

# **Estudo experimental do desempenho térmico e lumínico de envidraçados com películas de controlo solar**

Paulo Renato Carvalho Barbosa

Dissertação para obtenção do grau de mestre em

## **Engenharia Civil**

Orientadores:

Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

## **Júri**

Presidente: Professor Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida

Orientador: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogais: Doutor Rui Pedro da Costa Neto

Tenente-Coronel Artur Jorge Espada Caracho

**Novembro 2018**



*“Everybody is a genius.  
But if you judge a fish by its ability to climb a tree,  
it will live its whole life believing that it is a stupid.”*

*Albert Einstein*



# Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



# Agradecimentos

O presente trabalho contou com a contribuição e apoio de várias pessoas a quem desejo expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, o Professor António Moret Rodrigues e a Professora Maria da Glória Gomes, pela disponibilidade, paciência e preocupação demonstrada ao longo deste trabalho.

À Júlia Pinheiro que gentilmente me auxiliou na montagem dos equipamentos e pela disponibilidade durante a realização deste trabalho.

Aos Professores ocupantes dos gabinetes do IST-Taguspark monitorizados que prontamente disponibilizaram os seus gabinetes para a realização da campanha experimental.

Aos camaradas Ricardo Barbosa e Filipe Rocha por terem sido fundamentais na superação das cadeiras que deixei para trás e pela capacidade de manterem sempre o otimismo e sentido de humor.

Ao Tenente Coronel Artur Caracho pela elevada competência demonstrada ao assumir as funções de diretor de curso.

Aos camaradas Tiago Zão e Romeu Carvalho por me auxiliarem no planeamento e organização de tempo para que fosse possível cumprir com todos os objetivos.

Ao camarada Flávio Duarte pela total disponibilidade e inigualável carácter.

Por fim, mas não menos importantes, agradeço aos meus pais e irmãos por todo o apoio e motivação durante esta fase e por serem desde cedo os pilares da minha formação como pessoa.





# Resumo

A crescente preocupação com as alterações climáticas e conseqüente necessidade de redução de gases de efeito de estufa conduz ao controlo dos consumos energéticos, tanto associado a edifícios recentes como edifícios mais antigos. Neste contexto, as áreas envidraçadas revelam-se um elemento da envolvente dos edifícios de interesse maior, não só devido à maior facilidade de trocas de calor entre os ambientes que separam, mas também devido à capacidade inerente de aproveitamento de luz natural, revelando-se desta forma um elemento profundamente relacionado com os consumos energéticos associados a sistemas de melhoramento do conforto térmico e visual. Com vista a melhorar o desempenho dos envidraçados têm sido desenvolvidas algumas películas de controlo solar, nas quais assenta este trabalho. Numa primeira fase foi levado a cabo um estudo relativo às implicações destas películas nas propriedades dos envidraçados, verificando-se uma melhoria significativa da eficiência do sistema envidraçado em algumas situações. Seguidamente procedeu-se à realização de uma campanha experimental dividida em duas fases (Inverno e Verão), a qual incluiu a análise de três gabinetes, um deles sem qualquer película instalada (servindo como gabinete de referência), um segundo gabinete com uma película inteligente do tipo PDLC instalada e um terceiro e último gabinete com uma película refletiva. Após a análise dos registos obtidos foram conseguidas algumas conclusões, tendo-se verificado durante a campanha de Inverno que a película PDLC é a que oferece menores valores de iluminância interior e de radiação global vertical interior, não se registando diferenças significativas para o gabinete com a película refletiva. Em relação aos resultados obtidos durante a campanha de Verão, estes foram pouco conclusivos, o que não seria expectável, podendo ser resultado de uma incorreta aplicação das películas. Concluiu-se ainda que a aplicação deste tipo de películas deve ser alvo de um estudo prévio cuidadoso, tendo em conta a orientação das fachadas nas quais se pretende fazer a sua instalação.

Palavras-chave: Películas de controlo solar, películas inteligentes, películas adesivas poliméricas, eficiência energética, desempenho térmico e ótico.



# Abstract

The growing concern about climate changes and the consequent need to reduce greenhouse gases, leads to the control of the energy consumption, both associated to recent buildings and older buildings. In this context, glazed areas are an element of great interest in the building surroundings, not only because of the greater ease of the heat exchanges between the environments that they separate, but also because of the inherent ability to take advantage of natural light, and an essential element in the energy consumption and in the thermal and visual comfort systems. In order to improve the performance of the glazing systems, some solar control films have been developed, on which this work is based. In a first phase, a study was carried out regarding the implications of these films on the properties of glazing, with a significant improvement in the efficiency of the glazing system in some situations. An experimental campaign was then divided into two phases (winter and summer), which included the analysis of three office rooms, one without any installed film (considered as reference), a second office room with a PDLC film installed and a third and last office room with a reflective film. After the analysis of the obtained results, some conclusions were drawn. During the winter campaign, the PDLC film presented the lowest values of indoor illuminance and global radiation on vertical plane, and there were no significant differences for the room with the reflective film. In relation to the results obtained during the summer campaign, these presented to be inconclusive, which would not be expected, and could be the result of an incorrect application of the films. It was also concluded that the application of this type of films should be subjected to a careful preliminary study, taking into account the orientation of the façades in which it is intended to be installed.

Key-words: Solar control films, smart films, polymeric adhesive films, energy efficiency, thermal and optical performance.



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos e metodologia de trabalho .....	3
1.3. Organização do trabalho .....	5
<b>2. Envidraçados em edifícios</b> .....	<b>7</b>
2.1. Influência dos envidraçados no consumo de energia .....	7
2.2. Propriedades térmicas e óticas dos envidraçados .....	10
2.2.1. Coeficiente de transmissão térmica (U) .....	12
2.2.2. Factor solar (g) .....	13
2.2.3. Transmitância visível ( $T_v$ ) .....	14
2.2.4. Coeficiente de seletividade espectral (CSE) .....	15
<b>3. Películas inteligentes para envidraçados</b> .....	<b>17</b>
3.1. Contexto histórico .....	17
3.2. Constituição das películas para envidraçados .....	19
3.2.1. Constituição de películas adesivas poliméricas .....	19
3.2.2. Constituição de películas de cristais líquidos dispersos em polímero (PDLC) .....	20
3.2.3. Constituição de películas electrocrómicas .....	21
3.3. Propriedades das películas para envidraçados .....	22
3.4. Tipos de películas para envidraçados .....	23
3.5. Estudos anteriores.....	24
<b>4. Caso de Estudo</b> .....	<b>29</b>
4.1. Descrição do caso de estudo .....	29
4.2. Películas utilizadas no caso de estudo .....	33
4.3. Procedimento experimental.....	35

<b>5. Análise e discussão de resultados .....</b>	<b>39</b>
5.1. Campanha de Inverno .....	39
5.1.1. Temperatura .....	40
5.1.2. Fluxo de calor .....	42
5.1.3. Irradiância .....	43
5.1.4. Iluminância.....	45
5.2. Campanha de Verão.....	46
5.2.1. Temperatura .....	47
5.2.2. Fluxos de calor .....	49
5.2.3. Irradiância .....	50
5.2.4. Iluminância.....	52
5.3. Mapa e perfil de iluminâncias nos gabinetes .....	53
5.3.1. Mapeamento às 9 horas .....	54
5.3.2. Mapeamento às 12 horas .....	56
5.3.3. Mapeamento às 15 horas .....	57
<b>6. Conclusões e desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>61</b>
6.1. Conclusões .....	61
6.2. Desenvolvimentos futuros .....	62
<b>7. Referências.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>I</b>
Anexo A: Campanha de Inverno.....	III
Anexo B: Campanha de Verão .....	VII

# Lista de figuras

Figura 1-1 Metodologia seguida na campanha experimental (adaptado) de [10].....	4
Figura 2-1 Evolução da variação percentual do investimento nacional e da Europa Ocidental em nova construção [14].....	8
Figura 2-2 Representação esquemática da influência da atmosfera nos fenómenos de absorção e difusão da radiação solar [29]. ....	11
Figura 2-3 Comportamento térmico do vidro à energia solar incidente [39]. ....	14
Figura 2-4 Transmitância e refletância visível de um envidraçado [10]: $I_v$ – radiação solar visível incidente; $T_v$ – radiação visível transmitida para o interior; $R_v$ – radiação visível refletida para o exterior. ....	14
Figura 3-1 Tipos de dispositivos para vidros inteligentes [46].....	18
Figura 3-2 Constituição típica de uma película adesiva polimérica [51]. ....	20
Figura 3-3 Esquema do funcionamento do PDLC (adaptado) de [46]. ....	20
Figura 3-4 Design genérico de uma película electrocrómica de cinco camadas. As setas indicam o movimento de iões quando aplicado um campo elétrico (adaptado) de [47]. ....	22
Figura 4-1 Localização do caso de estudo: a) localização do IST Taguspark; b) planta do edifício e localização dos gabinetes. ....	29
Figura 4-2 Esquema do gabinete-tipo e dimensões do envidraçado (adaptado) de [46]. ....	30
Figura 4-3 Envidraçado dos gabinetes (adaptado) de [10]. ....	30
Figura 4-4 Esquema do alçado e localização dos gabinetes. ....	33
Figura 4-5 Propriedades da película inteligente PDLC Smart Cling Self Adhesive Smart Tint- Low driving voltage [68]. ....	34
Figura 4-6 Propriedades da película refletiva Linea Hogar- Safe Auto-Adhesive UV Protection [46]. .	34
Figura 4-7 Esquema da posição dos piranómetros, luxímetros e sensor HOBO (adaptado) de [10]...	36
Figura 4-8 Piranómetro e luxímetro exteriores em plano vertical. ....	36
Figura 4-9 Termopares (para medição da temperatura superficial interior à esquerda e da temperatura ambiente exterior à esquerda). ....	37
Figura 4-10 Fluxímetro colocado no envidraçado, vista interior.....	37
Figura 4-11 a) Piranómetro LI-COR LI200 a vermelho e luxímetro LI-COR 210R a amarelo; b) Piranómetro horizontal BF5 a azul e piranómetro vertical kipp&Zonen CMP6 a vermelho. ....	37
Figura 5-1 Temperaturas superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ), exterior ( $T_e$ ), interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ) no DMF (a) e no DmR (b). ....	41

Figura 5-2 Fluxos de calor no DMF (a) e no DmR (b).....	43
Figura 5-3 Radiação global vertical exterior ( $Rad_{ve}$ ) e radiação global vertical interior ( $Rad_{vi}$ ) no DMF (a) e no DmR (b).....	44
Figura 5-4 Radiação global vertical exterior medida na fachada exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{ve,gab}$ ) e radiação global vertical exterior medida na cobertura ( $Rad_{ve,cob}$ ) no DMF (a) e no DmR (b). .....	44
Figura 5-5 Radiação horizontal exterior global ( $Rad_G$ ) e difusa ( $Rad_d$ ) no DMF (a) e no DmR (b). ....	45
Figura 5-6 Iluminância vertical exterior ( $E_{ext}$ ) e iluminância vertical interior ( $E_{int}$ ) no DMF (a) e no DmR (b). ....	45
Figura 5-7 Temperaturas superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ), exterior ( $T_e$ ), interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{ve}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b).....	49
Figura 5-8 Fluxos de calor no DMQ (a) e no DMR (b). ....	50
Figura 5-9 Radiação global vertical exterior ( $Rad_{ve}$ ) e radiação global vertical interior ( $Rad_{vi}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b).....	51
Figura 5-10 Radiação global vertical exterior medida na fachada exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{ve,gab}$ ) e radiação global vertical exterior medida na cobertura ( $Rad_{ve,cob}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b). .....	51
Figura 5-11 Radiação horizontal exterior global ( $Rad_G$ ) e difusa ( $Rad_d$ ) no DMQ (a) e no DMR (b). ...	52
Figura 5-12 Iluminância vertical exterior ( $E_{ext}$ ) e iluminância vertical interior ( $E_{int}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b). ....	52
Figura 5-13 Grelha de pontos de medição adaptado de [10].....	54
Figura 5-14 Perfil de iluminâncias em plano vertical à cota de 1,5 m no interior dos gabinetes às 9h ( $E_{Ext}=29,21$ Klux). ....	55
Figura 5-15 Mapas de iluminância em plano horizontal à cota de 0,75 m às 9h: a) gabinete A ( $E_{Ext}=16,83$ Klux); b) gabinete B com película em modo off ( $E_{Ext}=25,46$ Klux); c) gabinete B com película em modo on ( $E_{Ext}=25,46$ Klux); d) gabinete C ( $E_{Ext}=28,03$ Klux). ....	55
Figura 5-16 Perfil de iluminâncias em plano vertical à cota de 1,5 m no interior dos gabinetes às 12h ( $E_{Ext}=90,56$ Klux). ....	56
Figura 5-17 Mapas de iluminância em plano horizontal à cota de 0,75 m às 12h: a) gabinete A ( $E_{Ext}=66,01$ Klux); b) gabinete B com película em modo off ( $E_{Ext}=70,65$ Klux); c) gabinete B com película em modo on ( $E_{Ext}=70,93$ Klux); d) gabinete C ( $E_{Ext}=63,35$ Klux). ....	57
Figura 5-18 Perfil de iluminâncias em plano vertical à cota de 1,5 m no interior dos gabinetes às 15h ( $E_{Ext}=94.79$ Klux). ....	58



Figura 5-19 Mapas de iluminância em plano horizontal à cota de 0,75 m às 15h: a) gabinete A ( $E_{Ext}=44,95$  Klux); b) gabinete B com película em modo off ( $E_{Ext}=46,45$  Klux); c) gabinete B com película em modo on ( $E_{Ext}=43,34$  Klux); d) gabinete C ( $E_{Ext}=40,76$  Klux). ..... 59



# Lista de tabelas

Tabela 3-1 Principais especificações dos dispositivos utilizados em janelas inteligentes ([46] adaptado de [50]).....	18
Tabela 3-2 Estudos anteriores sobre películas inteligentes. ....	25
Tabela 4-1 Propriedades térmicas da envolvente dos gabinetes (adaptado) de [46]. ....	31
Tabela 4-2 Propriedades térmicas da envolvente dos gabinetes (adaptado) de [46] (cont.).....	32
Tabela 4-3 Detalhes dos equipamentos de medição utilizados. ....	38
Tabela 5-1 Valores médios da temperatura exterior ( $T_e$ ), de radiação global vertical ao nível dos gabinetes ( $Rad_{v,gab}$ ) e na cobertura ( $Rad_{v,cob}$ ) e de radiação global horizontal na cobertura ( $Rad_H$ ), no DMF (Dia Mais Frio) e no DmR (Dia de menor Radiação). ....	39
Tabela 5-2 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DMF (Dia Mais Frio). ....	40
Tabela 5-3 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DmR (Dia de menor Radiação). ....	40
Tabela 5-4 Norma DIN 5035: 1990 - Níveis de iluminância de acordo com o tipo de atividade [46]. ...	46
Tabela 5-5 Valores médios da temperatura exterior ( $T_e$ ), de radiação global vertical ao nível dos gabinetes ( $Rad_{v,gab}$ ) e na cobertura ( $Rad_{v,cob}$ ) e de radiação global horizontal na cobertura ( $Rad_H$ ), no DMF e no DmR.....	47
Tabela 5-6 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DMQ. ....	47
Tabela 5-7 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DMR.....	47



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O panorama energético atual, ainda fortemente caracterizado pela utilização de combustíveis fósseis, com os impactos ambientais conhecidos (aquecimento global, alterações climáticas), torna importante a adoção de medidas de redução do consumo de energia em todos os sectores económicos, onde se inclui naturalmente o sector da construção. Dada a inexistência de fontes de energia fóssil em Portugal, a elevada dependência energética do país foi sempre uma realidade. Porém, nos anos mais recentes, através da aposta em energias renováveis e da promoção da eficiência energética, esta dependência tem vindo a diminuir. Dependendo das energias renováveis de fontes presentes livremente na natureza, é importante que a aposta no tipo de fonte (sol, vento, água) e na tecnologia do seu aproveitamento acarrete o menor grau de incerteza possível, sob pena dos investimentos realizados não obterem o retorno esperado. Em Portugal, a energia hídrica, por exemplo, sendo uma das principais componentes do sector da energia renovável, pode ter a sua produção consideravelmente afetada em anos de seca, com reflexos negativos para a dependência energética. Este facto torna importante a aposta na diversificação das fontes de energia renovável (sol e vento, por exemplo) e em produtos de baixo consumo energético (no caso do produto ser uma edificação são características importantes para o baixo consumo energético com o conforto o isolamento térmico da envolvente e uma exposição solar adequada) e formas de funcionamento mais eficientes (no caso dos equipamentos são características importantes para um funcionamento eficiente o seu rendimento, a gestão da sua operação e a periodicidade e qualidade da sua manutenção) [1].

Para além do problema da dependência energética mencionado, acresce a preocupação com as alterações climáticas que, segundo o quinto relatório do Intergovernmental Panel Climate Change (IPCC), têm uma forte ligação com a atividade humana, sendo o sector industrial um dos maiores responsáveis pela emissão de Gases de Efeito de Estufa (GEE), com elevados custos associados à redução destas emissões [2].

