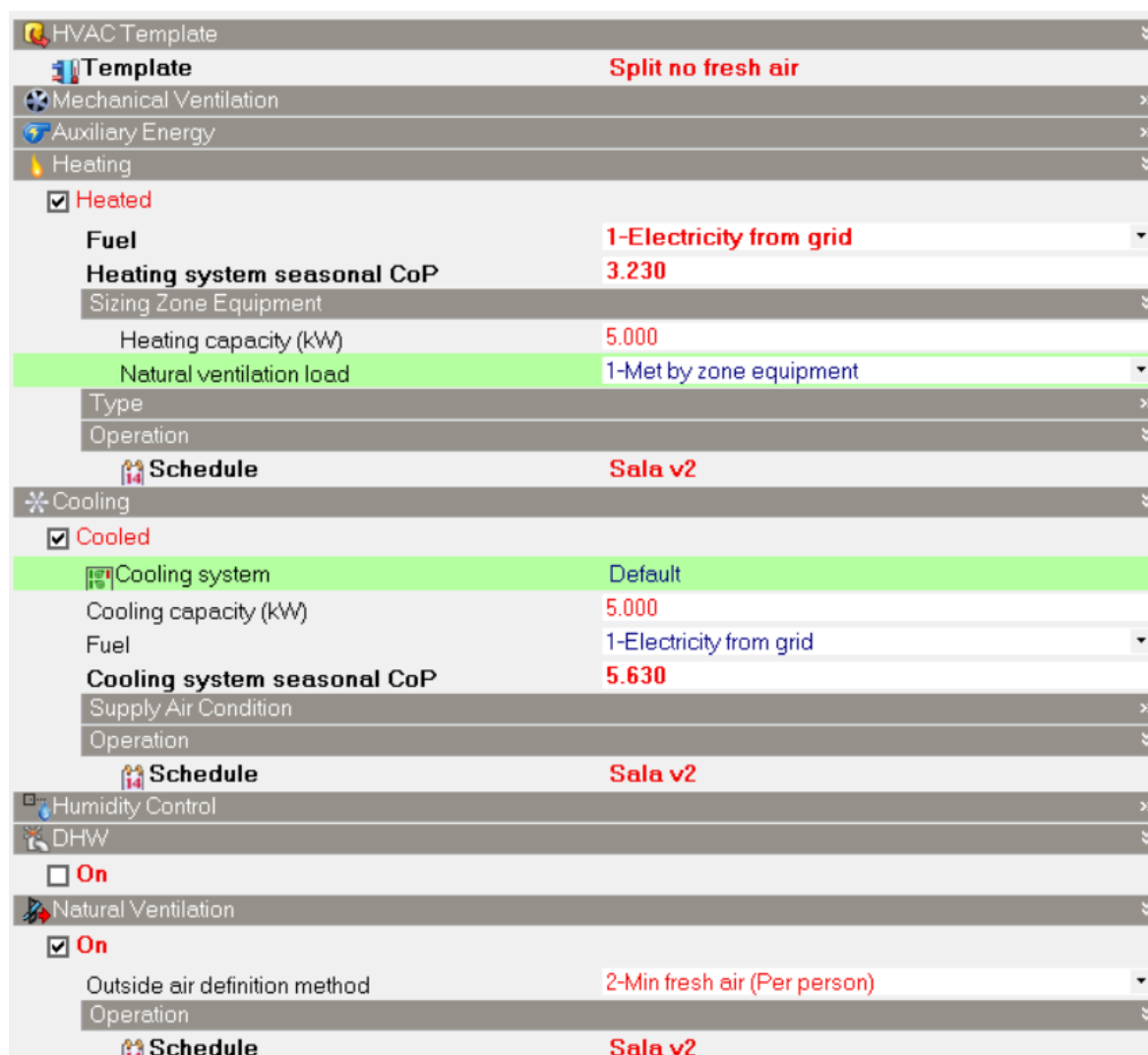


Figura 4.3. Janela de modelação de sistemas AVAC no DesignBuilder.

4.2 Discussão de resultados

4.2.1 Ganhos solares

Os ganhos solares através dos vãos envidraçados têm um papel muito importante na temperatura no interior da sala. Estes ganhos na estação de aquecimento são favoráveis, pois permitem ter uma temperatura mais confortável e assim utilizar menos energia para aquecimento. No entanto, na estação de arrefecimento é o inverso, quanto maior forem os ganhos solares maiores vão ser as necessidades de arrefecimento.

Na Figura 4.4.a é possível observar os ganhos solares previsto na sala para o mês de janeiro. Como seria expectável, foi no cenário 1, cenário de referência, que se obtiveram os maiores ganhos solares, 774.61 kWh, visto não existir qualquer tipo de impedimento da entrada da radiação solar na sala através do vãos envidraçados. Por outro lado no cenário 2, com a ativação do sistema de sombreamento na sua totalidade, observa-se uma redução de 97% de ganhos solares. Com a introdução de palas na fachada com 0.5 metros no cenário 3 e 1 metro no cenário 4 houve uma redução de 11% e 23%, respetivamente.

Na Figura 4.4.b apresentam-se os ganhos solares no interior da sala no mês de junho. Mais uma vez é no cenário 1 que se obtêm os maiores ganhos solares, apresentado um consumo de 374.34 kWh e no cenário 2, comparativamente, houve uma redução de 80%. Nos cenários 3 e 4 esta redução foi superior a 30% em ambos os casos, a qual poderá ter um impacto significativo na redução das necessidades de arrefecimento da sala.

Analisando a Figura 4.4.a e 4.4.b de forma conjunta, verifica-se que no inverno os ganhos solares no interior da sala são significativamente maiores do que no verão. Tal acontece devido ao ângulo de incidência dos raios solares nas janelas no inverno ser inferior ao de verão.

Mais uma vez na Figura 4.4.a e 4.4.b constata-se que no cenário 2 a redução de ganhos solares é bastante significativa tanto no inverno como no verão. Porém esta redução só é benéfica na estação de arrefecimento mas em ambos os casos, verão e inverno, implica um aumento bastante considerável do consumo elétrico para efeitos de iluminação, como se verá no subcapítulo seguinte. Por fim a partir dos cenários 3 e 4, também se verifica que a introdução de palas na fachada poderá ser benéfica numa perspetiva anual em relação a consumos de energia para climatização, uma vez que a redução de ganhos solares é mais significativa no verão do que no inverno. Sendo o cenário 3 o que apresenta melhores resultados, visto ter uma redução de 11% em janeiro e 31% em junho comparativamente com o cenário de referência.

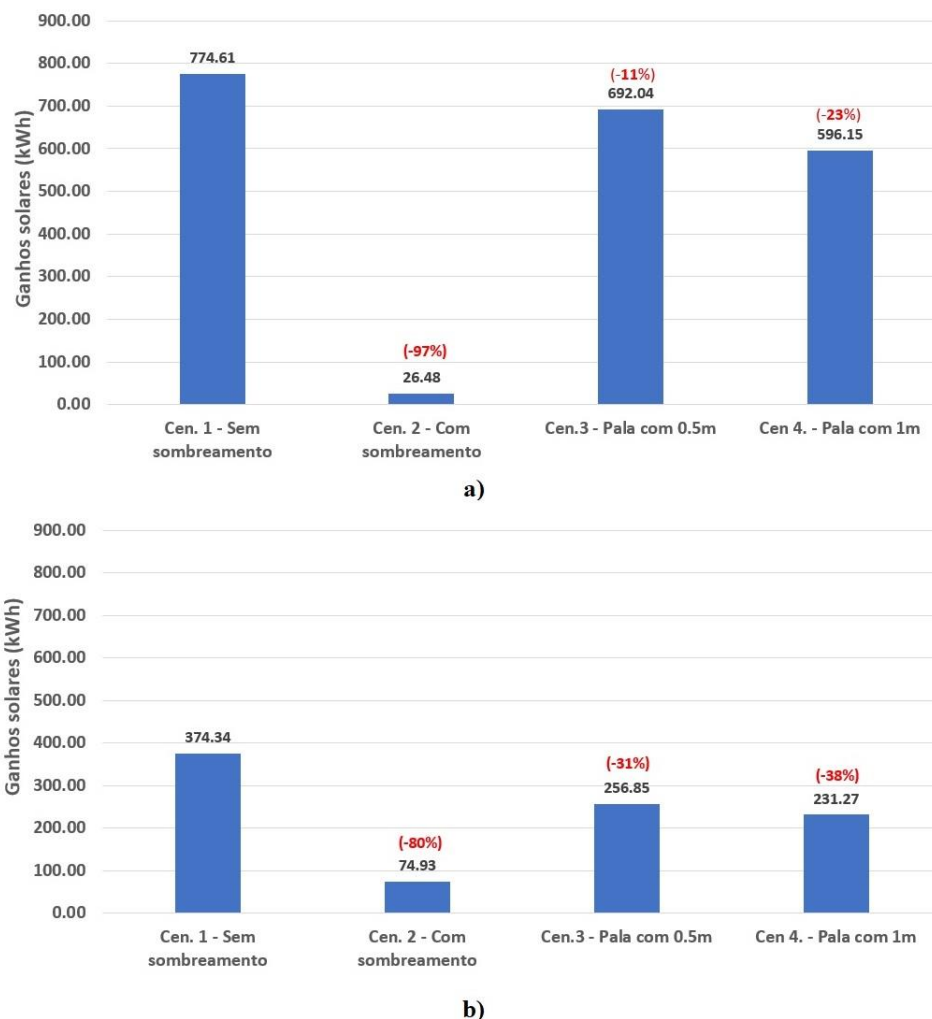


Figura 4.4. Ganhos solares no interior da sala em: a) janeiro; b) junho.

4.2.2 Consumos energéticos

Tendo analisado anteriormente os ganhos solares através dos vãos envidraçados, é importante analisar como estes influenciam os consumos de energia elétrica durante o funcionamento da sala.

Na Figura 4.5.a apresentam-se os consumos elétricos para o mês de janeiro. Prontamente observa-se que os gastos de eletricidade com iluminação foram bastante superiores aos gastos para aquecimento, representando mais de 70% do consumo global em todos os cenários.

Analisando novamente a Figura 4.5.a, verifica-se que o cenário 1 apresenta um consumo global de 78.26kWh, sendo 61.54kWh referentes a gastos com iluminação e 16.72kWh gastos com aquecimento. O cenário 2, devido ao bloqueio da radiação e iluminação solar através do dispositivo de sombreamento, apresenta um aumento de 163% no consumo global de energia

elétrica relativamente ao cenário 1. Em termos quantitativos este aumento é muito mais significativo na componente de iluminação do que no aquecimento, sendo que houve um aumento de 85.13 kWh e 42.27kWh, respetivamente.

Na Figura 4.5.a verifica-se que os cenários 3 e 4, comparativamente com o cenário 1, tiveram um aumento de 6% e 12%, respetivamente, no consumo global de energia elétrica. No entanto, este aumento de consumo é maioritariamente devido às necessidades de aquecimento, visto que o aumento para as necessidades de iluminação não foi superior a 1.5kWh em ambos os casos. Como seria de esperar, o cenário 4 apresenta o maior aumento de gastos de energia elétrica para aquecimento, visto ter tido a maior diminuição de ganhos solares, sendo este aumento de 8.22kWh.