O sector da construção tem um elevado significado no que diz respeito ao consumo de energia e às emissões de gases com efeito de estufa, representando 36% do consumo final de energia e 39% das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [3]. Embora os progressos ao nível da construção sustentável sejam uma realidade e continuem a avançar, estes progressos não têm acompanhado o desenvolvimento do sector de edifícios e as exigências de serviços de energia. Esta incompatibilidade resultou num aumento das exigências de energia final nos edifícios entre 2010 e 2016 [3], uma vez que os esforços no sentido da eficiência energética não acompanharam o aumento de área útil. Daí que se afigure uma necessidade de melhoria da eficiência energética por metro quadrado (m<sup>2</sup>) no sector global de edifícios de em média 30% até 2030 (em relação a 2015) com vista a atender às metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris [3]. De acordo com a United Nations Environment Programme – Sustainable Building and Climate Change (UNEP - SBCI) [4], o potencial na redução do consumo de

energia neste sector durante a vida-útil do edifício é um aspeto positivo quando comparado com outros sectores, podendo variar de 30 a 80% através de medidas de baixo custo [4].

Em Portugal o consumo de energia no sector doméstico representa cerca de 22% da energia consumida nos edifícios, da qual grande parte destina-se à climatização com vista a melhorar as condições de conforto [5].

Nos últimos anos tem-se assistido a um aumento significativo do uso de envidraçados nas fachadas dos edifícios não residenciais associado a questões arquitetónicas, nomeadamente assentes em preocupações estéticas e na entrada de luz natural no edifício. Contudo, esta utilização de envidraçados em larga escala trouxe algumas implicações ao nível dos consumos energéticos, devido à necessidade de utilização de sistemas de climatização para assegurar as exigências de conforto térmico [6].

As fachadas dos edifícios assumem um papel fundamental no desempenho térmico dos mesmos, uma vez que funcionam como uma barreira entre o ambiente exterior e o ambiente interior, tendo como função principal o controlo de fatores ambientais externos de forma a garantir as condições de conforto necessárias aquando da sua utilização [7]. As janelas e superfícies envidraçadas são os elementos da envolvente do edifício que requerem mais atenção, sendo que o controlo das perdas térmicas na estação de aquecimento e dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento é essencial para a otimização do comportamento térmico do edifício [8].

A regularização das dimensões das áreas envidraçadas revela-se uma tarefa complexa no sentido de equilibrar o consumo energético dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado e a utilização de luz natural de forma a minimizar a necessidade de luz artificial, garantindo simultaneamente um elevado conforto visual [9]. Esta dificuldade em conseguir um equilíbrio entre os diversos sistemas acima referidos, assim como a minimização dos consumos energéticos conduziu ao estudo e desenvolvimento de novas tecnologias para controlo dos ganhos e perdas de energia em edifícios, entre elas a aplicação de películas de controlo solar, nas quais se incluem as películas adesivas poliméricas e as películas inteligentes do tipo PDLC (cristais líquidos dispersos em polímero), sendo estas últimas o foco desta dissertação.

O principal objetivo das películas de controlo solar é alterar as propriedades dos envidraçados, reduzindo significativamente a energia captada para o espaço interior, minimizando os consumos energéticos associados a sistemas de climatização, mas sem afetar significativamente os valores de transmitância visível de forma a minimizar os consumos energéticos relacionados com sistemas de iluminação artificial. As películas inteligentes, ao contrário das películas poliméricas adesivas, conferem ainda a possibilidade de regular a transmitância visível de forma conveniente e vantajosa no que respeita aos consumos energéticos. A utilização de películas de controlo solar é recomendada principalmente para edifícios que apresentem problemas de aquecimento excessivo.

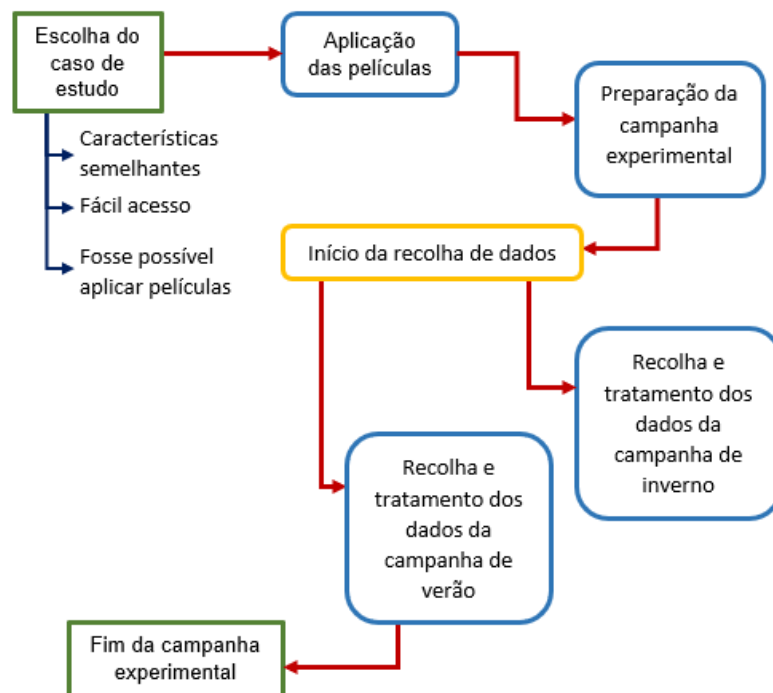
## 1.2. Objetivos e metodologia de trabalho

A presente dissertação tem como objetivo principal a avaliação experimental do desempenho térmico e ótico de películas de controlo solar em envidraçados num caso de estudo real, sendo o foco desta avaliação as películas inteligentes do tipo PDLC.

Além do objetivo acima referido, foi ainda intenção desta dissertação: avaliar o comportamento dos sistemas envidraçados em diferentes dias-tipo de forma a entender as diferenças relacionadas com a temperatura do ambiente e os níveis de radiação solar exterior; avaliar a influência que a película PDLC do caso de estudo tem ao nível do comportamento térmico e ótico por comparação com a situação de vidro sem película de controlo solar e com película de controlo solar aplicada pelo interior. De referir que por questões relacionadas com a natureza experimental do trabalho, ao nível dos contratemplos associados ao funcionamento de equipamentos e à perturbação causada pela permanência dos mesmos em espaços ocupados, e com as limitações de tempo para a conclusão da dissertação, o tempo útil para medições de que se dispôs revelou-se insuficiente para uma avaliação integral de comportamento destas películas, pelo que este trabalho incidiu principalmente um dos seus modos de funcionamento.

Para cumprir estes objetivos foram realizadas campanhas experimentais nos períodos de Inverno e Verão em gabinetes com área envidraçada exterior, do edifício Taguspark do Instituto Superior Técnico de Lisboa e situado em Oeiras. A escolha dos gabinetes para o estudo do comportamento das diferentes películas teve de atender aos condicionamentos existentes, nomeadamente no que respeita ao armazenamento dos equipamentos e disposição dos sensores, bem como ao tempo permitido para a utilização dos espaços, que deveria ser o necessário para executar o plano de medições previsto. Relativamente ao gabinete para acolher o estudo principal relativo à película PDLC, a escolha ficou logo decidida à partida, uma vez que só um dos gabinetes dispunha de uma película inteligente do tipo PDLC já instalada. Na seleção dos outros dois gabinetes constituíram critérios a maior proximidade possível do gabinete principal e a semelhança em termos de características - exceptuado as respeitantes ao revestimento do envidraçado -, tendo pesado também o tipo de ocupação com vista a uma recolha de dados facilitada. Para efeitos de comparação com o gabinete do estudo principal, foi escolhido um gabinete sem película, que foi tomado como referência do estudo, e o outro com uma película polimérica de controlo solar já existente. De referir que tanto a película deste último gabinete como a película PDLC do gabinete do estudo principal apresentaram-se aplicadas na superfície interior dos vidros.

Durante a campanha experimental foram objeto de medições as temperaturas superficiais dos envidraçados e dos ambientes interior e exterior, assim como o fluxo de calor, a radiação solar e a luminosidade. A metodologia seguida para a elaboração da campanha experimental pode ser observada na Figura 1-1.



*Figura 1-1 Metodologia seguida na campanha experimental (adaptado) de [10].*

Em primeiro lugar procedeu-se à escolha do caso de estudo, tendo presentes os objetivos a alcançar. Finalizada esta etapa, seguia-se a aplicação das películas (neste caso não foi necessária a instalação das películas uma vez que já se encontravam aplicadas). Passou-se de seguida à preparação da campanha experimental, na qual foi realizada a montagem de todos os sensores e equipamentos necessários para uma recolha de dados eficiente. Por fim, procedeu-se à recolha e tratamento de dados com vista à avaliação do comportamento térmico e ótico dos sistemas envidraçados alvo de estudo.



## 1.3. Organização do trabalho

Este trabalho apresenta-se dividido em sete capítulos, entre os quais se encontra este capítulo inicial com o propósito de enquadrar a presente dissertação e expor os objetivos a que se propõe.

O segundo capítulo aborda a importância da composição espectral da radiação, assim como as principais propriedades dos envidraçados com influência no comportamento térmico e no consumo energético de edifícios.

O terceiro capítulo engloba uma abordagem ao tema desta dissertação, nomeadamente a utilização de películas em envidraçados, contexto em que surgiram, diferentes tipos de películas e os seus constituintes, terminando com um levantamento de estudos anteriormente realizados neste tema.

No quarto capítulo são apresentados os gabinetes do caso de estudo descrevendo a localização dos mesmos com o intuito de recolher dados para a avaliação do desempenho térmico e ótico dos sistemas envidraçados estudados. Neste capítulo é ainda descrito o procedimento para a realização da campanha experimental.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados obtidos na campanha experimental realizada e ainda uma análise ao comportamento observado em dias-tipo.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões extraídas deste trabalho, assim como algumas sugestões de desenvolvimentos futuros.



## 2. Envidraçados em edifícios

### 2.1. Influência dos envidraçados no consumo de energia

Na União Europeia o sector dos edifícios representa em média 39% do total de energia consumida [3]. Entre países, o peso dos edifícios no consumo energético apresenta naturalmente diferenças relacionadas, por um lado, com o seu estado de desenvolvimento e, por outro, com as características do seu clima. Em países menos desenvolvidos a situação económica não permite ao país e às populações realizar despesas com energia ou ter preocupações ambientais equivalentes às dos países mais desenvolvidos, com infraestruturas energéticas mais modernas e maior qualidade de vida das populações. Por sua vez, no caso de países com características climáticas mais favoráveis, nomeadamente invernos menos severos, como é o caso de Portugal, as necessidades de utilização de sistemas de climatização, em particular de aquecimento na estação de Inverno são, regra geral, menores e como tal o consumo energético também [10]. Tendo em conta o progressivo aumento do nível de vida em países menos desenvolvidos, assim como o aumento da temperatura terrestre fruto das alterações climáticas, é expectável que os consumos energéticos associados ao conforto térmico em edifícios tendam a aumentar. Nesta temática os países em vias de desenvolvimento merecem especial atenção, uma vez que o aumento do consumo energético será mais acentuado nestes países [11].

Com vista a melhorar a eficiência energética no sector dos edifícios, têm sido desenvolvidos esforços por parte do Parlamento Europeu sob a forma de diretivas, onde se definem políticas estratégicas e planos de ação. A diretiva 2010/31/EU “EU 20-20-20” estabelece a imposição de algumas metas aos países membros da União Europeia, metas estas a alcançar até 2020. As imposições da diretiva “EU 20-20-20” são as seguintes [11]:

- Reduzir em pelo menos 20% as emissões globais de gases de efeito de estufa até 2020 em relação aos valores de 1990;
- Pelo menos 20% da energia total consumida na União Europeia deverá ser proveniente de fontes de energia renovável;
- Uma melhoria de pelo menos 20% na eficiência energética.

Estas imposições não são apenas referentes a novas construções, mas abrangem também edifícios a necessitar de reabilitação. Em geral nos últimos anos assistiu-se a um elevado ritmo de construção em Portugal, contudo o parque habitacional em 2004 ainda se encontrava bastante envelhecido e degradado [12]. Resulta daqui um desajuste dos edifícios mais antigos face às novas exigências ambientais, nomeadamente ao nível do desempenho energético, algo que não se verifica nos novos edifícios. A preocupação com esta situação tem sido notória nos últimos anos, sendo expectável um aumento do investimento na renovação residencial a partir de 2010 (já comprovado nos

censos realizados em 2011 [13]), tal como se pode observar na Figura 2-1, que ilustra o gráfico referente à evolução da variação percentual do investimento nacional e da Europa Ocidental em nova construção[14] :

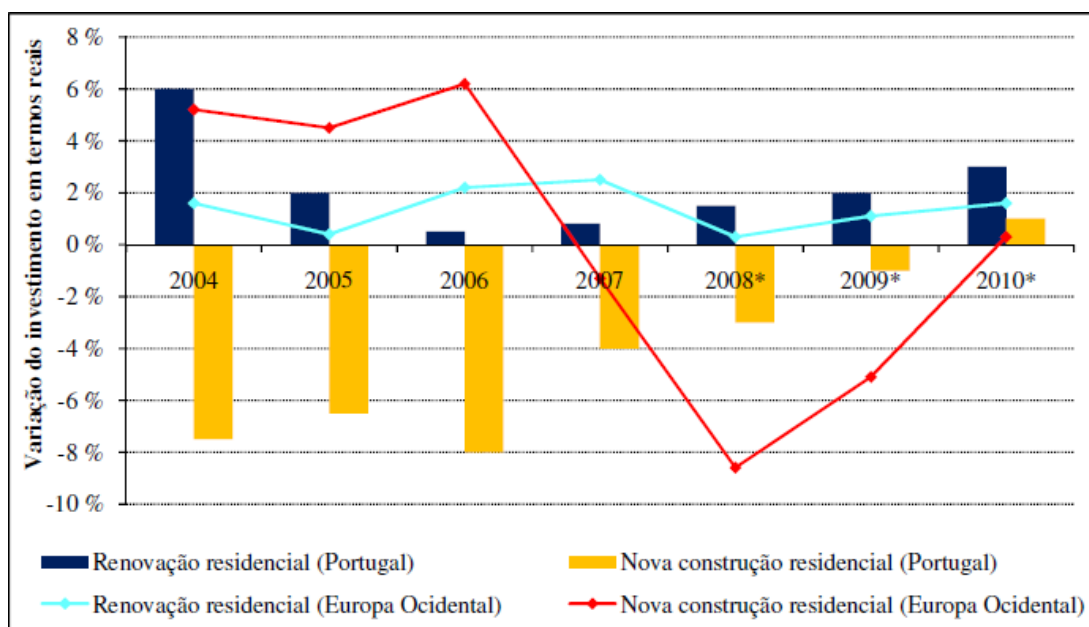


Figura 2-1 Evolução da variação percentual do investimento nacional e da Europa Ocidental em nova construção [14].

Neste sentido é importante que as intervenções de reabilitação sejam alvo de uma análise cuidada com vista a obter soluções compatíveis com a construção existente e ao mesmo tempo energeticamente eficientes [10].

Segundo a Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), para além do envelhecimento natural dos edifícios e da falta de manutenção dos materiais, existem algumas características dos edifícios com especial influência no seu desempenho térmico e energético, quer na estação quente, quer na estação fria. No documento “Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais”, a DGEG enumera essas características [12]:

- Isolamento térmico insuficiente nos elementos opacos;
- Existência de pontes térmicas na envolvente;
- Presença de humidade;
- Baixo desempenho térmico de vãos envidraçados e portas;
- Falta de proteções solares adequadas nos vãos envidraçados;
- Ventilação não controlada.

Na Europa a população passa cerca de 90% do tempo no interior de edifícios, o que quando associado a uma má gestão do consumo de energia leva a gastos desnecessários muito elevados, mais propriamente gastos em climatização, especialmente em regiões com verões quentes e prolongados [6], [15].

No que diz respeito ao dimensionamento dos vãos envidraçados, este deve ter em conta a orientação e a área que ocupam relativamente à parte opaca. Sendo que a qualidade deste dimensionamento se reflete no contributo dos envidraçados ao nível do conforto térmico e ótico nos espaços interiores dos edifícios, merecem especial destaque os casos de climas com estação quente predominante, em que os ganhos solares pelos envidraçados contribuem de forma muito significativa para as cargas térmicas de arrefecimento, podendo originar problemas de encadeamento e afetando negativamente a produtividade dos utilizadores [6], [7]. Para o caso de Portugal é aconselhada uma proporção de área de envidraçados não superior a 35% em relação à área opaca nas fachadas orientadas a sul. Além disso, é ainda recomendada a utilização de sistemas de sombreamento pelo exterior de forma a controlar a entrada de raios solares diretos e equilibrar os níveis de luminosidade [10]. Contudo, devido às características estéticas conferidas pelo vidro, a utilização deste na construção tem vindo a aumentar significativamente, com especial destaque para os edifícios não residenciais [16].

Apesar dos esforços desenvolvidos ao nível da evolução das tecnologias de envidraçados resultarem numa oferta cada vez maior de tipos de envidraçados, os ganhos conseguidos em eficiência energética com o conforto térmico tendem a ser contrariados pelo aumento das áreas de envidraçados. Uma vez que este aumento, ao contrário, contribui positivamente para a diminuição dos custos de energia com iluminação artificial (entre 10 a 20% da energia consumida em países industrializados) [17]-[18] o projeto depara-se com uma elevada dificuldade na obtenção de um equilíbrio ao nível das áreas envidraçadas que garanta simultaneamente as condições térmicas e óticas ideais, de modo a não perturbar as tarefas visuais e não influenciar negativamente os gastos energéticos em climatização [12], [17]. Segundo a publicação da MGE (Madison Gas and Electric), os consumos energéticos associados ao arrefecimento, iluminação e ventilação representam cerca de 62% do uso de eletricidade, enquanto os consumos associados ao aquecimento de espaços representam cerca de 86% do consumo total de gás natural, sendo estes dados referentes aos edifícios de escritórios nos Estados Unidos [18]. A par destes dados para o caso dos Estados Unidos, tem-se ainda o exemplo de Hong Kong em que um estudo numérico refere que 80% da energia elétrica consumida em edifícios de escritórios se destina a sistemas de iluminação artificial e sistemas de ar condicionado [19]. Embora estes estudos forneçam informação importante, é sabido que o clima em Portugal difere do clima característico dos casos acima mencionados, pelo que os consumos energéticos deverão também deles diferir devido aos Invernos amenos e chuvosos e aos Verões quentes e secos característicos do clima mediterrânico [12], [20].