Em relação ao mês de junho, apresenta-se na Figura 4.5.b os resultados obtidos para os quatro cenários. O cenário 1 apresenta um consumo global de energia elétrica de 24.56kWh, sendo 7.13kWh referentes a gastos para iluminação e 17.43kWh para arrefecimento.

Na Figura 4.5.b observa-se no cenário 2 um aumento de 438% no consumo global de energia elétrica em relação ao cenário 1. Este aumento é devido à ativação total do dispositivo de proteção solar, que assim bloqueia uma grande parte da radiação e iluminação natural. Consequentemente, a utilização deste dispositivo teve um impacto positivo nas necessidades de arrefecimento mas, por outro lado, teve um impacto bastante negativo nas necessidades de iluminação. Assim, houve um aumento de 111.57kWh para iluminação e uma diminuição de 4.05kWh para arrefecimento.

Para os cenários 3 e 4, Figura 4.5.b, verifica-se uma diminuição de 19% no consumo global de energética elétrica em ambos os cenários. Porém, esta diminuição global deve-se totalmente à diminuição das necessidade de arrefecimento, uma vez que, existe um ligeiro aumento com gastos de energia para iluminação. Também se verifica que é no cenário 4 que há menores necessidades de arrefecimento mas ao mesmo tempo existe uma maior utilização de luz artificial. Tal acontece, devido ao comprimento da pala ser 0.5 metros maior que no cenário 3 e assim bloquear mais radiação e iluminação solares diretas. No entanto conclui-se que no verão os dois cenários em termos globais de consumos elétricos apresentam os mesmo resultados, sendo o fator diferenciador os resultados obtidos no inverno.

Por fim, salienta-se que o cenário 2 tem necessidades de arrefecimento superior aos cenários 3 e 4, apesar de o dispositivo de sombreamento impedir de forma mais eficaz a radiação solar. Esta maior necessidade de arrefecimento deve-se à enorme utilização de iluminação artificial, uma vez que lâmpadas libertam calor para o meio ambiente da sala o que provoca um aumento da temperatura e assim uma consequente maior necessidade de arrefecimento.

Tendo por base esta análise, pode-se concluir que o cenário 3 (pala de sombreamento com 0.5 metros) é a melhor solução em termos de consumos energéticos, uma vez que obteve os melhores resultados entre os cenários estudados. Embora no inverno leve a um ligeiro aumento do consumo elétrico, este é compensado no verão, assim, numa perspetiva anual este cenário apresenta-se como o mais equilibrado.

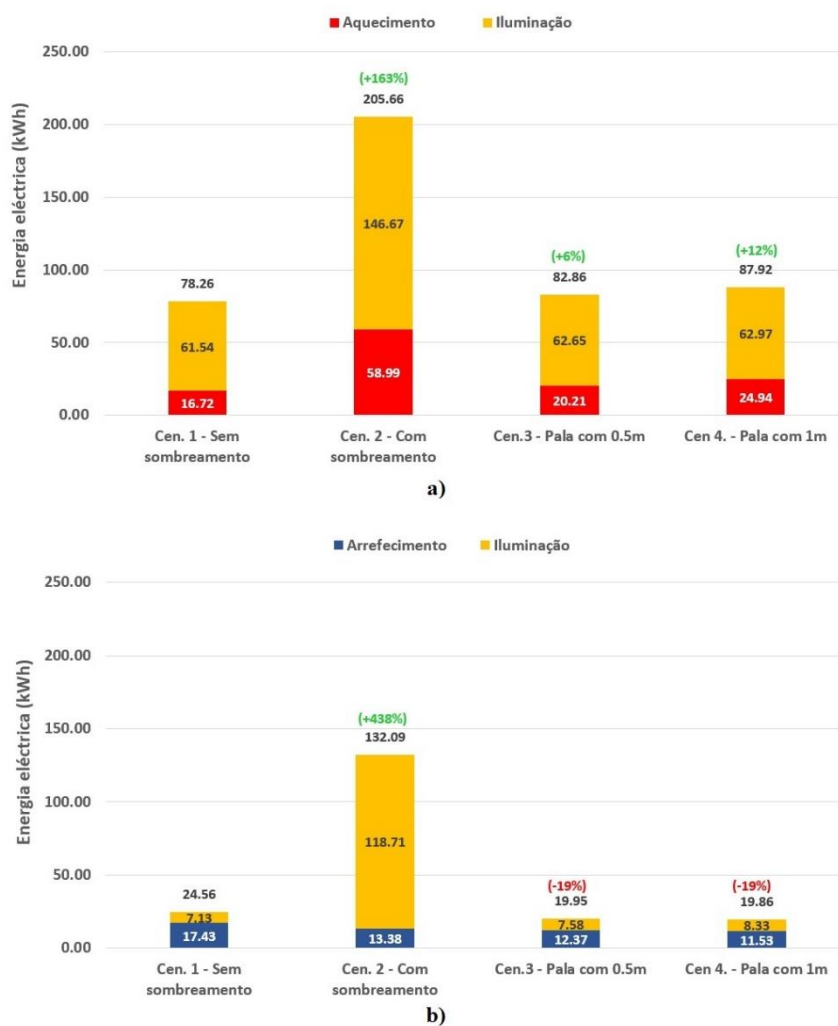


Figura 4.5. Consumos elétricos em: a) janeiro; b) junho.