Perante as alterações climáticas mencionadas no quinto relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) prevê-se alguns impactos ao nível das necessidades de climatização em diversas zonas do globo [2], [3]. Com base nesta premissa, têm sido desenvolvidos alguns estudos com vista a apurar quais serão esses impactos em diferentes países como Suíça [21], Estados Unidos [22], Burkina Faso [23], Turquia [24], entre outros, em que o foco principal são os edifícios não-residenciais. Como resultados destes estudos prevê-se uma diminuição das necessidades de aquecimento, assim como uma diminuição da duração da estação de aquecimento. Por outro lado, prevê-se que as necessidades de arrefecimento em edifícios comerciais aumentem significativamente,

tal como a duração da estação de arrefecimento, que também é expectável que aumente. Desta forma, torna-se imperativo a aplicação de medidas que melhorem a eficiência energética dos edifícios, principalmente em edifícios daquele tipo [21]-[25], [26].

Em situações como a de Portugal, em que o clima é tipicamente mediterrânico, com uma estação de arrefecimento predominante, as implicações resultantes das alterações climáticas serão ainda maiores. Com base nos estudos feitos em Portugal, prevê-se que o aumento das necessidades de arrefecimento superem, em larga escala, a diminuição das necessidades de aquecimento, pelo que a necessidade de implementação de estratégias e medidas que permitam aumentar a eficiência energética dos edifícios será fundamental [27].

## **2.2. Propriedades térmicas e óticas dos envidraçados**

Antes da apresentação das propriedades térmicas e óticas dos envidraçados, importa fazer uma breve descrição relativa à radiação emitida pelo Sol e em que medida é que a mesma se revela importante no desempenho térmico e lumínico de edifícios.

A luz do Sol assume um papel indispensável para a vida na Terra, uma vez que é devido a esta radiação que a manutenção e conservação de todo o Ecossistema é garantida, sendo que na ausência da mesma, a Vida como é conhecida seria incomportável. Em relação à radiação solar que atinge a superfície terrestre, é possível fazer uma distinção entre radiação direta e radiação difusa. Por radiação direta entende-se a radiação que atravessa a atmosfera unidireccionalmente, não sofrendo nenhum desvio causado pela atmosfera. Quanto à radiação difusa, esta é referente à parcela da radiação que só chega à Terra depois de sofrer múltiplos desvios em diferentes direções pelos componentes da atmosfera. Desta forma, verifica-se que em dias de céu limpo a radiação é maioritariamente direta enquanto em dias de céu encoberto a radiação é sobretudo difusa [28]. Do total de radiação emitida pelo Sol, que chega à Terra quer de forma direta quer de forma difusa, cerca de metade (51%) é absorvida pelo solo e oceanos, cerca de 30% é refletida pela Terra, atmosfera e nuvens para o espaço e cerca de 19% é absorvida pela atmosfera e nuvens (estes valores variam ligeiramente conforme as fontes consultadas, sendo os valores mencionados os mais recentes) [29], [30]. Na Figura 2-2 é apresentada uma representação esquemática do papel da atmosfera na absorção e difusão da radiação, devendo-se notar que os valores apresentados diferem ligeiramente dos valores atuais.

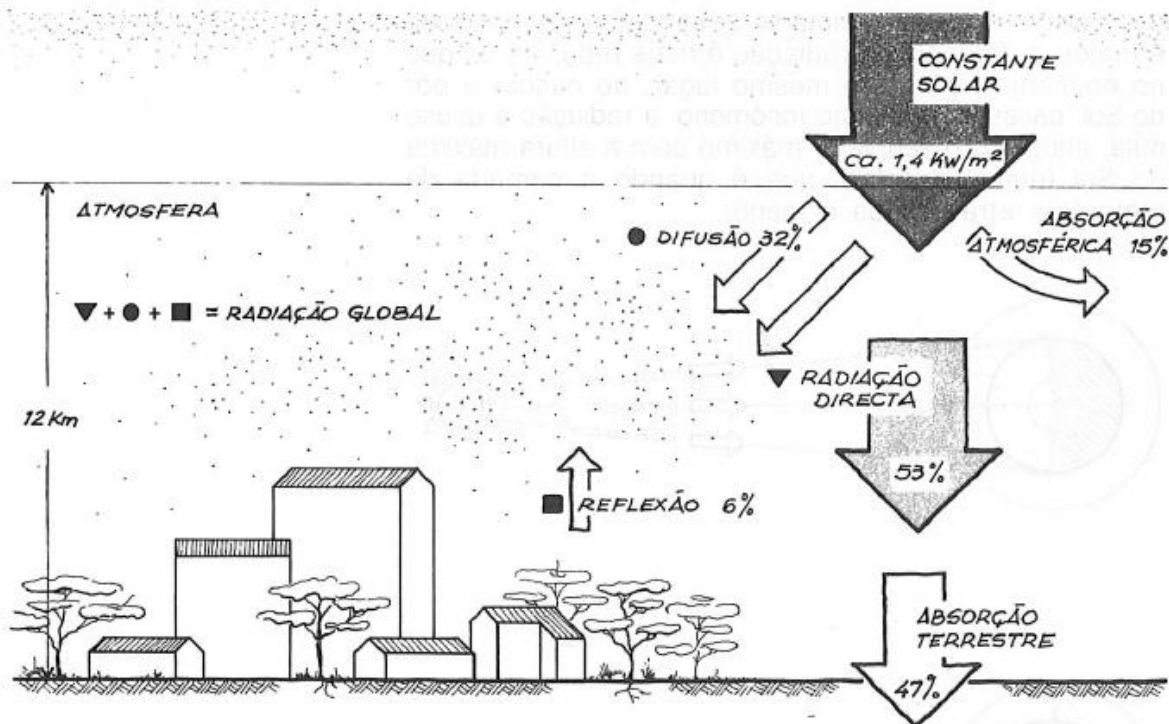


Figura 2-2 Representação esquemática da influência da atmosfera nos fenômenos de absorção e difusão da radiação solar [29].

Uma vez que a radiação solar consiste em radiação eletromagnética pode-se analisá-la segundo o espectro eletromagnético. Deste ponto de vista pode-se dividir a radiação solar em três tipos de radiação de acordo com o seu comprimento de onda, sendo elas:

- a radiação ultravioleta (UV) (com comprimentos de onda entre os 100 e os 400 nm);
- a radiação visível (com comprimentos de onda entre os 400 e os 700 nm);
- a radiação infravermelha (IV) (com comprimentos de onda entre os 700 nm e os 1 mm).

Quando analisada quantitativamente, pode-se dizer que a radiação solar é composta por 8 a 9% de radiação ultravioleta, 46 a 47% de radiação visível e os restantes 45% (aproximadamente) de radiação infravermelha [29], [31].

Tendo em conta a composição espectral da radiação solar, torna-se pertinente fazer uma breve descrição destes três tipos de radiação. Começando pela radiação ultravioleta, trata-se de uma radiação invisível para o olho humano e é constituída por ondas de baixo comprimento de onda, o que quer dizer que embora represente apenas entre 8 a 9% da radiação solar é uma radiação muito energética, podendo causar queimaduras solares e a degradação acelerada de alguns materiais. A atmosfera, mais propriamente a camada de ozono, assume um papel fundamental ao bloquear a maior parte da radiação ultravioleta proveniente do espaço [32].

Relativamente à radiação visível, esta ocupa um espaço muito pequeno no espectro eletromagnético, contudo é a única radiação perceptível pelo olho humano, revelando-se desta forma uma radiação de elevada importância para os seres humanos e relacionando-se profundamente com o conceito de conforto visual. Quando utilizada de forma eficiente, permite uma redução significativa do

consumo energético associado aos sistemas de iluminação artificial conforme anteriormente referido [33], [34].

Quanto à radiação infravermelha, apresenta comprimentos de onda maiores do que a radiação visível (menos energética) e embora não seja perceptível pelo olho humano, pode-se percebê-la através da sensação de calor. Esta radiação é emitida por todos os corpos conforme a sua temperatura [35].

Os envidraçados possuem a peculiaridade de serem permeáveis à radiação de onda curta (radiação visível e radiação infravermelha próxima da visível) e impermeáveis à radiação de onda longa (radiação infravermelha longa), sendo esta particularidade a principal responsável pelo aquecimento excessivo em edifícios (efeito de estufa). Ou seja, grande parte da radiação solar incidente, transmitida diretamente através dos envidraçados, é absorvida pelas superfícies internas e objetos que se encontram no interior conduzindo a um aquecimento dos mesmos e resultando numa maior emissão de radiação térmica de comprimento de onda longo (proporcional a  $T^4$ ) [36]. Como os envidraçados não são atravessados pela radiação de onda longa emitida do interior, o resultado pode ser um aquecimento excessivo do ambiente interno. A radiação solar, a par da temperatura, revela-se desta forma num parâmetro fundamental a ter em conta na análise do comportamento térmico e ótico dos edifícios.

Conforme mostra Chaiyapinunt et al. [37], diferentes tipos de vidro, ou até mesmo o mesmo tipo de vidro com diferentes espessuras, exibem diferentes comportamentos espectrais. Esta diferença no comportamento espectral está associada às propriedades dos envidraçados, que podem variar conforme o comprimento de onda da radiação. As principais propriedades que classificam o desempenho de um envidraçado são [38]:

- o coeficiente de transmissão térmica (U);
- o fator solar (g) ou Solar Heat Gain Coefficient (SHGC);
- a transmitância visível ( $T_v$ );
- o Coeficiente de Seletividade Espectral (CSE).

Seguidamente é apresentada uma breve descrição destas propriedades, assim como o papel que desempenham no comportamento dos envidraçados.

### **2.2.1. Coeficiente de transmissão térmica (U)**

O coeficiente de transmissão térmica traduz a troca de calor que atravessa um elemento de construção por unidade de área e de diferença de temperatura entre os ambientes que separa [39]. Este coeficiente envolve as três formas de transferência de calor - condução, convecção e radiação - e constitui um parâmetro fundamental no cálculo das necessidades energéticas de um edifício, uma vez que representa uma medida da energia térmica que atravessa um elemento construtivo separando ambientes a temperatura desigual. A expressão para o cálculo deste coeficiente no caso dos envidraçados é a que se segue [10]:



$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{e_v}{\lambda_v} + R_a + \frac{1}{h_e}} \quad (2.1)$$

em que:  $1/h_i$  – resistência térmica superficial interior [ $m^2K/W$ ];

$1/h_e$  – resistência térmica superficial exterior [ $m^2K/W$ ];

$e_v$  – espessura do vidro [m];

$\lambda_v$  – condutibilidade térmica aparente do vidro (1.1 W/mK);

$R_a$  -resistência térmica total do(s) espaço(s) de ar, ou de outro gás, entre vidros ( $R_a=0$  para vidros simples) [ $m^2K/W$ ].

Em termos físicos, este coeficiente representa o fluxo de calor por hora e por metro quadrado que atravessa o envidraçado, para uma diferença de 1°C entre o ambiente interior e o ambiente exterior e é expresso em  $W/m^2°C$  [33].

### 2.2.2. Factor solar (g)

O fator solar (g) ou Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) constitui um indicador da capacidade de um envidraçado captar energia solar para o espaço interior. Da radiação total incidente num envidraçado, uma parte é transmitida imediatamente para o interior, outra parte é refletida para o exterior e uma terceira parte é absorvida pelo próprio vidro, representando esta última a energia acumulada no vidro. Desta radiação absorvida pelo vidro, há uma parcela que é depois emitida para o interior e outra parcela que depois é emitida para o exterior (Figura 2-3). Define-se como sendo o quociente entre a energia solar transmitida (parcela instantânea e parcela diferida) através do vidro ( $T+A_i$ ) e a energia solar que nele incide ( $I_g$ ) (Figura 2-3), e traduz-se pela expressão seguinte [10], [33]:

$$g = \frac{T+A_i}{I_g} \quad (2.2)$$

em que:  $I_g$  – radiação solar global incidente [ $W/m^2$ ];

$T$  – radiação solar transmitida [ $W/m^2$ ];

$R$  – radiação solar refletida [ $W/m^2$ ];

$A_e$  – radiação solar absorvida e reenviada para o exterior [ $W/m^2$ ];

$A_i$  – radiação solar absorvida e reenviada para o interior [ $W/m^2$ ].

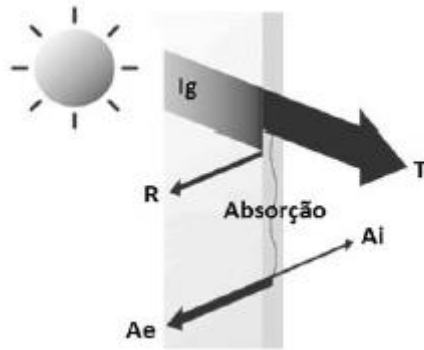


Figura 2-3 Comportamento térmico do vidro à energia solar incidente [39].

O fator solar é variável com o ângulo de incidência solar, condições externas de convecção natural, velocidade do vento e espessura do vidro [39]. É comum encontrar no mercado fatores solares que variam entre 0.10 e os 0.90 [40].

### 2.2.3. Transmitância visível ( $T_v$ )

A transmitância visível corresponde à percentagem de luz visível que ao atingir um envidraçado passa para o interior (Figura 2-4). Desta forma, vidros com transmitância elevada têm um aspeto transparente e garantem uma iluminação abundante, devendo ser utilizados para maximizar a entrada de luz natural. Contudo poderão originar problemas de encandeamento e desconforto visual se os níveis de iluminação interior forem superiores aos valores de referência. No caso dos vidros com transmitância baixa, estes devem ser utilizados em locais em que existam problemas graves de encandeamento. Contudo têm a desvantagem de criar ambientes luminosos interiores insuficientes em certas condições meteorológicas, visto que não permitem uma entrada suficiente de luz natural para um bom desempenho de tarefas visuais típicas. Quando utilizados vidros com transmitância baixa, surge normalmente a necessidade de complementar a iluminação natural com sistemas de iluminação artificial em dias com baixos níveis de radiação solar, de forma a garantir os níveis mínimos de conforto visual, o que resulta num aumento do consumo de energia [10], [39].

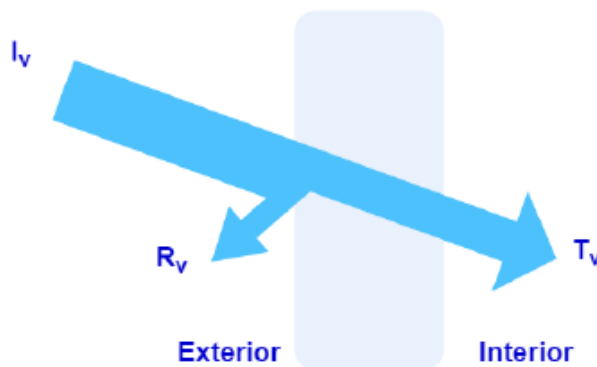


Figura 2-4 Transmitância e refletância visível de um envidraçado [10]:  $I_v$  – radiação solar visível incidente;  $T_v$  – radiação visível transmitida para o interior;  $R_v$  – radiação visível refletida para o exterior.

O fator  $T_v$  deve ser definido com base na tipologia do espaço e das características de iluminação que se pretende para esse mesmo espaço [39].

#### 2.2.4. Coeficiente de seletividade espectral (CSE)

A seletividade espectral refere-se à capacidade de um envidraçado responder de forma diferente para diferentes comprimentos de onda da radiação. Entende-se por vidro espectralmente seletivo ideal um vidro que permita a transmissão abundante de luz visível e rejeite o calor associado à radiação infravermelha. A seletividade espectral avalia-se através do coeficiente de seletividade espectral, definido como sendo o quociente entre o fator- $T_v$  e o fator- $g$  do vidro em questão e traduz-se pela expressão [39]:

$$CSE = \frac{T_v}{g} \quad (2.3)$$

Valores de CSE superiores a 1.2 apontam para vidros com comportamento espectralmente seletivo. Esta capacidade revela-se bastante útil para edifícios em climas quentes e com elevados níveis de radiação solar em que, idealmente, deveriam possuir envidraçados capazes de rejeitar a radiação ultravioleta e infravermelha e simultaneamente de serem permeáveis à radiação visível de forma a diminuir os ganhos solares [39]. Este tipo de vidros inclui na sua composição uma camada de um filme responsável pela seletividade espectral e uma cor neutra ou levemente azul esverdeada [41].

Conforme referido anteriormente, os envidraçados assumem um papel significativo nas trocas de calor entre o exterior e o interior de um edifício, o que, a par do aumento das áreas de envidraçados por razões estéticas e das alterações climáticas verificadas, impõe uma preocupação acrescida com a otimização do desempenho dos envidraçados, procurando-se minimizar as perdas de calor na estação de aquecimento e impedir os ganhos de calor excessivos na estação de arrefecimento. Caso este cuidado não seja tido em conta é de esperar um aumento significativo nos consumos energéticos, por um lado devido à utilização de sistemas de climatização com vista a garantir o conforto térmico e por outro lado devido à utilização de iluminação artificial como forma de contornar o desconforto visual motivado pelo excesso de luz natural.

No caso de construção nova estas situações são, até certo ponto, facilmente controláveis através de um correto planeamento durante a fase de projeto. Contudo, no caso de edifícios já construídos, a situação é diferente uma vez que na maior parte das vezes é-se deparado com custos demasiado elevados, impossibilidades de ordem técnica ou até mesmo com imposições regulamentares que impossibilitam a troca dos envidraçados [10].

Uma solução que permite ultrapassar estas condicionantes, e que será estudada nesta dissertação, é o recurso a películas adesivas de controlo solar que permitem a alteração das propriedades dos envidraçados anteriormente referidas, como a transmitância visível e o fator solar, e que podem contribuir para uma redução significativa no consumo energético no sector da construção.



# 3. Películas inteligentes para envidraçados

## 3.1. Contexto histórico

O conceito de películas de envidraçados surgiu no início dos anos 60. Naquela época, o objetivo principal das películas era controlar os desequilíbrios de aquecimento e arrefecimento resultantes das cargas solares. Contudo, verificou-se que estas películas refletem a radiação solar, impedindo o aquecimento excessivo das superfícies internas mas sem afetar as condições de iluminação natural significativamente, ao contrário do que acontece com os dispositivos de sombreamento [42].

Com o passar do tempo assistiu-se a um desenvolvimento tecnológico que permitiu a criação de películas de controlo solar com diferentes cores que complementarizam as exigências arquitetónicas. Mas foi com a crise energética dos anos 70 que o interesse se focou em aprimorar a eficiência energética dos envidraçados através do uso de películas de controlo solar, tendo-se desenvolvido novos materiais e criado novas películas capazes de reduzir as perdas de calor para o exterior através da absorção e reenvio da radiação infravermelha longa para o interior. Assistiu-se desta forma a uma melhoria significativa da eficiência energética dos envidraçados, principalmente em climas de estação fria predominante. A par desta potencialidade das películas de controlo solar, acrescenta-se a capacidade de redução dos impactos ambientais de uma forma mais eficaz e com um menor custo associado do que a substituição de janelas, tendo-se assistido a um aumento da procura deste tipo de películas para fazer face ao aumento dos custos de energia [42].

No entanto, as condições climáticas mudam frequentemente de frio para quente e de ensolarado para nublado. Com base nesta ideia, começam a surgir tentativas de desenvolver “sistemas inteligentes” que possam ser modulados em função das condições climáticas, implicando uma diminuição no consumo energético. Neste sentido são então criadas as janelas inteligentes com a capacidade de transformar os envidraçados em elementos dinâmicos que possibilitam a regulação de propriedades como o fator solar ( $g$ ) e a transmitância ( $T$ ), culminando numa redução dos ganhos solares e num eficaz controlo da quantidade de luz visível que atravessa o envidraçado, indo de encontro às preocupações com a gestão de energia [43], [44], [45].

Os vidros inteligentes incluem vários tipos de dispositivos que se dividem em ativos e passivos, sendo que os dispositivos ativos se distinguem dos passivos pela possibilidade de comutação externa [46]. Na Figura 3-1 é apresentado um esquema com os diferentes tipos de dispositivos para vidros inteligentes.

Na segunda metade da década de 80, o eletrocromismo sofre um grande impulso ao ser reconhecido um elevado potencial no que diz respeito à eficiência energética dos envidraçados,

revelando-se nos dias de hoje como a tecnologia mais avançada e mais utilizada para dispositivos comutados [47], [48], [49]. Neste sentido considerou-se útil a descrição das películas electrocrómicas no subcapítulo 3.2.3, para além das películas abordadas no caso de estudo (subcapítulos 3.2.1 e 3.2.2).

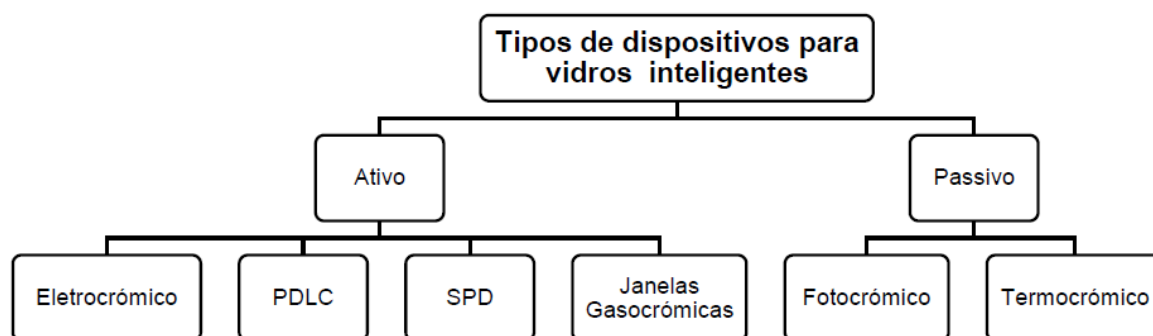


Figura 3-1 Tipos de dispositivos para vidros inteligentes [46].

Na Tabela 3-1 são apresentadas as principais especificações de cada um dos tipos de dispositivos utilizados em janelas inteligentes.

Tabela 3-1 Principais especificações dos dispositivos utilizados em janelas inteligentes ([46] adaptado de [50]).

	Vantagem	Desvantagem	Principais Características
<b>Electrocrómicos (EC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modulação solar</li> <li>▪ Controlo do brilho</li> <li>▪ Reduz as cargas de aquecimento e arrefecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custo</li> <li>▪ Níveis de modulação limitados</li> <li>▪ Alto tempo de comutação</li> <li>▪ Necessita de energia elétrica para a modulação transparente</li> <li>▪ Baixo SHGC para climas frios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Normalmente 2V</li> <li>▪ Alteração de transmitância até 60%</li> <li>▪ Economias de iluminação até 60%</li> </ul>
<b>Dispositivos de partículas suspensas (SPD)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modulação solar</li> <li>▪ Controlo do brilho</li> <li>▪ Rápido tempo de resposta</li> <li>▪ Vários níveis de transparência</li> <li>▪ Controla radiação UV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Precisa de energia elétrica para manter a transparência</li> <li>▪ Custo</li> <li>▪ SHGC relativamente baixo</li> <li>▪ Controlo razoável de radiação IV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transmissão depende do tipo e densidade das partículas</li> <li>▪ Comutação (100-200 ms)</li> <li>▪ 106 ciclos</li> </ul>
<b>Cristais líquidos dispersos em polímero (PDLC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Controlo do brilho</li> <li>▪ Fica opaco para questões de privacidade</li> <li>▪ Minimiza custos energéticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Precisa de energia elétrica para manter a transparência</li> <li>▪ Não permite a modulação de SHGC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bloqueia radiação UV e IV</li> <li>▪ Comutação 1/10 s</li> <li>▪ 105 -106 ciclos</li> </ul>

<b>Gasocrómico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modulação solar</li> <li>▪ Controlo do brilho</li> <li>▪ Rápida resposta relativamente aos dispositivos electrocrómicos</li> <li>▪ Estrutura mais simples que a estrutura electrocrómica</li> <li>▪ Baixo custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ainda não se encontra no mercado</li> <li>▪ Precisa de equipamento especial e energia elétrica para a operação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transmitância varia de acordo com a relação %H<sub>2</sub>/Ar (gás)</li> <li>▪ Não contem na sua estrutura condutores transparentes</li> </ul>
<b>Fotocrómico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fabricação e instalação simples</li> <li>▪ Não precisa de fornecimento de potência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regulação apenas em conformidade com a luz, pelo que ainda não foi comercializado</li> </ul>	
<b>Termocrómico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduz o brilho</li> <li>▪ Reflete a radiação infravermelha</li> <li>▪ Reduz SHGC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baixa transmitância visível</li> <li>▪ A modulação solar não é substancial</li> <li>▪ A temperatura de ativação é alta</li> </ul>	

## 3.2. Constituição das películas para envidraçados

### 3.2.1. Constituição de películas adesivas poliméricas

Ao longo dos anos tem-se assistido a uma constante alteração da constituição das películas adesivas poliméricas. Com o desenvolvimento tecnológico este tipo de películas passou de um “plástico reforçado” para um material complexo e de elevado desempenho, podendo ser constituído por até 230 camadas [42].

A aplicação da película ao envidraçado pode ser feita através de dois tipos de adesivos: adesivos sensíveis à pressão e adesivos ativados com água. No caso dos primeiros, é criada uma ligação entre a película e o envidraçado através da aplicação de forças de pressão. No caso dos segundos, a ligação película – envidraçado é obtida através de reações químicas fortes entre o adesivo e a água, garantindo um aspeto mais transparente, uma maior durabilidade da ligação e uma elevada aderência [7].

A constituição típica das películas adesivas poliméricas, de acordo com a EN 15752-1, é apresentada na Figura 3-2. A constituição deste tipo de películas pode ser ligeiramente mais simples ou mais complexa do que o exemplo apresentado, dependendo do fabricante e da sua finalidade. De uma forma geral, as películas incluem as seguintes camadas na sua constituição [7], [51]:

- a) Revestimento resistente à abrasão e a riscos;
- b) Camadas revestidas por películas de poliéster;

- c) Adesivo de laminação;
- d) Película de poliéster com proteção ultravioleta embebida na película;
- e) Resina de ultravioleta de alto desempenho;
- f) Proteção descartável;
- g) Vidro;
- h) A camada f) é removida imediatamente antes da instalação da película.

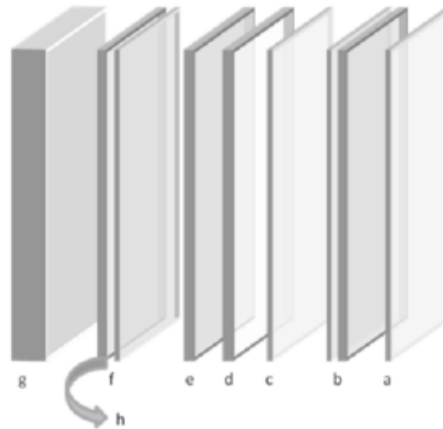


Figura 3-2 Constituição típica de uma película adesiva polimérica [51].

### 3.2.2. Constituição de películas de cristais líquidos dispersos em polímero (PDLC)

Este tipo de películas, tal como a sua designação indica, é constituído por cristais líquidos de baixo peso molecular e com forma de gota, dispersos numa matriz de polímero. Estes cristais dispersos em polímero encontram-se compreendidos entre dois condutores transparentes e aquando da imposição de uma tensão proporcionam a alteração das propriedades de transmissão ótica, tal como mostra a Figura 3-3 [52], [53], [54].

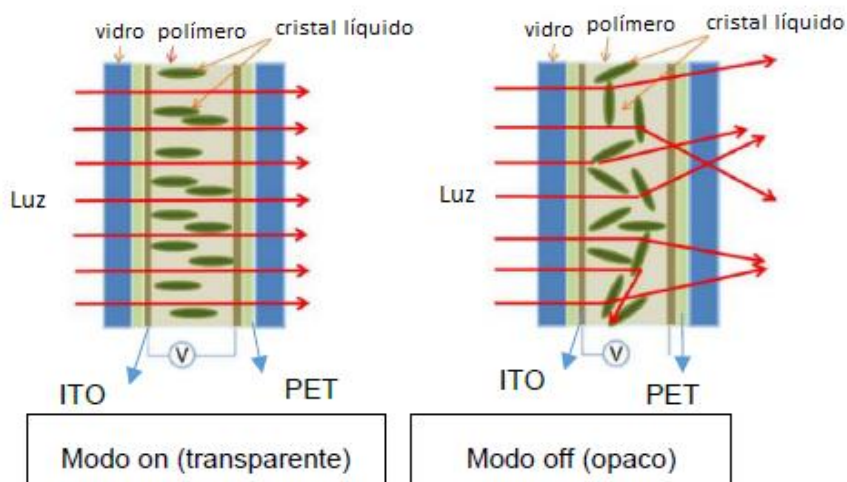


Figura 3-3 Esquema do funcionamento do PDLC (adaptado) de [46].



Conforme mostra a Figura 3-3, este tipo de películas apresenta um modo transparente quando aplicada uma tensão e um modo opaco quando não é aplicada nenhuma tensão. No primeiro caso (modo transparente), ocorre uma orientação das moléculas no interior dos cristais devido à tensão aplicada e quando surge a combinação dos índices refrativos dos cristais e do polímero, ocorre a passagem de luz. No segundo caso (modo opaco), os cristais encontram-se desorientados, e o facto de o índice refrativo dos cristais não combinar com o índice refrativo da matriz de polímero resulta na dispersão da luz [52].

A aplicação da película PDLC ao envidraçado pode ser feita através de dois tipos de fixação: autoadesivo sensível à pressão e fixador mecânico (fita adesiva de dupla face). No caso do primeiro, é criada uma ligação entre a película e o envidraçado através da aplicação de forças de pressão. No caso do segundo, a ligação película – envidraçado é conseguida através da aplicação de uma fita adesiva nos bordos do envidraçado [55]. Importa realçar que no segundo método apenas os bordos da película são fixos ao envidraçado.

Importa referir que apesar deste tipo de dispositivos possibilitar uma dispersão da luz no modo *off*, conferindo uma opacidade dinâmica para privacidade, normalmente não oferece reduções significativas do fator solar o que, a par da necessidade de aplicação de um campo elétrico constante para garantir o funcionamento como meio transparente e dos valores elevados de aquisição praticados, pode tornar este tipo de películas visto como um dispositivo pouco económico [53], [56].

### 3.2.3. Constituição de películas electrocrómicas

Neste tipo de películas, a variação da transmitância ocorre devido à camada electrocrómica, que altera a capacidade de absorção devido à migração de iões através do eletrólito localizado no centro da película. O transporte é mais fácil para iões pequenos, sendo usados na maioria das películas electrocrómicas prótons de hidrogénio (H<sup>+</sup>) ou lítio (Li<sup>+</sup>). Inicialmente os eletrólitos utilizados eram líquidos transparentes e os iões continham óxidos. Contudo, no final da década de 1980, com o desenvolvimento da tecnologia de baterias eléctricas os eletrólitos de polímeros ganham importância. Os iões são movidos na película electrocrómica quando um campo eléctrico é aplicado entre dois condutores eléctricos transparentes, conforme mostra a Figura 3-4 [47]. Atualmente grande parte dos estudos desenvolvidos com este tipo de películas são no sentido de apurar quais os materiais mais eficazes nesta função.

A constituição deste tipo de películas pode variar ligeiramente do exemplo apresentado na Figura 3-4. Contudo, de uma forma geral, as películas incluem cinco camadas na sua constituição [47]:

- a) (Vidro / polyester);
- b) Condutor transparente;
- c) Camada electrocrómica;
- d) Camada de eletrólito;
- e) Camada electrocrómica;

- f) Condutor transparente;
- g) Vidro / Polyester.

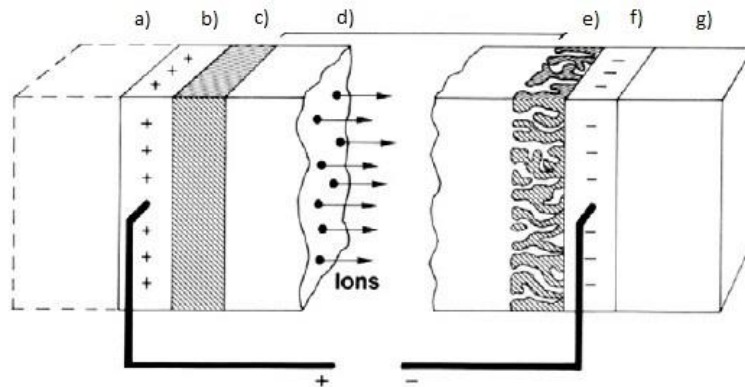


Figura 3-4 Design genérico de uma película electrocrômica de cinco camadas. As setas indicam o movimento de íões quando aplicado um campo elétrico (adaptado) de [47].

### 3.3. Propriedades das películas para envidraçados

Para caracterizar as propriedades das películas, os fabricantes têm utilizado normas europeias de segurança relativas aos envidraçados, mais propriamente a EN 12600, a EN 356 e a norma ISO 16933. Apesar destas normas serem apenas específicas para vidros e não para películas, os fabricantes têm-se servido das mesmas para testar as características de segurança dos envidraçados com películas [42].

As normas específicas para os diferentes tipos de películas existentes no mercado (EN 15752-1) e as normas específicas para envidraçados com películas aplicadas (EN 15755-1) apenas surgiram em 2015. Com base na EN 15752-1, as películas para envidraçados definem-se em função das suas propriedades de refletância (nos dois lados da película) e de transmitância para cada espectro de radiação (ultravioleta, visível, solar e térmica, na qual se inclui a radiação infravermelha de onda longa) [51], [57].

No caso da norma EN 15752-1, esta refere que as principais propriedades solares-ópticas das películas são definidas através da norma EN 460 e consistem na transmitância visível ( $T_v$ ) e no fator solar ( $g$ ). São ainda definidas as seguintes propriedades [51]:

- Transmitância solar direta ( $T_e$ );
- Refletância solar direta ( $\rho_e$ );
- Absortância solar direta ( $\alpha_e$ );
- Refletância exterior à luz visível ( $\rho_{V,e}$ );
- Refletância interior à luz visível ( $\rho_{V,i}$ );
- Transmitância à radiação UV (TUV);
- Coeficiente de sombreamento (SC);
- Índice de reprodução cromática (Ra).

### 3.4. Tipos de películas para envidraçados

A denominação de película adesiva polimérica abrange vários tipos de películas com diferentes finalidades e funções, dependendo dos materiais que as constituem.