4.2.3 Conforto térmico

A análise do conforto térmico teve por base a norma EN 15251 (2006), a qual apresenta quatro níveis de conforto, conforme apresentado no Quadro 4.1. As categorias de conforto, I a III, podem ser definidas como elevado, normal e moderado sendo que quando os valores não se enquadrarem nestas categorias são classificados como categoria IV. Esta análise foi feita para os índices de conforto térmico e para temperatura operativa, sendo esta a média da temperatura

do ar e a temperatura média radiante. O índice PMV (voto previsto médio) é obtido utilizando o modelo de Fanger durante a simulação térmica da sala.

A norma EN 15251 (2006) também apresenta critérios para análise de conforto para a humidade relativa e níveis de concentração de CO₂. No entanto, nesta dissertação optou-se por não avaliar estes parâmetros.

Quadro 4.1. Categorias e níveis de conforto para PPD-PMV (percentagem previsível de insatisfeitos – voto previsto médio) e temperatura operativa para ambientes com atividade sedentária, conforme a norma EN 15251 (2006).

Categoria	Índices de conforto térmico		Classes de temperatura operativa	
	PPD	PMV	Inverno 1.0clo ⁽¹⁾ /1.2met ⁽²⁾	Verão 0.5clo ⁽¹⁾ /1.2met ⁽²⁾
	[%]	[/]	[°C]	[°C]
I	<6	-0.2<PMV<0.2	21.0 - 23.0	23.5 - 25.5
II	<10	-0.5<PMV<+0.5	20.0 - 24.0	23.0 - 27.0
III	<15	-0.7<PMV<+0.7	19.0 - 25.0	22.0 - 27.0
IV	>15	PMV>±0.7	<19.0 - 25.0<	<22.0 - 27.0<

⁽¹⁾ Clo é a unidade que define a resistência à perda de calor, 1clo = 0.155m²C/W (Gonçalves, 2017)

⁽²⁾ Met representa a taxa de metabolismo, 1met = 51.15 W/m² (Gonçalves, 2017)

Na Figura 4.6 apresentam-se os resultados obtidos desta análise para o horário de ocupação da sala. Imediatamente se verifica que estes resultados são diferentes para os dois parâmetros. Esta diferença pode ser explicada pelo facto do índice PMV não ser tão objetivo como a temperatura operativa. Este índice além de depender de parâmetros físicos tais como a temperatura do ar, humidade relativa, velocidade do ar e temperatura radiante, também depende de parâmetros subjetivos como a taxa metabólica e a resistência térmica da roupa. No entanto, em ambos os casos se verifica que os resultados obtidos no mês de junho foram significativamente melhores do que no mês de janeiro.

No mês de janeiro (Figura 4.6.a e 4.6.c), facilmente se percebe que a pior solução é o cenário 2, pois este apresenta resultados de 100% nas categorias III e IV, quer para a temperatura operativa, quer para o índice PMV. Este resultado vai de encontro ao que seria expectável, uma vez que o dispositivo de sombreamento ativo reduz significativamente os ganhos solares, bem como a iluminação natural na sala. Por outro lado, foi o cenário 1 que obteve os melhores resultados apresentados para as categorias I e II: 34% em relação à temperatura operativa e 37% para índice PMV. Entre os cenários 3 e 4, o que apresenta melhores resultados é o cenário 3, apresentando para as categorias I e II 31% para a temperatura operativa e 34% para o índice PMV. Contudo, observa-se que todos os cenários obtiveram percentagens superiores a 60% nas categorias III e IV, sendo esta uma situação longe da desejada. Estes resultados devem-se

ao facto de o sistema de aquecimento estar definido com uma temperatura de funcionamento de 18°C, de acordo com o REH (2013), e na norma EN15251(2006) a categoria III apresenta uma temperatura mínima de 19°C.

No mês de junho (Figura 4.6.b e 4.6c), apresenta-se o cenário 4 como o pior. Este, nas categorias III e IV, para a temperatura operativa e índice PMV apresenta resultados de 35% e 34%, respetivamente. Porém, os cenários 2 e 3 obtiveram resultados bastante similares ao cenário 4. Novamente, o cenário 1 mostrou-se como o melhor, obtendo resultados, para a categoria I e II, de 73% em relação à temperatura operativa e 75% para o índice PMV. Contrariamente ao que aconteceu no mês de janeiro, o mês junho obteve resultados positivos em todos os cenários tendo para as categorias I e II percentagens superiores a 65% em todos o cenários em estudo.



Figura 4.6. Temperatura operativa em: a) janeiro; b) junho e índice PMV em: c) janeiro; d) junho.

4.2.4 Resultados com alteração das temperaturas de funcionamento do sistema de climatização

Os níveis de conforto obtidos anteriormente não foram satisfatórios, particularmente no mês de janeiro, como tal, decidiu-se alterar as temperaturas ideais no interior da sala para valores intermédios da categoria I (conforto elevado). Assim definiu-se uma temperatura de 22° para período de aquecimento e 24.5° no período de arrefecimento, como é possível ver na Figura 4.7.

Nesta nova análise não se considerou o cenário 2 uma vez que este anteriormente obteve os piores resultados dos quatro cenários em estudo.