A EN 15752-1 divide as películas existentes nos seguintes tipos [51], [58]:

- **Películas de controlo solar:** têm como objetivo diminuir o fator solar do envidraçado de forma a controlar os aumentos de temperatura nos espaços interiores, contribuindo assim para a redução dos consumos de energia com sistemas de arrefecimento.
- **Películas de redução de encandeamento/brilho:** têm como objetivo reduzir o encandeamento e as reflexões provocadas em aparelhos eletrónicos de forma a melhorar as condições de trabalho no interior.
- **Películas de proteção e segurança:** apresentam a capacidade de absorver energia proveniente de impactos e segurar os estilhaços resultantes de uma quebra, de forma a proteger pessoas e bens materiais, contribuindo ainda para uma maior durabilidade do vidro. Este tipo de películas é recomendado para estabelecimentos de ensino, centros de saúde e complexos desportivos.
- **Películas decorativas:** têm como objetivo melhorar a estética dos envidraçados. Atualmente existe um vasto leque de ofertas que confere várias possibilidades de novos designs em edifícios.
- **Películas anti-graffiti:** estas películas são transparentes e funcionam como camada de sacrifício. Têm como característica principal a fácil remoção e apresentam a mais-valia de representar um custo menor do que a substituição do vidro existente por um novo.
- **Películas de proteção aos raios ultravioleta:** têm como objetivo impedir a entrada de radiação ultravioleta de forma a proteger os materiais no espaço interior. São normalmente recomendadas para museus e galerias de arte com o intuito de prevenir o envelhecimento precoce devido à exposição prolongada à radiação ultravioleta.
- **Películas de baixa emissividade:** têm como objetivo melhorar o isolamento térmico do vidro, contribuindo para a redução de gastos com energia tanto no verão como no inverno, mantendo a temperatura interior nos níveis de conforto térmico desejados.
- **Películas que conferem privacidade:** têm como objetivo o aumento da privacidade no interior do edifício. Estas películas podem cumprir o seu objetivo através da redução da transmitância visível, aumentando a refletância visível exterior ou tornando o vidro mais opaco (*optically diffusing film*).
- **Películas de proteção a radiofrequência e a frequência eletromagnética:** têm como objetivo moderar a transmissão de frequências eletromagnéticas entre os 30 MHz e os 15 GHz.

Apesar de existir esta diferenciação, é comum encontrar atualmente no mercado películas que combinem algumas destas características, devido não só ao avanço tecnológico, mas também ao

crescente interesse nesta área, em que o objetivo final será desenvolver um “sistema inteligente” capaz de controlar sozinho a temperatura e a luminosidade interior de forma a minimizar o consumo energético. Um exemplo disso são as películas inteligentes, que refletem um interesse neste ramo aliado às preocupações ambientais pois, apesar dos processos complexos de fabrico e consequentes custos elevados assiste-se a uma evolução tecnológica destas películas e a um desempenho cada vez mais otimizado, existindo atualmente no mercado uma vasta oferta [48], [59].

### **3.5. Estudos anteriores**

Apesar das películas de controlo solar terem surgido nos anos 60 do século passado, o interesse pela aplicação desta tecnologia no âmbito da reabilitação e eficiência energética de edifícios é muito recente, pelo que a aplicação de películas electrocrómicas em envidraçados de edifícios apenas surgiu pela primeira vez em 1999, conforme referido anteriormente. Com este crescente interesse, têm surgido vários estudos sobre o desempenho de películas de controlo solar e, mais recentemente sobre o desempenho de películas electrocrómicas, quer ao nível do desempenho térmico e energético, quer ao nível do comportamento ótico dos envidraçados existentes. Contudo, os principais estudos nesta área ou são estudos numéricos, através de programas que simulam o comportamento térmico das películas e descurando por vezes a componente ótica, ou então estudos laboratoriais, em que não existe informação prática a partir de ensaios de campo sobre as características e o desempenho térmico e ótico dos diferentes tipos de películas existentes no mercado, nem sobre o seu potencial ao nível da poupança de energia [42], [48].

Quando se fala de reabilitação energética de edifícios, as películas de controlo solar surgem como uma solução vantajosa quando comparadas com outro tipo de soluções construtivas ou materiais principalmente devido ao baixo custo e à facilidade de aplicação, independentemente de serem colocadas pelo exterior ou pelo interior dos envidraçados. Estas películas podem reduzir os custos com arrefecimento em 30% e apresentar desempenhos energéticos próximos dos vidros de baixa emissividade [60]. Apesar destes dados, prevê-se que o desempenho das películas de controlo solar possa ser ainda otimizado e um exemplo desta otimização é a aplicação das películas electrocrómicas, que surgem associadas à ideia de desenvolver um “sistema inteligente” capaz de controlar sozinho a temperatura e a luminosidade interior de forma a minimizar o consumo energético, conforme mencionado anteriormente [48].

Segundo a Associação Internacional de películas para envidraçados (IWFA -International Window Film Association) a instalação de películas em envidraçados pode representar um custo 91.5% menor do que instalar envidraçados novos e refere ainda que é previsto um retorno financeiro possivelmente inferior a 3 anos através das poupanças energéticas [60]. Embora a aplicação destas películas possa ser feita tanto em edifícios novos como na reabilitação de edifícios existentes, prevê-se que o seu principal mercado se foque no âmbito das operações de reabilitação energética de edifícios existentes, dado que esta técnica representa por norma um menor custo de aplicação, uma maior facilidade de aplicação e um impacto ambiental significativamente menor do que substituir todo o envidraçado por um outro mais eficiente [61].

Conforme já foi referido, o fator solar surge como uma das propriedades dos envidraçados com maior responsabilidade ao nível dos ganhos solares de um edifício, devendo por isso ser alvo de maior preocupação e controlo por forma a minimizar os consumos de energia para fins de climatização. Apesar de o ideal ser estabelecer o fator solar em fase de projeto, é comum ocorrerem desajustes entre o que foi projetado e o que foi realmente realizado, resultando assim em necessidades de correções. Com o objetivo de fazer face a esta necessidade de correções surgiram tentativas de redução do fator solar dos envidraçados através do uso de tintas e revestimentos. Contudo estas técnicas revelaram-se indissociáveis de reduções ao nível da transmitância visível, o que não seria suposto acontecer, uma vez que isto resultaria num aumento dos consumos de energia para fins de iluminação artificial. Por outras palavras pode dizer-se que o propósito das películas de controlo solar é reduzir os ganhos solares através do controlo do fator solar, mas sem implicações significativas nos valores da transmitância visível [62], [63]. Para isso, o controlo do fator solar deverá ser feito através da reflexão e/ou absorção de radiação solar maioritariamente na gama do infravermelho.

O grande objetivo das películas é alterar as propriedades dos envidraçados, reduzindo significativamente o fator solar sem implicações significativas nos valores de transmitância visível de forma a minimizar os consumos energéticos associados a sistemas de climatização e a sistemas de iluminação artificial. As películas inteligentes surgem assim como uma forma de cumprir os requisitos ao nível do controlo do fator solar, em alguns casos conferindo ainda a possibilidade de regular a transmitância visível de forma conveniente e vantajosa no que respeita aos consumos energéticos e ao conforto visual. A utilização de películas de controlo solar é recomendada principalmente para edifícios que apresentem problemas de aquecimento excessivo.

Existe atualmente um grande número de estudos sobre as películas inteligentes, tanto experimentais como numéricos, apresentando-se na Tabela 3-2 alguns destes estudos de forma resumida.

*Tabela 3-2 Estudos anteriores sobre películas inteligentes.*

<b>Autores</b>	<b>Tipo de edifício</b>	<b>Local</b>	<b>Tipo de películas estudadas / tipo de estudo</b>	<b>Principais Conclusões</b>
Piccolo <i>et al.</i> [64] (2018)	Edifício residencial	Itália	Películas electrocrómicas / Experimental e numérico	Redução considerável do consumo de energia de arrefecimento (e do consumo total de energia do edifício) em climas dominados pelo arrefecimento. Os benefícios da economia de energia tornam-se menos marcantes em climas dominados pelo aquecimento e, para valores baixos da relação entre janelas e paredes, podem ser superados pelo aumento das necessidades de energia de aquecimento que resultam num

				aumento do consumo total de energia do edifício.
Tavares <i>et al.</i> [9] (2016)	Edifícios antigos (reabilitação)	Portugal	Películas electrocrómicas / Experimental e numérico	Opção eficaz no arrefecimento de edifícios. A eficiência destas películas é altamente dependente da orientação da fachada, sendo uma opção válida, particularmente nos casos das fachadas leste e oeste. Para a fachada Sul, os resultados não mostram vantagem significativa do uso deste tipo de películas.
Ajaji <i>et al.</i> [65] (2015)	Edifício de serviços (escritórios)	Sul da Bélgica	Películas electrocrómicas / Experimental	Destaca-se a vantagem de utilização de películas electrocrómicas na eliminação do sobreaquecimento, especialmente quando acoplado à ventilação noturna de baixa vazão. O envidraçamento electrocrómico evitaria o uso de arrefecimento mecânico. Elimina a iluminação excessiva, mantendo uma boa autonomia de luz do dia, exceto no Verão, quando o céu está nublado. Neste caso, a iluminação artificial seria amplamente utilizada. Em dias de sol, se a luminosidade do céu é alta, há um risco de brilho, o que significa que estores internos adicionais seriam necessários.
Sbar <i>et al.</i> [66] (2012)	Edifício comercial	Estados Unidos	Películas electrocrómicas / Experimental e numérico	Verificou-se que o pico de carga diminui significativamente quando este tipo de envidraçado faz parte da envolvente do edifício. Consequentemente, os custos em sistemas de arrefecimento são menores. As simulações feitas mostraram uma redução das emissões de CO <sub>2</sub> de 35% em novas construções e 50% em projetos de reabilitação.
Sahraoui <i>et al.</i> [52] (2011)	Não se aplica	França	Películas PDLC / Experimental	A condutividade térmica das gotículas aumenta em função do campo elétrico aplicado, levando a um aumento da condutividade térmica efetiva do filme PDLC.

				Sugere o estudo deste comportamento na aplicação de gotículas de cristais líquidos em nanocompósitos.
Baetens <i>et al.</i> [44] (2010)	Não especificado	Noruega	Películas inteligentes	A transmitância máxima, assim como a faixa de modulação no espectro visível é muito maior para janelas electrocrômicas. A modulação de transmitância foi considerada fraca para os dispositivos de cristais líquidos e estes considerados instáveis para a radiação UV. Como resultado, inadequados para aplicações externas de construção a longo prazo. As películas de cristal líquido e de partículas suspensas compartilham a desvantagem de necessitarem de um campo elétrico constante para manterem o modo transparente, o que representa maiores consumos energéticos.
Cupelli <i>et al.</i> [53] (2009)	Não especificado	Itália	Películas PDLC / Experimental	A obtenção do modo de operação inverso das películas PDLC (aplicação de um campo elétrico para obtenção do modo opaco) permite a redução dos campos elétricos utilizados. Na ausência de uma fonte de luz (noite por exemplo) a aplicação do campo elétrico não permite a alteração das propriedades de transmitância, ou seja, a película mantém-se transparente.
Lampert [45] (1998)	Não se aplica	Estados Unidos	Películas electrocrômicas, PDLC e SPD	Dos três tipos principais de vidros ativados eletronicamente, os dispositivos electrocrômicos são os mais vantajosos. Os dispositivos de cristal líquido dispersos têm um futuro muito bom, mas são de uso restrito por três características: o estado sem energia é o opaco, a neblina permanece no estado ativado (transparente) e a estabilidade UV é fraca.





## 4. Caso de Estudo

### 4.1. Descrição do caso de estudo

A campanha experimental desenvolveu-se no Edifício principal, concluído em 2009 do campus do IST (Instituto Superior Técnico) no Taguspark, e situado na zona metropolitana de Lisboa, mais especificamente no concelho de Oeiras (Figura 4-1). Foram seleccionados três gabinetes do edifício, com características, dimensões, tipo de uso e orientações semelhantes (Sudoeste). Uma vez que seriam necessárias recolhas de dados regulares, o facto de existir facilidade de acesso a estes gabinetes revelou-se também particularmente importante. Dois dos gabinetes já se encontravam com dois tipos de películas instaladas (uma película inteligente do tipo PDLC aplicada pelo interior e outra refletiva também aplicada pelo interior), tendo sido ainda seleccionado um terceiro gabinete sem qualquer película instalada, que serviu como de referência para efeitos de comparação.

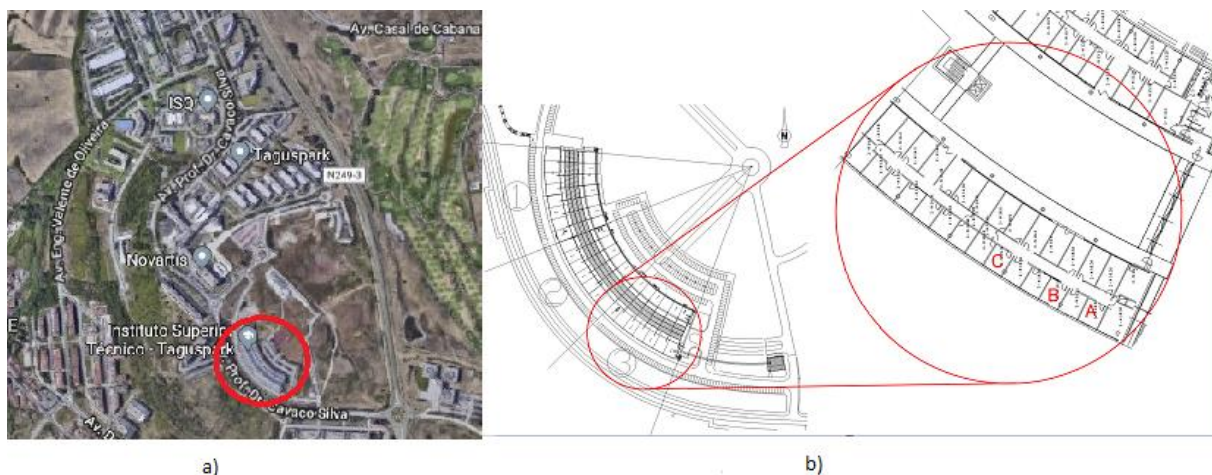


Figura 4-1 Localização do caso de estudo: a) localização do IST Taguspark; b) planta do edifício e localização dos gabinetes.

Para o referido estudo foram então definidos os três gabinetes (gabinetes individuais) apresentados na Figura 4-1 com geometria e orientação solar semelhantes. Foram assim analisados o gabinete A, sem película de controlo solar, e os gabinetes B e C, onde se mantiveram as películas existentes: no caso do gabinete B uma película inteligente do tipo PDLC aplicada pelo interior (Smart Cling Self Adhesive Smart Tint- Low driving voltage); e no gabinete C uma película refletiva também aplicada pelo interior (Linea Hogar- Safe Auto-Adhesive UV Protection) Todos os gabinetes situam-se no piso 2, que corresponde ao último piso do edifício.

No que concerne às características de ocupação, estas diferem ligeiramente para o gabinete B, apresentando este uma ocupação mais regular comparativamente com as características de ocupação dos gabinetes A e C.

A fachada exterior dos gabinetes é orientada a Sudoeste, contudo esta orientação varia ligeiramente devido ao facto da fachada não ser totalmente plana e apresentar uma curvatura. Cada um dos gabinetes apresenta uma área útil de 13,2 m<sup>2</sup> e um pé-direito de 3 m e a fachada exterior é parcialmente envidraçada, com uma área envidraçada de 4,7 m<sup>2</sup> (desta área envidraçada, apenas 1,75 m<sup>2</sup> se encontra com película aplicada) e uma área opaca de aproximadamente 7,4 m<sup>2</sup> [67]. Na Figura 4-2 é apresentado um esquema tridimensional do gabinete-tipo do caso de estudo, assim como as dimensões do envidraçado e os dispositivos de sombreamento (3 lâminas horizontais exteriores reguláveis na zona superior do envidraçado). Relativamente ao equipamento, todos os gabinetes possuem um computador pessoal, um armário, uma secretária, uma lâmpada de iluminação do gabinete e um sistema de ar condicionado. No caso do gabinete B acresce mais algum material assumido como irrelevante para o estudo em questão.

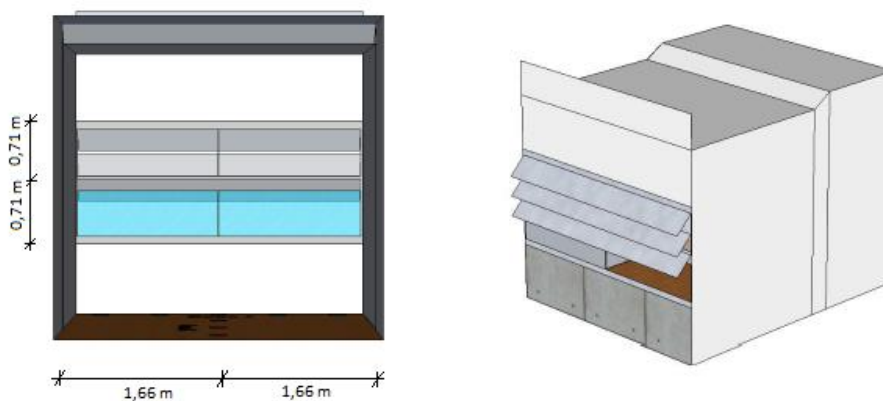


Figura 4-2 Esquema do gabinete-tipo e dimensões do envidraçado (adaptado) de [46].