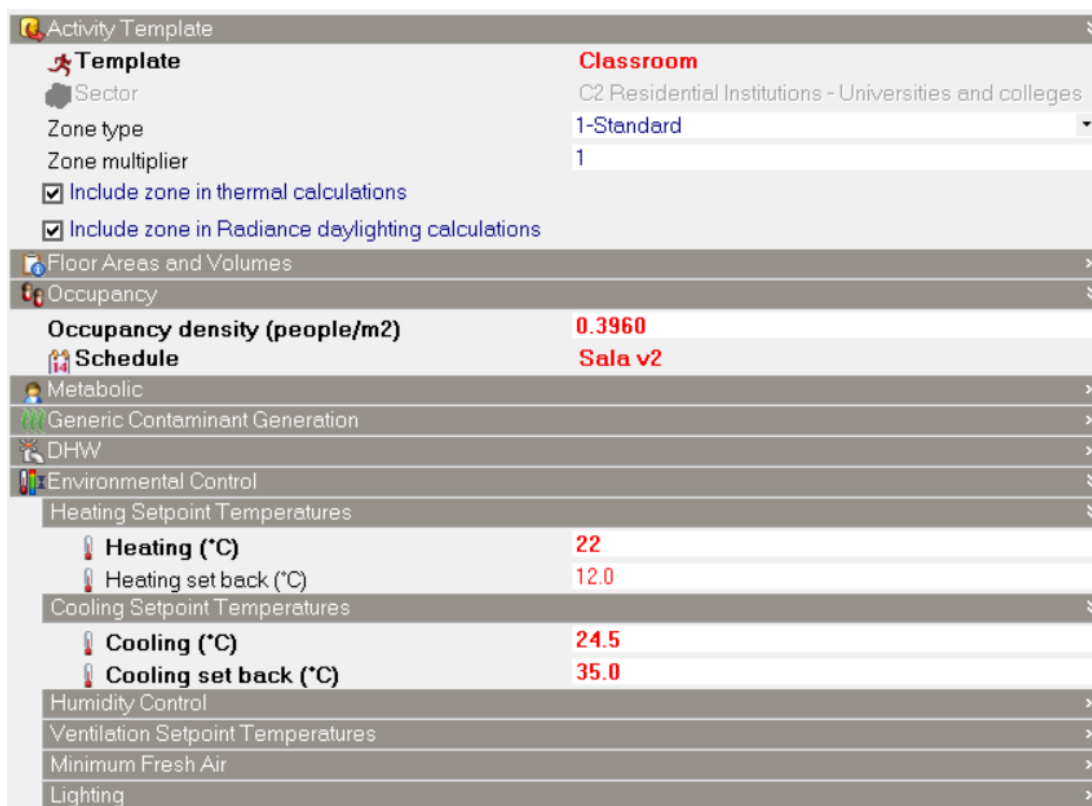


Figura 4.7. Novos pontos de ajuste de temperatura.

- **Conforto térmico**

Na Figura 4.8 apresentam-se os resultados obtidos referentes ao conforto térmico. É possível prontamente observar que de forma geral houve uma melhoria significativa nos resultados de janeiro.

Na Figura 4.8.a e 4.8.b verifica-se que, na estação de aquecimento, o cenário 3 apresenta os melhores resultados, tendo nas categorias I e II valores de 73% relativamente à temperatura operativa e 82% para o índice PMV. Os cenários 1 e 4 obtiveram resultados bastante semelhantes aos do cenário 3. Assim, de forma geral, os resultados são positivos tendo percentagens superiores a 70% para as categorias I e II em todos os cenários.

Em relação ao mês de junho (Figura 4.8.a e 4.8.b) os resultados obtidos são bastante semelhantes aos obtidos anteriormente. Esta semelhança deve-se ao facto de apenas de se ter diminuído 0.5°C na temperatura de funcionamento do sistema de climatização.



Figura 4.8. Temperatura operativa em: a) janeiro; b) junho e índice PMV em: c) janeiro; d) junho, com as novas temperaturas de funcionamento no sistema de climatização.

- **Consumos energéticos**

Registadas as melhorias relativamente ao conforto térmico através da alteração da temperatura de funcionamento do sistema de climatização, é necessário avaliar o impacto que esta melhoria tem nos consumos energéticos.

Analisando a Figura 4.9, como seria de esperar, confirma-se que não houve alteração de consumos de energia elétrica para efeitos de iluminação da sala nos dois meses em estudo. Sendo assim, todas as alterações de consumos de energia são devidas ao aumento das necessidades térmicas no interior da sala.

Na Figura 4.9.a, observa-se que houve um aumento bastante significativo dos consumos elétricos em janeiro comparativamente com resultados apresentados na Figura 4.5.a. No cenário 1 registou-se um aumento de 82.86kWh para 190.67kWh no consumo global de energia, representando um aumento de 112.42kWh de consumo para efeitos de aquecimento. Em relação aos cenários 3 e 4 mantém-se um aumento de 6% e 12%, respetivamente, em relação ao cenário 1 como se verificava anteriormente. Sendo no cenário 4 que se verifica o maior consumo global de energia elétrica, tendo 62.97kWh para iluminação e 150.48kWh para aquecimento, fazendo um total de 213.46kWh.

Na Figura 4.9.b verifica-se que no mês de junho houve um aumento superior a 3.9 kWh nos três cenários relativamente aos resultados obtidos anteriormente, (Figura 4.5.b). Semelhantemente ao mês de janeiro, este aumento de consumos é devido ao aumento das necessidades energéticas no interior da sala, apesar de só se ter alterado 0.5°C a temperatura de funcionamento do sistema de climatização. No cenário 1 houve um consumo global de 30.94kWh, sendo 23.81kWh referentes a energia gasta com arrefecimento. Comparativamente com o cenário 1, houve uma diminuição de 21% e 23% do consumo global de energia para os cenários 3 e 4.