Os envidraçados dos gabinetes são compostos por um vidro duplo incolor 6+12+6 mm. Ou seja, quanto ao vidro exterior, este apresenta uma espessura de 6 mm assim como o vidro interior, que apresenta a mesma espessura de 6 mm. Relativamente à caixa de ar, esta é preenchida com ar e tem uma espessura de 12 mm conforme mostra a Figura 4-3. A caixilharia dos envidraçados é de alumínio com corte térmico de cor cinza metálica. Cada vão envidraçado está dividido em 4 painéis, tal como se pode observar na Figura 4-2.

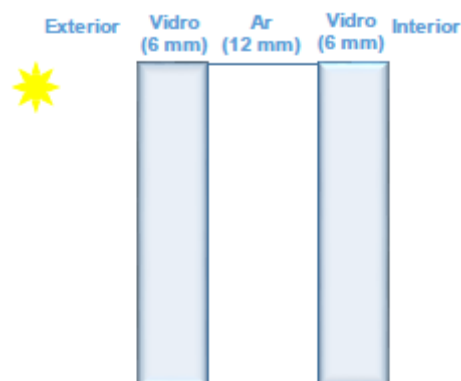


Figura 4-3 Envidraçado dos gabinetes (adaptado) de [10].

A solução de cobertura é invertida e composta, do interior para o exterior por uma camada de estuque (0,005 m), uma laje de betão (0,22 m; 0,35 m; 0,47 m), uma camada de forma em betão leve de argila expandida (0,2 m), uma camada de betonilha (0,03 m), uma tela de impermeabilização (0,002 m), uma camada de isolamento XPS (0,05m) e uma última camada de betão (0,06 m). Em todo o perímetro da cobertura existe um muro de platibanda. A fachada exterior e a cobertura constituem os elementos da envolvente térmica dos gabinetes mais sujeitos a trocas de calor entre o ambiente exterior e o ambiente interior, revelando-se no entanto o isolamento térmico existente neste elementos eficaz na redução das trocas de calor através deles [67]. Os restantes elementos da envolvente dos gabinetes, em particular as paredes de compartimentação entre gabinetes e entre os gabinetes e o corredor foram considerados adiabáticos. As restantes características da envolvente dos gabinetes podem ser consultadas na Tabela 4-1 e Tabela 4-2:

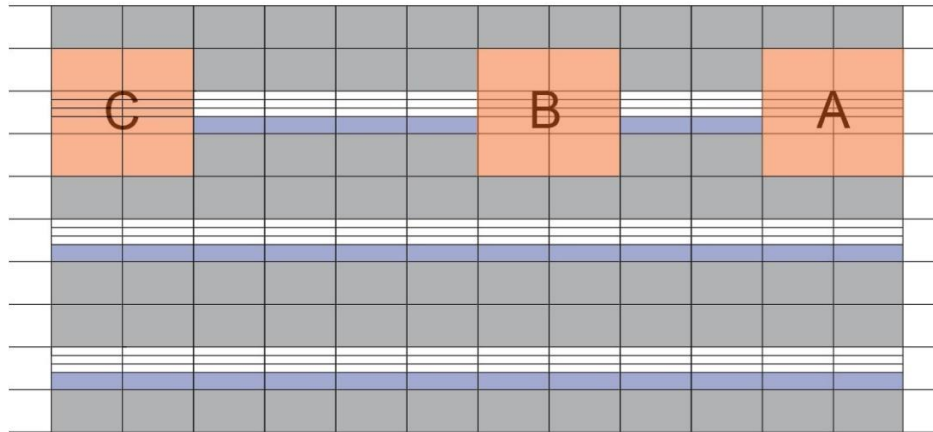
*Tabela 4-1 Propriedades térmicas da envolvente dos gabinetes (adaptado) de [46].*

Elemento	Materiais constituintes	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m K]	Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/(KgK)]	R [m <sup>2</sup> K/W]	U [W/m <sup>2</sup> °C]	Área [m <sup>2</sup> ]
<b>Cobertura</b>	Lajeta de betão pré-fabricado	0,06	1,13	2000	1000	0,0531		
	Isolamento XPS	0,05	0,037	30	1550	1,3514		
	Tela de impermeabilização	0,002	0,14	1200	1040	0,0143		
	Betonilha	0,03	1,13	2000	1000	0,0265	0,490	7,87
	Camada de forma em betão leve de argila expandida	0,2	1,3	1460	880	0,1538	0,519	4,36
	Laje de betão	0,47				0,214		
	Laje de betão	0,35	2,2	2300	900	0,1590		
	Laje de betão	0,22				0,1		
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		
<b>Paredes interiores</b>	Alvenaria de tijolo furado	0,25	0,39	1200	920	0,6410	1,184	12,33
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		

Tabela 4-2 Propriedades térmicas da envolvente dos gabinetes (adaptado) de [46] (cont.).

Elemento	Materiais constituintes	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/m K]	Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/(KgK)]	R [m <sup>2</sup> K/W]	U [W/m <sup>2</sup> ·°C]	Área [m <sup>2</sup> ]
<b>Parede exterior (superior ao envidraçado)</b>	Painel de fibrocimento	0,01	0,48	1500	1800	0,0208	0,567	2,56
	Isolamento XPS	0,05	0,037	30	1550	1,3514		
	Betão	0,08	2,2	2300	900	0,0364		
	Caixa de ar	0,015	-	1,2922	0,24	0,1700		
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		
<b>Parede exterior (inferior ao envidraçado)</b>	Painel de fibrocimento	0,01	0,48	1500	1800	0,0208	0,590	2,70
	Isolamento XPS	0,05	0,037	30	1550	1,3514		
	Argamassa de cal escura	0,02	1,3	1900	1046	0,0154		
	Betonilha	0,2	1,65	2000	900	0,1212		
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		
<b>Pavimento</b>	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167	1,715	13,14
	Betão	0,47	2,2	2300	900	0,2136		
	Chão flutuante	0,02	0,14	2300	1000	0,1429		

O acesso à cobertura é normalmente realizado para fins de manutenção e extraordinariamente para a recolha de dados das campanhas experimentais. A fachada Sudoeste do edifício, assim como a localização dos gabinetes do caso de estudo e o muro de contorno da cobertura são apresentados na Figura 4-4.



*Figura 4-4 Esquema do alçado e localização dos gabinetes.*

Conforme referido anteriormente, as películas estudadas não resultaram de qualquer seleção prévia, uma vez que já se encontravam instaladas quando o presente trabalho se iniciou. Importa referir que durante o estudo a taxa de ocupação de cada gabinete variou, tendo-se revelado um aspeto difícil de controlar. Embora tenha sido pedido aos ocupantes que adotassem idêntica disposição e modo de funcionamento para os gabinetes, esta condição nem sempre foi assegurada, tendo havido alguns registos de utilização do sistema de ar condicionado durante a campanha experimental que não era aconselhável acontecer para não mascarar os efeitos das películas em avaliação. Contudo foi uma situação compreensível, uma vez que o conceito de conforto é relativo e as reações às condições térmicas do ambiente podem ser diversas. No entanto, estas diferenças de comportamento não tiveram implicações importantes na análise dos resultados até porque houve muitos registos de dias sem utilização do sistema de climatização que puderam ser aproveitados para o estudo das películas.

## **4.2. Películas utilizadas no caso de estudo**

Conforme referido anteriormente, no gabinete B foi implementada uma película inteligente do tipo PDLC (cristais líquidos dispersos em polímero) e no gabinete C uma película do tipo refletiva de controlo solar composta 100% por poliéster.

Relativamente à película inteligente utilizada, esta trata-se de uma Smart Cling Self Adhesive Smart Tint- Low driving voltage, que apresenta como vantagens a aplicação direta no envidraçado devido ao revestimento adesivo e as propriedades óticas atrativas conforme se pode verificar na Figura 4-5, mais propriamente um baixo fator solar que se associa a uma quantidade de energia transmitida reduzida. Além disto, possui ainda uma boa durabilidade à exposição solar [46].

Description	NON-Adhesive Smart Tint		Smart Cling Self Adhesive Smart Tint	
	(HC-NF)	Low driving voltage High on clarity (LV-NF)	(HC-SF)	Low driving voltage High on clarity (LV-SF)
Film thickness	0.4 mm		0.35mm	
Film sizes	70" x 1958" or 1778mm x 50m		1505mm x 50m or 59.25" x 1958"	
UV block	> 99%		> 99%	
IR block	Standard Low Haze High Clarity > 20%	IR90 Low Haze High Clarity + Heat Block > 98%	Standard Low Haze High Clarity > 20%	IR90 Low Haze High Clarity + Heat Block > 98
Solar heat gain coefficient (950 nm)	0.71	0.1	0.71	0.1
Operation temperature	- 10 °C ~ 60 °C			
Parallel light transmittance (650 nm)	96 ± 1 (on) 1.8 ± 0.5 (off)	96 ± 1 (on) 2 ± 1 (off)	96 ± 1 (on) 1.8 ± 0.5 (off)	96 ± 1 (on) 2 ± 1 (off)
Total light transmittance	90 ± 1 (on) 4 ± 2 (off)	98 ± 1 (on) 4 ± 2 (off)	90 ± 1 (on) 4 ± 2 (off)	98 ± 1 (on) 4 ± 2 (off)
Haze	3 ± 1 (on) 89 ± 2 (off)	4.0 ± 1 (on) 96 ± 2 (off)	3 ± 1 (on) 89 ± 2 (off)	4.0 ± 1 (on) 85 ± 2 (off)
Operating voltage	100 ~ 120 VAC	35~75 VAC	100 ~ 120 VAC	35~75 VAC
Frequency range	50 ~ 60 Hz			
Power consumption	3 ~ 4 W/m <sup>2</sup>			
Switching speed	Off → On : 50~100 milliseconds / On → Off : 200~300 milliseconds			

Figura 4-5 Propriedades da película inteligente PDLC Smart Cling Self Adhesive Smart Tint- Low driving voltage [68].

Quanto à película refletiva com proteção solar implementada, esta trata-se de uma Linha Hogar- Safe Auto-Adhesive UV Protection que apresenta ainda a capacidade de funcionar como película de segurança. Apresenta apenas na sua composição poliéster e tal como a película inteligente acima mencionada, também esta pode ser implementada em envidraçados já existentes. As propriedades desta película são apresentadas na Figura 4-6 [46].

Características			
<b>Composición Film</b>	100% PET (Poliéster)		
<b>Grueso del Film</b>	75 micras		
<b>Composición Soporte</b>	100% PET (Poliéster)		
<b>Normativa REACH</b>	Fabricado según normativa REACH		
<b>Grueso del Soporte</b>	23 micras		
<b>Adhesivo</b>	Acrílico.		
<b>Depósito de adhesivo</b>	19 gr/m2 (+/-2 gr)		
<b>Formato</b>	75cmsx2Mts		
	Ref.Reflex	Ref.Safe	Ref.Dark
<b>Bloqueo rayos ultravioletas</b>	99%	92%	94%
<b>Reflexión metálica</b>	45%	8%	9%
<b>Rechazo rayos infrarojos</b>	81%	35%	40%
<b>Visibilidad (Visible Light Transmittance)</b>	21%	69%	14%
<b>Shading coefficient</b>	0.29	0.66	0.61
<b>Total energía solar rechazada</b>	76%	31%	48%

Figura 4-6 Propriedades da película refletiva Linha Hogar- Safe Auto-Adhesive UV Protection [46].

### 4.3. Procedimento experimental

A campanha experimental de monitorização realizou-se *in-situ* nos três gabinetes (A, B e C). Conforme referido anteriormente, o gabinete A foi utilizado como caso de referência no presente estudo, enquanto que o gabinete B apresenta uma película inteligente do tipo PDLC aplicada pelo interior e o gabinete C uma película de controlo solar também esta aplicada pelo interior. Refira-se que para aferir a influência do modo opaco (modo *off*) ou transparente (modo *on*) nas condições de iluminância interior foi conduzida uma campanha experimental nos três gabinetes, tendo-se analisado o gabinete B com a película inteligente em ambos os modos de funcionamento (*on* e *off*), como se apresentará no capítulo seguinte.

Com vista à determinação do desempenho térmico e lumínico dos envidraçados nos diferentes casos, foram monitorizadas em simultâneo e continuamente nos três gabinetes as seguintes grandezas:

- temperatura do ambiente interior e exterior;
- temperatura superficial interior e exterior do envidraçado;
- fluxo de calor no envidraçado;
- irradiância interior normal à fachada e exterior em plano vertical normal à fachada (medida na cobertura e na fachada exterior dos gabinetes) e em plano horizontal (medida na cobertura);
- iluminância interior em plano vertical e exterior em plano vertical normal à fachada (medida na fachada exterior dos gabinetes);

Além destas grandezas foram ainda colocados termopares na face interior e exterior da parede dos três gabinetes e nas persianas interiores, mas como os termopares colocados na face exterior e nas persianas descolavam-se constantemente, estes valores não foram corretamente registados, tendo-se optado por não os utilizar na presente análise.

Durante a preparação da campanha experimental houve alguns cuidados a ter em conta, mais propriamente a colocação dos termopares e dos fluxímetros na metade inferior do envidraçado para não ficarem afetados pelo sistema de sombreamento, a colocação dos aparelhos de medição na mesma posição em todos os gabinetes do caso de estudo e ainda a criação das mesmas condições relativamente à posição das persianas interiores e do sistema de sombreamento.

Na Figura 4-7 é possível observar-se um esquema da posição dos aparelhos de medição (à exceção dos termopares e fluxímetro). No que diz respeito ao piranómetro e luxímetro verticais exteriores, estes foram colocados na parte exterior da fachada do gabinete B conforme mostra a Figura 4-8, assumindo que os valores registados por estes seriam iguais para os três gabinetes.

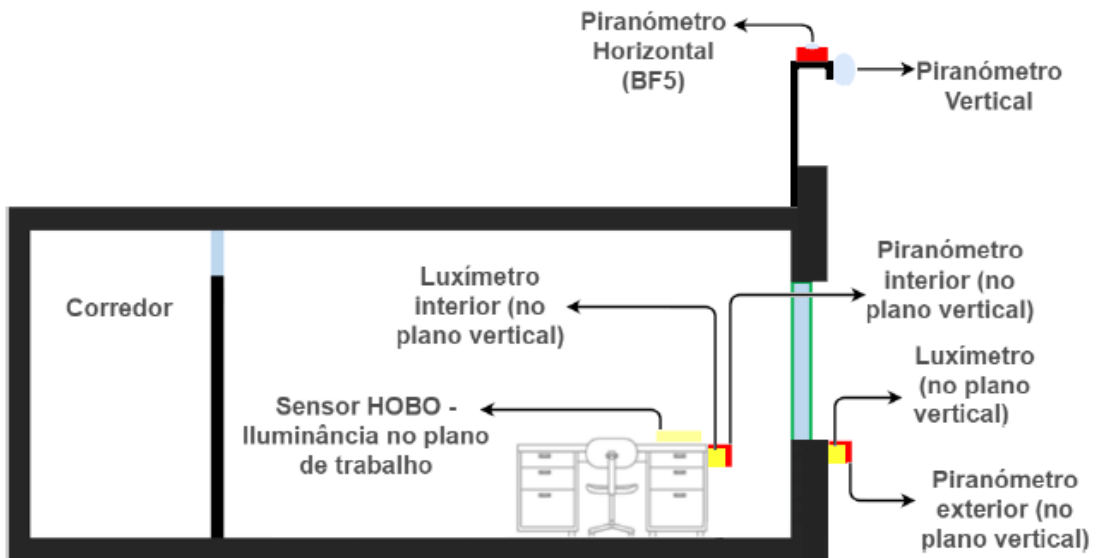


Figura 4-7 Esquema da posição dos piranómetros, luxímetros e sensor HOBO (adaptado) de [10].

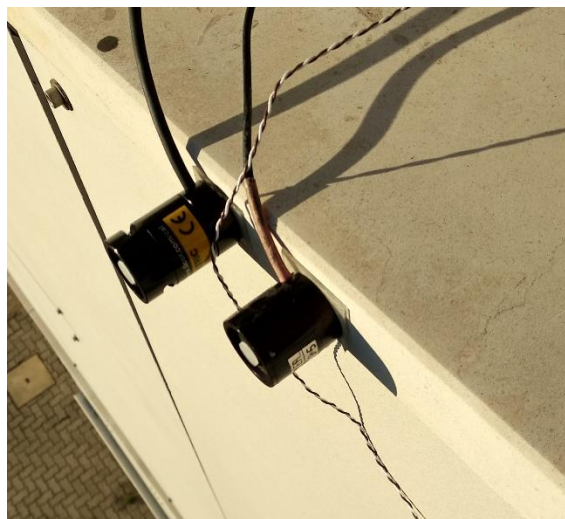


Figura 4-8 Piranómetro e luxímetro exteriores em plano vertical.

Para cada gabinete utilizaram-se 9 termopares tipo T com 0.2 mm de espessura (Figura 4-9) com as seguintes finalidades:

- 2 termopares para medição da temperatura ambiente (exterior e interior);
- 4 termopares para medição da temperatura superficial do envidraçado (2 exteriores e 2 interiores);
- 2 termopares para medição da temperatura superficial da fachada (interior e exterior);
- 1 termopar para medição da temperatura superficial da persiana interior.