Com base nesta nova análise, contrariamente ao que se verificava anteriormente, o cenário 3 já não se apresenta como a melhor solução relativamente a consumos energéticos. O aumento da temperatura na sala no mês de janeiro provocou um aumento muito significativo no consumo de energia, o qual deixou de ser possível compensar no mês de junho. Em relação ao cenário 1, o cenário 3 em janeiro apresenta um aumento de consumo energia elétrica de 10.42kWh e no mês junho houve uma redução de 6.58kWh.

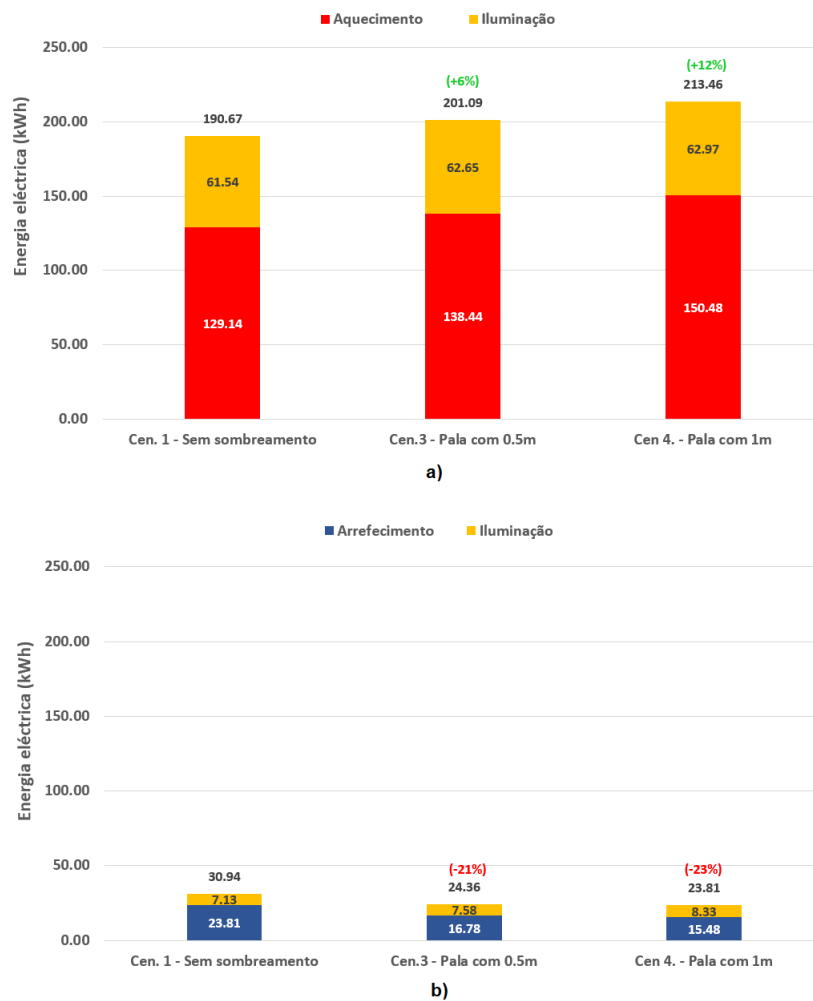


Figura 4.9. Consumos elétricos em: a) janeiro; b) junho, com as novas temperaturas de funcionamento no sistema de climatização.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo principal estudar o impacto da iluminação natural e dos ganhos solares na eficiência energética dos edifícios e no conforto térmico dos ocupantes, assim como a relação entre eles, tendo sido particularizado para uma sala de aula. Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os diversos sistemas de sombreamento e sistemas de iluminação natural, referindo-se também as fontes de iluminação natural, assim como, a orientação das fachadas. Posteriormente, foi estudada numa sala de aula do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, concluindo-se esta análise com um estudo paramétrico da mesma sala.

Existem diversos sistemas de iluminação natural e sistemas de sombreamento, assim como sistemas com as duas funções. No entanto, não é possível dizer genericamente qual é o melhor sistema para aplicar nos edifícios, sendo necessário estudar cada caso individualmente visto que a eficiência dos sistemas depende de diversos fatores, tais como a localização, orientação, envolvente térmica, entre outros. A existência de sistemas dinâmicos possibilita mais facilmente atingir um equilíbrio entre as necessidades de iluminação natural e as necessidades térmicas. Estes sistemas são controlados por um algoritmo que responde automaticamente às variações das condições climáticas conforme as necessidades do ambiente interior, atingido assim uma maior eficiência que os sistemas tradicionais. No entanto, os custos de implementação, devido a todos os seus componentes podem dificultar a sua aplicação de forma mais generalizada.

O estudo paramétrico realizado teve por base o modelo gerado para o caso de estudo. De forma a calibrar o modelo foi necessário registar as temperaturas no interior da sala para depois ser possível comparar com os resultados gerados pelo modelo. Esta comparação entre registos e os previsões foi feita através da função RMSE (*root mean square error*), calibrando a modelo através de uma análise de sensibilidade relativamente à taxa de infiltrações de ar e o sistema de sombreamento. No estudo paramétrico realizado foi possível avaliar o impacto de quatro soluções diferentes no interior da sala em relação aos ganhos solares, consumo energético e conforto térmico, sendo possível retirar diversas conclusões.

Em janeiro a utilização do sistema de sombreamento totalmente ativo é uma solução ineficiente, como seria de esperar. Esta solução provoca uma redução excessiva dos ganhos solares no

interior da sala, provocando um aumento de consumos de energia para aquecimento, assim como, a utilização contínua de iluminação artificial. Por outro lado, no mês de verão existe uma redução das necessidades de arrefecimento, mas devido ao aumento do consumo para iluminação artificial verifica-se um aumento bastante significativo do consumo global de energia.

A introdução de uma pala de sombreamento com 0.5 metros na fachada permitiu reduzir os ganhos solares em 31% em junho, reduzindo apenas 11% em janeiro. Esta redução de ganhos solares provocou um aumento do consumo geral de energia em janeiro de 6%, sendo maioritariamente devido ao aumento das necessidades de aquecimento. Porém, este aumento de consumo no inverno é compensado em junho com uma redução do consumo global de 19%, mantendo os consumos para iluminação artificial muito semelhantes aos iniciais. Por outro lado, a pala de sombreamento com 1 metro demonstrou-se menos eficiente do que a pala de sombreamento com 0.5 metros. Esta provocou uma redução de ganhos solares no mês de inverno de 23% originando um aumento do consumo global de energia de 12% , mantendo-se no mês de verão um consumo de energia igual à solução anterior.

Relativamente ao conforto térmico, todas as soluções estudadas apresentam piores resultados que o cenário inicial (sala de aula sem dispositivo de sombreamento ativo).

O aumento de 4°C da temperatura de funcionamento do sistema de climatização em janeiro provocou um aumento considerável das necessidades de aquecimento, aumentando consideravelmente os consumos energéticos. Assim, na solução com a pala de sombreamento de 0.5m, houve um aumento de consumo de energia de 10.42 kWh no mês de janeiro, existindo apenas uma redução de 7.31 kWh no mês de junho. Desta forma poderá não ser possível compensar o aumento de consumo de energia de inverno com a redução existente no verão. No entanto, a nova temperatura de funcionamento do sistema de climatização permitiu uma melhoria bastante significativa no conforto térmico no mês de janeiro.

Avaliando os ganhos solares, o consumo de energia e o conforto térmico em simultâneo, conclui-se que para uma temperatura de conforto no inverno de acordo com o REH (18°C) a introdução de uma pala de sombreamento com 0.5 metros poderá durante o ano reduzir os consumos de energia mas com níveis de conforto ligeiramente mais reduzidos. Por outro lado, o aumento da temperatura de funcionamento do sistema de climatização no inverno em 4°C poderá inviabilizar esta solução.

O aproveitamento dos ganhos solares no inverno permite reduzir as necessidades de aquecimento, no verão a sua redução permite minimizar as necessidades de arrefecimento. Desta forma, a implementação de um sistema dinâmico capaz de se adaptar às condições

climatéricas poderá ser uma solução viável. Contudo, será sempre necessário analisar os custos associados à aquisição e manutenção deste tipo de solução.

5.2 Trabalhos futuros

Tendo em consideração os resultados obtidos e as conclusões retiradas, seria importante em trabalhos futuros realizar um estudo anual com a introdução da pala de sombreamento de 0.5 metros. Desta forma seria possível verificar com maior rigor se esta solução poderá ser benéfica na redução de consumos energéticos.

Seria também pertinente conseguir modelar um sistema de sombreamento dinâmico de forma a comparar a redução do consumo energético que seria possível obter e simultaneamente fazer um estudo económico sobre a sua viabilidade a médio e longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2030palette (2019). “Shading Devices”, <http://2030palette.org/shading-devices/>, acessido a 30/05/2019.

Adedoyin, A., Eniolu, T., & Bayode, O. (2014). "Effect of tree-shading on energy demand of two similar buildings". *Energy & Buildings*, 81, 305–315.

Al-masrani, S. M., & Al-obaidi, K. M. (2019). "Dynamic shading systems : A review of design parameters , platforms and evaluation strategies". *Automation in Construction*, 102(January), 195–216.

Archiexpo (2019). “Brise em concreto reforçado com fibra de vidro”, <http://www.archiexpo.com/pt/prod/betsinor/product-57855-1648693.html>, acessido a 11/07/2019.

Archiexpo (2019). <http://www.archiexpo.fr/prod/moeding-keramikfassaden/product-63002-682548.html>, acessido a 12/07/2019.

Bellia, L., Marino, C., Minichiello, F., & Pedace, A. (2014). "An overview on solar shading systems for buildings". *Energy Procedia*, 62, 309–317.

Blogdaarquitectura (2020). “9 sistemas diferentes e impressionantes de fachadas cinéticas”, <https://www.blogdaarquitectura.com/9-sistemas-diferentes-e-impressionantes-de-fachadas-cineticas>, acessido a 22/5/2020.

Calhau, I. (2014). "*Análise experimental do impacte de sombreamentos inovadores no conforto ambiental interior*". Tese de Mestardo - Instituto Superior Técnico.

Coutinho, M. (2009). "*Avaliação das condições de iluminação natural através de simulações em modelos virtuais*". Tese de Mestardo - Instituto Superior Técnico.

Daikin (2020). “Dados técnicos para FTX-GV / RX-GV”, https://www.daikin.pt/pt_pt/products/FTX-GV---RX-GV.table.html, acessido a 17/04/2020.