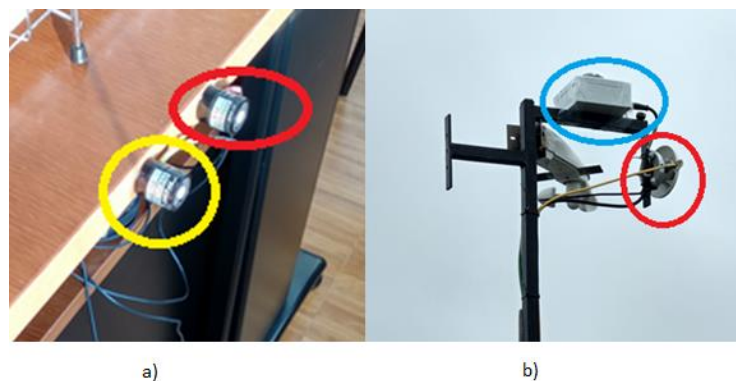
*Figura 4-9 Termopares (para medição da temperatura superficial interior à esquerda e da temperatura ambiente exterior à esquerda).*

Com vista a medir o fluxo de calor no envidraçado, colocou-se um fluxímetro Hukseflux na superfície interior do envidraçado de cada gabinete, conforme se observa na Figura 4-10. De referir que foi admitido como positivo o sentido do fluxo de calor do interior para o exterior.



*Figura 4-10 Fluxímetro colocado no envidraçado, vista interior.*

Para a medição da radiação solar interior, utilizaram-se piranómetros LI-COR LI200 (Figura 4-11a) nos gabinetes A e B e Kipp&Zonen CMP6 (semelhante ao da Figura 4-11 b) no gabinete C e para a medição da iluminância interior foram utilizados luxímetros LI-COR 210R (Figura 4-11 a) em todos os gabinetes.



*Figura 4-11 a) Piranómetro LI-COR LI200 a vermelho e luxímetro LI-COR 210R a amarelo; b) Piranómetro horizontal BF5 a azul e piranómetro vertical kipp&Zonen CMP6 a vermelho.*

Desta forma, foi então medida a radiação solar em plano vertical no interior dos gabinetes, com a preocupação de colocar os sensores aproximadamente na mesma posição para os três gabinetes. A radiação solar vertical exterior foi também medida através de um piranómetro LI-COR LI200 colocado na fachada exterior do gabinete B, assumindo uma radiação vertical idêntica em toda a fachada. A iluminância vertical interior foi igualmente medida nos três gabinetes e com os mesmos cuidados na colocação dos sensores. A iluminância vertical exterior foi também medida através da colocação de um luxímetro LI-COR 210R na fachada exterior do gabinete B, assumindo-se um nível de iluminância exterior semelhante para os três gabinetes. Na cobertura foi também registada a radiação solar global em plano vertical com um piranómetro Kipp&Zonen CMP6 (Figura 4-11 b, colocado na vertical) e a radiação global e difusa através da utilização de um piranómetro BF5 (Figura 4-11 b, colocado na horizontal). Na Tabela 4-3 são apresentados os detalhes dos equipamentos de medição utilizados durante a campanha experimental.

Tabela 4-3 Detalhes dos equipamentos de medição utilizados.

<b>Equipamento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Variável medida</b>	<b>Precisão</b>	<b>Localização</b>
<b>Termopares</b>	Tipo-T	Temperatura	$\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$	Interior e exterior dos gabinetes e superfícies interiores e exteriores dos vidros
<b>Fluxímetros</b>	Hukseflux HFP01	Fluxo de calor	$\pm 5\%$	Superfície interior dos vidros
<b>Piranómetros</b>	LI-200R	Radiação global	$\pm 3\%$	Gabinetes e fachada exterior
	Kipp&Zonen	Radiação global	5 a $20 \mu\text{VW}/\text{m}^2$	Gabinete C e cobertura
	BF5	Radiação global	$\pm 5 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 12\%$	Cobertura
Radiação difusa		$\pm 20 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 15\%$		
<b>Luxímetros</b>	LI-210R	Iluminância	$\pm 5\%$	Cobertura e gabinetes

## 5. Análise e discussão de resultados

A presente campanha experimental desenvolveu-se em duas fases distintas: uma primeira em que os gabinetes foram monitorizados durante a estação de Inverno e uma segunda em que os gabinetes foram monitorizados durante a estação de Verão. De referir que tanto na campanha de Verão como na campanha de Inverno manteve-se a película do tipo PDLC no modo opaco (modo *off*), sendo possível encontrar resultados para o modo de maior transmitância (modo *on*) no estudo realizado por Figueiredo [46]. No decorrer deste capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos nas diferentes fases da campanha experimental.

### 5.1. Campanha de Inverno

A campanha que decorreu durante a estação de Inverno teve início a 28 de fevereiro e terminou a 11 de abril. Idealmente esta fase da campanha deveria decorrer no período mais rigoroso, ou seja, entre dezembro e janeiro. Contudo, isso não foi possível uma vez que apenas em fevereiro se iniciou a presente dissertação de mestrado. Assim, os valores registados são referentes ao período final da estação fria e início de meia-estação de primavera. Tendo em conta o extenso volume de medições que se realizaram durante esta campanha experimental, optou-se por analisar apenas dois dias considerados representativos de toda a campanha experimental de inverno:

- dia em que se verificou uma menor temperatura média exterior – Dia Mais Frio (DMF);
- dia em que se verificou a menor radiação solar média (média calculada com base apenas no período de insolação) – Dia de menor Radiação (DmR).

As médias da temperatura do ar exterior ( $T_e$ ), da radiação global vertical exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{V,gab}$ ) e na cobertura ( $Rad_{V,cob}$ ) e da radiação global horizontal exterior ( $Rad_H$ ) nos dias representativos mencionados, são apresentados na Tabela 5-1. Importa referir que para o DmR, apesar de este se destacar como o dia com céu mais encoberto, a temperatura média apresenta um valor relativamente alto quando comparado com o valor obtido no DMF. Por outro lado, para o DMF apesar de se verificar uma temperatura média mais baixa, observam-se valores de radiação relativamente altos, o que revela tratar-se de um dia de céu limpo.

*Tabela 5-1 Valores médios da temperatura exterior ( $T_e$ ), de radiação global vertical ao nível dos gabinetes ( $Rad_{V,gab}$ ) e na cobertura ( $Rad_{V,cob}$ ) e de radiação global horizontal na cobertura ( $Rad_H$ ), no DMF (Dia Mais Frio) e no DmR (Dia de menor Radiação).*

	$T_e$ [°C]	$Rad_{V,gab}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Rad_{V,cob}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Rad_H$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>DMF: 5 de março</b>	12.1	315.3	402	307.3
<b>DmR: 9 de março</b>	14.5	24.1	32.9	58.6

### 5.1.1. Temperatura

Nesta fase serão expostos os valores médios, máximos e mínimos de temperatura exterior ( $T_e$ ) e de radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ) medida na fachada ao nível dos gabinetes no DMF e no DmR, tal como se pode observar na Tabela 5-2 e na Tabela 5-3.

*Tabela 5-2 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DMF (Dia Mais Frio).*

	$T_e$ [°C]	$T_{se}$ [°C]			$T_{si}$ [°C]			$T_i$ [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m <sup>2</sup> ]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
<b>Gabinetes</b>											
<b>Média</b>	12.1	13.9	14.2	13.6	16	16.8	16.2	16.8	16.4	16.7	315.3
<b>Máximo</b>	15.5	23.3	25.8	24.4	25.7	32.4	26	19.3	18.3	22.3	880.8
<b>Mínimo</b>	8.9	9.4	9.3	9.1	12.3	12.2	13.1	15.6	15.4	15.5	0

*Tabela 5-3 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DmR (Dia de menor Radiação).*

	$T_e$ [°C]	$T_{se}$ [°C]			$T_{si}$ [°C]			$T_i$ [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m <sup>2</sup> ]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
<b>Gabinetes</b>											
<b>Média</b>	14.1	14.7	14.6	14.3	15.5	15.4	15.4	16.5	16.5	16.1	315.3
<b>Máximo</b>	15.1	15.1	15.1	14.8	16	16.2	15.9	16.6	16.6	16.3	880.8
<b>Mínimo</b>	13.9	14.1	14	13.8	15	14.8	15.1	16.4	16.4	16	0

De modo a facilitar a interpretação e o tratamento dos dados, apresentam-se os registos da temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ) e da radiação exterior incidente em plano vertical ao nível dos gabinetes ( $Rad_{v,e}$ ) conjugados com: i) a temperatura superficial exterior do envidraçado ( $T_{se}$ ), a

temperatura superficial interior do envidraçado ( $T_{si}$ ) e a temperatura ambiente interior ( $T_i$ ) para o DMF (Figura 5-1 a); ii) a temperatura superficial exterior do envidraçado ( $T_{se}$ ), a temperatura superficial interior do envidraçado ( $T_{si}$ ) e a temperatura ambiente interior ( $T_i$ ) para o DmR (Figura 5-1 b).

Através da análise dos gráficos referentes ao DMF (Figura 5-1 a) verifica-se uma influência constante da radiação solar no aumento das temperaturas superficiais e ambiente interior, o que é justificado pelo facto do DMF se tratar de um dia de céu limpo com um nível de radiação solar incidente elevado.

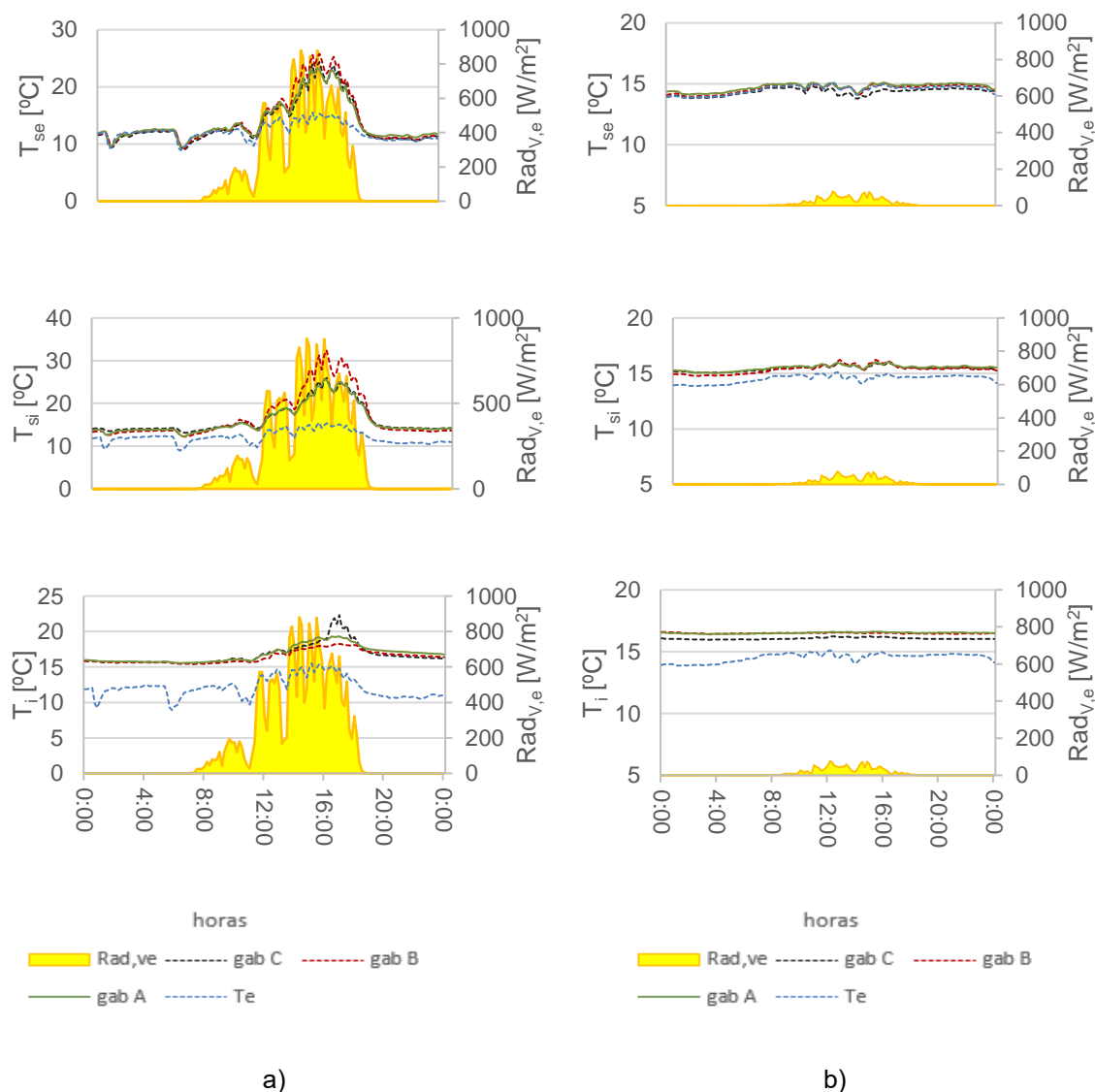


Figura 5-1 Temperaturas superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ), exterior ( $T_e$ ), interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ) no DMF (a) e no DmR (b).

Quando analisados os gráficos referentes à temperatura superficial exterior ( $T_{se}$ ) (Figura 5-1) verifica-se que esta apresenta, de uma forma geral, valores ligeiramente mais elevados para o gabinete B (gabinete com película PDLC) e valores muito próximos para o gabinete A (gabinete de referência/sem película) e C (gabinete com película refletiva), o que sugere uma absorção da superfície exterior superior para o sistema envidraçado do gabinete B e como tal uma menor

capacidade refletora. Quanto ao gabinete C, as insignificantes diferenças de temperatura superficial exterior comparativamente ao gabinete A sugerem uma ação irrelevante da película de controlo solar existente. Importa referir que estas observações foram maioritariamente estribadas na análise do gráfico referente ao DMF (Figura 5-1 a), uma vez que para o DmR (Figura 5-1 b) as diferenças de temperatura observadas são diminutas pelo facto destas temperaturas serem bastante dependentes da radiação solar incidente, podendo apenas referir-se a observação de temperaturas ligeiramente mais baixas para o gabinete A e que poderia ser justificado pela capacidade refletora das películas aplicadas pelo interior, refletindo radiação para o exterior, e consequentemente também para o pano de vidro exterior resultando num aumento de  $T_{se}$ .

Analisando os gráficos referentes à temperatura superficial interior ( $T_{si}$ ) no DMF e no DmR (Figura 5-1 a) e b) respetivamente) verifica-se que a temperatura superficial interior é, geralmente, superior para os gabinetes B e C, o que é justificado pela presença das películas aplicadas. Os valores mais elevados de temperatura superficial interior verificados para o gabinete B sugerem uma maior absorção para esta película (película inteligente do tipo PDLC).

Quanto à temperatura ambiente interior dos gabinetes ( $T_i$ ), é possível observar, no gráfico referente ao DmR (Figura 5-1 b) valores muito semelhantes para os gabinetes A e B e valores ligeiramente inferiores para o gabinete C, o que sugere um melhor desempenho para esta película relativamente ao controlo térmico na estação quente, mas um pior desempenho na estação fria uma vez que nesta estação se pretende diminuir as necessidades de aquecimento. No entanto, para o DMF (Figura 5-1 a), verifica-se valores de temperatura interior ligeiramente mais baixos para o gabinete B. Importa ainda fazer referência ao pico de temperatura que ocorre para o gabinete C em torno das 17h, para o qual não se encontrou justificação fundamentada para além da possível relação com a incorreta aplicação da mesma ou uma breve utilização do gabinete com acionamento do sistema de climatização. Contudo este pico verificou-se por várias vezes e dado que estas causas são apenas suposições pelo facto de não existir uma relação com um aumento de radiação incidente, seria proveitoso a realização de estudos futuros no sentido de averiguar qual a origem deste pico.

Interessa nesta fase realçar que, tal como Chaiyapinunt et al.[37] refere, também as diferenças mais acentuadas entre as temperaturas dos gabinetes para o DMF em relação às diferenças entre temperaturas dos gabinetes para o DmR comprovam que a eficiência das películas é maior para os dias com maior nível de radiação solar.

Embora se observem algumas diferenças nas temperaturas registadas para os diferentes gabinetes, não existem registos de diferenças muito acentuadas, pelo que quaisquer conclusões comparativas entre as duas películas nesta fase seriam precipitadas e sujeitas ao erro.

### **5.1.2. Fluxo de calor**

De seguida apresentam-se os registos dos valores de fluxo de calor obtidos nos três gabinetes conjugados com os valores de radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ) para o DMF (Figura 5-2 a) e para o DmR (Figura 5-2 b). A forma como foi feita a instalação do fluxímetro permitiu a obtenção dos

valores do fluxo de calor entre a superfície interior do vidro e o ar ambiente interior do gabinete, considerando-se como positivo o sentido do interior para o exterior.

Aquando da análise dos gráficos (Figura 5-2), é possível identificar um maior fluxo de calor associado ao gabinete B e o menor fluxo associado ao gabinete C, para o DMF. Para o DmR os fluxos de calor têm uma variação insignificante, mantendo-se muito próximos do zero e semelhantes para os três gabinetes, o que denota, mais uma vez, a grande dependência das trocas de calor com a radiação solar. Importa realçar que o andamento dos fluxos de calor tanto para o DMF como para o DmR é justificado pela variação da relação entre a temperatura superficial interior e a temperatura interior para cada gabinete, ou seja, diferenças acentuadas entre a temperatura superficial interior e a temperatura interior estão associadas a um maior fluxo e para temperaturas superficial interior e interior semelhantes tem-se associado um menor fluxo.