- Designingbuildings (2019). “Ligt shelf”, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Light_shelf, acessido a 30/05/2019.
- Designbuilder (2020). <https://designbuilder.co.uk/> acessido a 8/7/2020.
- Designbuilder (2020). “Welcome to DesignBuilder V6”, <https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/>, acessido a 23/05/2020.
- Dias, A. (2016). "Análise do impacto do sombreamento vegetal no conforto termo-luminoso em edificações no clima quente e úmido". Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Directindustry (2019). “Brise-soleil horizontal”, <http://www.directindustry.fr/prod/gatti-precorvi-srl/product-189781-1913931.html>, acessido a 12/07/2019.
- DGEG (2020). “Iluminação”, <http://www.dgeg.gov.pt/default.aspx?cn=636364487921AAAAAAAAAAAAA>, acessido a 1/6/2020.
- Ec.europa (2020). “Energy consumption in households”, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use, acessido a 30/06/2020.
- EN 12464-1. Technical Committee CEN/TC 169 «Light and Lighting». (2011). «EN 12464-1 Light and lighting - Lighting of work places - Parte 1: Indoor work places». Em *European Standard* (pp. 1–57).
- EN 15251. Technical Committee CEN/TC 156. (2006). "EN 15251 - *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality , thermal environment , lighting and acoustics*" Contents, 1 (2006) (testimony of CEN).
- EnergyPlus (2020). <https://energyplus.net/> acessido a 7/10/2020
- Freewan, A. A. Y. (2014). "Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions". *Solar Energy*, 102, 14–30.
- Gago, E. J., Muneer, T., Knez, M., & Köster, H. (2015). "Natural light controls and guides in buildings . Energy saving for electrical lighting , reduction of cooling load". *Renewable*

and Sustainable Energy Reviews, 41, 1–13.

Gardenista (2019). “The sheltering sky: 10 roof overhangs to enhance you house”, <https://www.gardenista.com/posts/the-sheltering-sky-10-ideas-how-to-enhance-your-house-with-a-roof-overhang/>, acessido a 11/07/2019.

Geminidataloggers (2020). “Tinytag plus 2”, <https://www.geminidataloggers.com/data-loggers/tinytag-plus-2/tgp-4500>, acessido a 04/03/2020.

Gonçalves, H., Camelo, S., Horta, C., Graça, M., Joyce, A., & Rodrigues, C. (2006). "*Edifício SOLAR*". Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P.

Gonçalves, H., & Graça, M. (2004). "*Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal (DGGE / IP)*". Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P.

Gonçalves, T. (2017). "*Conforto térmico no interior de edifícios*". Tese de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologias, Univesidade de Coimbra.

Googlemaps (2020). <https://www.google.com/maps/@40.1858263,-8.4155131,132m/data=!3m1!1e3>, acessido a 26/02/2020.

Hsieh, C., Li, J., Zhang, L., & Schwegler, B. (2018). "Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use". *Energy & Buildings*, 159, 382–397.

IEA. (2010). "*Daylight in Buildings, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*". AECOM Ltd.

Jackson, G. K., Littlefair, P. J., Buckley, M. G., & Doggart, J. (1999). "*Daylighting and window design*". CIBSE.

Kischkoweit-lopin, M. (2002). "An overview of daylighting systems". *Solar Energy*, 73(2), 77–82.

Konstantoglou, M., & Tsangrassoulis, A. (2016). "Dynamic operation of daylighting and shading systems : A literature review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60.

Liveinspaces (2020). “The Al Bahar Towers are a standout landmark for the city of Abu Dhabi in the UAE”, <https://www.livinspaces.net/ls-tv/discussing-the-design-an-indepth-look-at-the-design-of-the-al-bahar-towers-in-abu-dhabi-by-aedas-architects/>, acessido a 10/07/2020.

- Maleki, B. A. (2011). "Shading: Passive cooling and energy conservation in buildings". *IJTPE Journal, December*, 72–79.
- Martins, N. (2010). "*Compatibilização de exigências relativas a iluminação e ganhos solares em edifícios de habitação*". Tese de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Northernarchitecture (2019). "Anidolic zenithal collector system", <https://www.northernarchitecture.us/natural-light/anidolic-zenithal-collector-system.html> 30/05/2019, acessado a 30/05/2019.
- Nzeb (2019). "Vegetation", <http://www.directindustry.fr/prod/gatti-precorvi-srl/product-189781-1913931.html>, acessado a 19/07/2019.
- Oliveira, G. (2016). "*Iluminação natural em salas de aula : caso de estudo*". Tese de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Phillips, D. (2004). "*Daylighting: Natural light in architecture*". Elsevier.
- Raphael, B. (2010). "*Integrated control of indoor environmental quality*" (Issue July).
- RECS – "Regulamente de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços", aprovado pelo Decreto-Lei nº118/2019 de 20/08.
- REH - "Regulamento de Desempenho Energético Dos Edifícios de Habitação", aprovado pelo Decreto-Lei nº 118/2013 de 20/08.
- Researchgate (2020). "Improving daylighting performance of mirrored light pipes", https://www.researchgate.net/publication/27483162_Improving_daylighting_performance_of_mirrored_light_pipes, acessado a 6/07/2020
- Santos, A. (2016). "O papel dos dispositivos de sombreamento no controlo e na modelação da luz natural nos edifícios".1-12. LNEC.
- Santos, C., & Matias, L. (2006). "*Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*". LNEC.
- Santos, S. (2009). "*Sistemas avançados de iluminação natural : Estudo comparativo de cidros prismáticos , laser-Cut panels e channel panels*". Tese de Mestrado - Instituto Superior Técnico.

Silva, J. (2007). "Estratégias de luz natural: Sistemas convencionais e brise-soleil como elemento de controle". *PARANOÁ - Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*.

Springer (2020). "Shading and daylight systems", https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-20831-2_21, acessado a 3/07/2020.

Wong, I. L. (2017). "A review of daylighting design and implementation in buildings". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(February), 959–968.

Wyckmans, A. (2005). "*Intelligent building envelopes : Architectural concept & applications for daylighting quality* (Issue March)". Tese de Doutoramento - Norwegian University of Science and Technology.

Yao, J. (2017). "An investigation into the impact of movable solar shades on energy , indoor thermal and visual comfort improvements". *Building and Environment*, January 2014.

Yun, G., Yoon, K. C., & Kim, K. S. (2014). "The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings". *Energy & Buildings*, 84, 70–85.