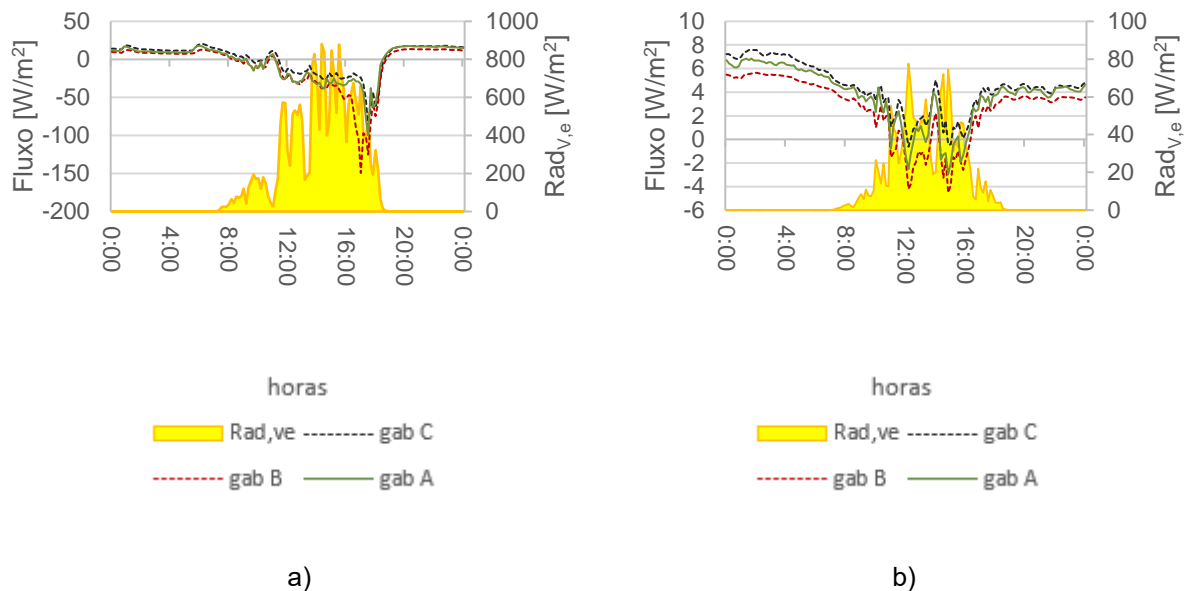


Figura 5-2 Fluxos de calor no DMF (a) e no DmR (b).

### 5.1.3. Irradiância

Neste subcapítulo apresentam-se os valores da irradiância vertical exterior ao nível dos gabinetes na fachada exterior ( $Rad_{v,e}$ ) conjugados com os valores da irradiância vertical interior de cada um dos gabinetes analisados ( $Rad_{v,i}$ ), tanto para o DMF (Figura 5-3 a) como para o DmR (Figura 5-3 b).

Da análise do gráfico da Figura 5-3 a) é possível identificar uma diferença acentuada entre os valores registados para o gabinete B (com película inteligente do tipo PDLC) e os restantes gabinetes entre as 16h e as 18h, sendo os valores registados para o gabinete B consideravelmente mais baixos para o mesmo intervalo de tempo em que se verifica um pico de radiação para os restantes gabinetes, para o DMF. Para o DmR (Figura 5-3 b) os valores de radiação que chegam ao interior dos gabinetes variam de forma pouco relevante, contudo é possível verificar também valores ligeiramente inferiores

para o gabinete B, o que sugere um menor valor de transmitância solar para o sistema envidraçado com película inteligente do tipo PDLC em modo off deste gabinete.

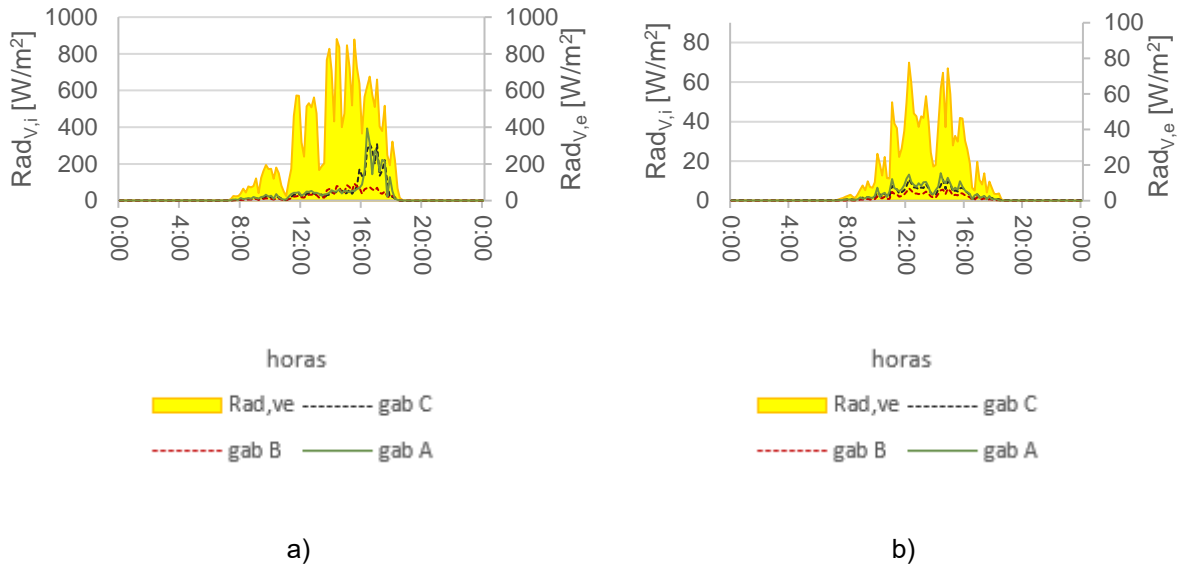


Figura 5-3 Radiação global vertical exterior ( $Rad_{ve}$ ) e radiação global vertical interior ( $Rad_{vi}$ ) no DMF (a) e no DmR (b).

Seguidamente é apresentado o registo dos valores da radiação global vertical exterior na fachada ao nível dos gabinetes e dos valores da radiação global vertical na cobertura, tanto para o DMF (Figura 5-4 a) como para o DmR (Figura 5-4 b). Embora os valores registados difiram um pouco, verificando-se valores menores para as medições feitas na fachada exterior, o andamento do gráfico é muito semelhante para os dois casos, o que revela que não existiram sombreamentos localizados ao nível dos gabinetes.

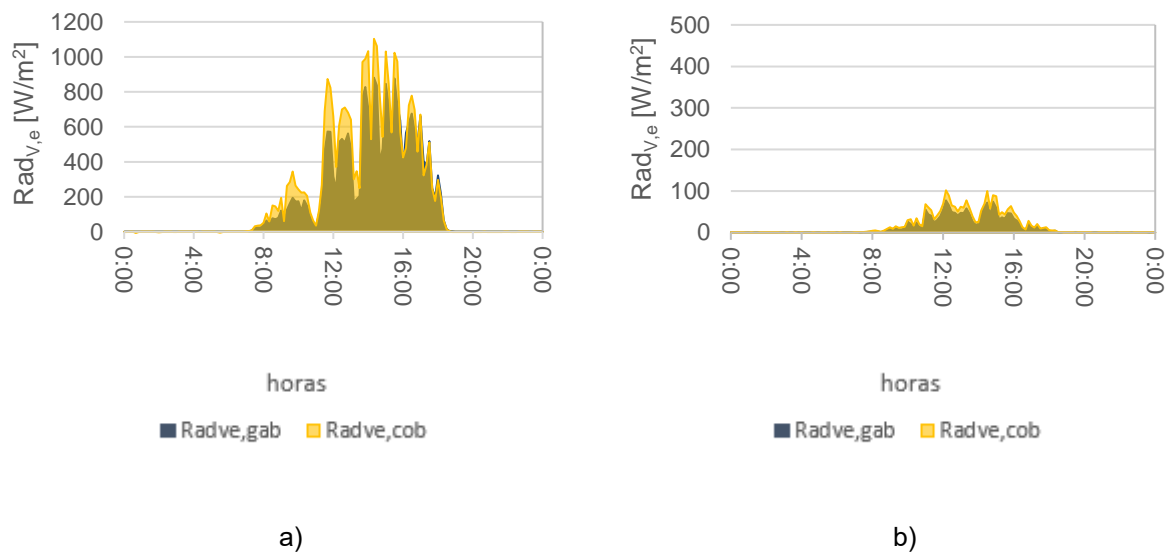


Figura 5-4 Radiação global vertical exterior medida na fachada exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{ve,gab}$ ) e radiação global vertical exterior medida na cobertura ( $Rad_{ve,cob}$ ) no DMF (a) e no DmR (b).



Nas Figura 5-5 a) e b) ilustra-se a relação entre as componentes de radiação solar global ( $Rad_G$ ) e de radiação solar difusa ( $Rad_d$ ) em plano horizontal no DMF (Figura 5-5 a) e no DmR (Figura 5-5 b). Através da análise dos mesmos é possível verificar que para o DmR apenas se verifica radiação difusa, o que sugere tratar-se de um dia de céu encoberto.

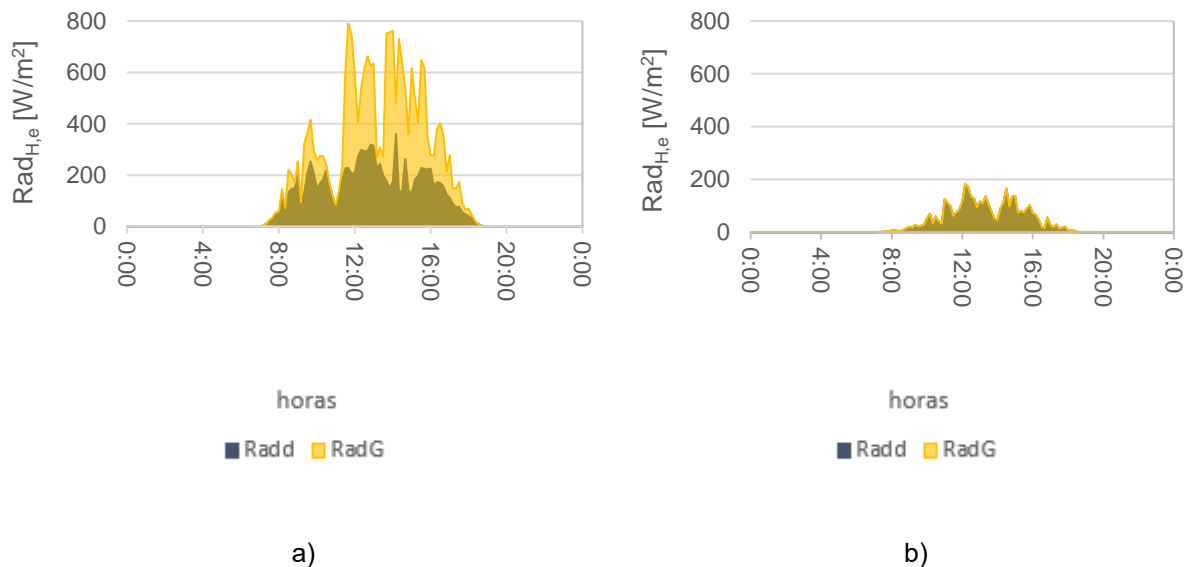


Figura 5-5 Radiação horizontal exterior global ( $Rad_G$ ) e difusa ( $Rad_d$ ) no DMF (a) e no DmR (b).

### 5.1.4. Iluminância

Neste subcapítulo apresentam-se os registos dos valores de iluminância obtidos no interior dos três gabinetes ( $E_{int}$ ) conjugados com os valores de iluminância vertical exterior ( $E_{ext}$ ) para o DMF (Figura 5-6 a) e para o DmR (Figura 5-6 b).

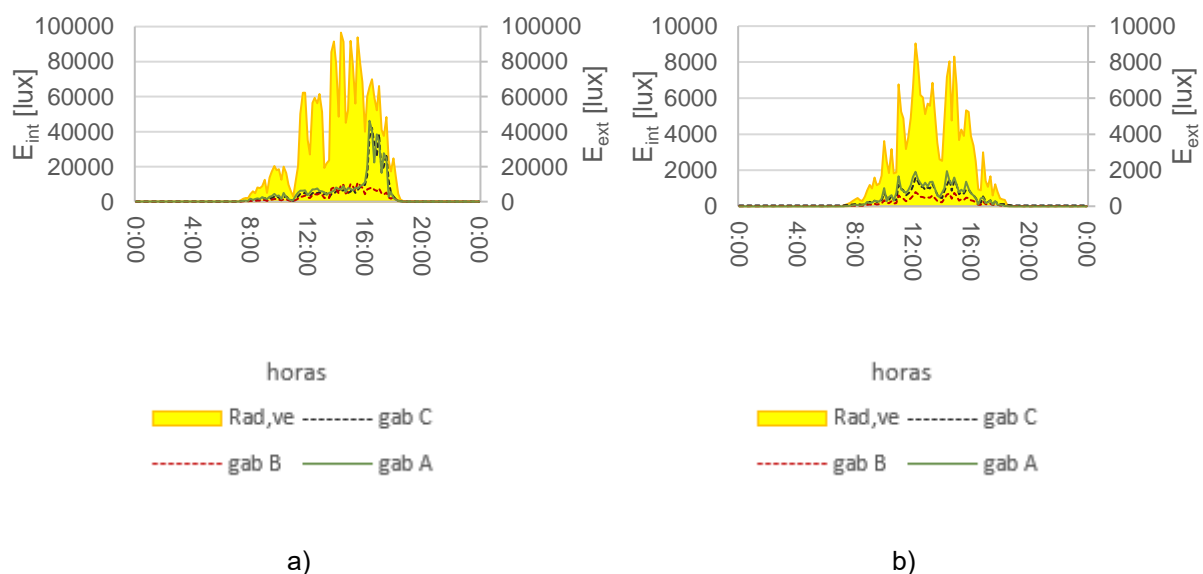


Figura 5-6 Iluminância vertical exterior ( $E_{ext}$ ) e iluminância vertical interior ( $E_{int}$ ) no DMF (a) e no DmR (b).

Relativamente à iluminância, pode concluir-se, com base nos gráficos relativos ao DMF e ao DmR (Figura 5-6 a e b), respetivamente) e tendo presente que a quantidade de radiação vertical transmitida para o interior é a principal propriedade que caracteriza as películas inteligentes do tipo PDLC, que o modo opaco não é a melhor opção de utilização na estação fria pela dificuldade de manutenção dos níveis de conforto visual desejáveis, promovendo a utilização de iluminação artificial em dias de menor radiação. Pois tal como se pode verificar pela observação dos gráficos da Figura 5-6, os valores mais baixos de iluminância registados são referentes ao gabinete B com películas inteligentes PDLC implementadas, sendo necessário uma gestão cuidada deste tipo de películas com base na norma do conforto visual (apresentada na Tabela 5-4), de modo a minimizar as necessidades de iluminação artificial.

*Tabela 5-4 Norma DIN 5035: 1990 - Níveis de iluminância de acordo com o tipo de atividade [46].*

<b>Iluminância [lux]</b>	<b>Tarefa</b>
100 – 150	Locais de trabalho sem atividade
250 – 500	Classe I: Tarefas visuais simples
500 – 1000	Classe II: Observação contínua de detalhes médios
1000 – 2000	Classe III: Tarefas visuais contínuas e precisas
>2000	Classe IV: Tarefas muito precisas

## 5.2. Campanha de Verão

A campanha que decorreu durante a estação de verão teve início a 8 de julho e terminou a 25 de agosto. Apesar de idealmente esta fase da campanha ter o seu foco no mês de julho, tal não se verificou, uma vez que as condições meteorológicas para este mês foram atípicas. Como foi no mês de agosto que surgiram as condições meteorológicas típicas da estação quente, o foco da análise de resultados deu-se neste mês. Tendo em conta o extenso volume de medições que se realizaram durante esta campanha experimental, optou-se por analisar apenas o dia em que se verificou uma maior temperatura exterior média – Dia Mais Quente (DMQ) – e o dia em que se verificou a maior radiação solar média (média calculada com base apenas no período de insolação) – Dia de Maior Radiação (DMR) – , tomados como dias representativos de toda a campanha experimental de Verão. As médias da temperatura do ar exterior ( $T_e$ ), da radiação global vertical exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{V,gab}$ ) e na cobertura ( $Rad_{V,coob}$ ) e da radiação global horizontal exterior ( $Rad_H$ ) nos dias representativos mencionados, são apresentados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 Valores médios da temperatura exterior ( $T_e$ ), de radiação global vertical ao nível dos gabinetes ( $Rad_{v,gab}$ ) e na cobertura ( $Rad_{v,cob}$ ) e de radiação global horizontal na cobertura ( $Rad_H$ ), no DMF e no DmR.

	$T_e$ [°C]	$Rad_{v,gab}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Rad_{v,cob}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Rad_H$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>DMR: 16 de agosto</b>	21.2	271	344	515
<b>DMQ: 19 de agosto</b>	29.7	262	324	444

### 5.2.1. Temperatura

Neste subcapítulo são apresentados os valores médios, máximos e mínimos de temperatura exterior ( $T_e$ ) e de radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ) medida na fachada ao nível dos gabinetes no DMQ e no DMR, tal como se pode observar na Tabela 5-6 e na Tabela 5-7.

Tabela 5-6 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DMQ.

Gabinetes	$T_e$ [°C]	$T_{se}$ [°C]			$T_{si}$ [°C]			$T_i$ [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m <sup>2</sup> ]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
<b>Média</b>	29.7	29.3	29.8	29.8	29.4	30	29.6	28.2	28.4	28.5	262
<b>Máximo</b>	40	38.1	39.6	39	36.7	36.2	36.4	30	30	30.5	571
<b>Mínimo</b>	24.1	24.3	24	24.4	25.7	26	26.2	27	27	27.3	0

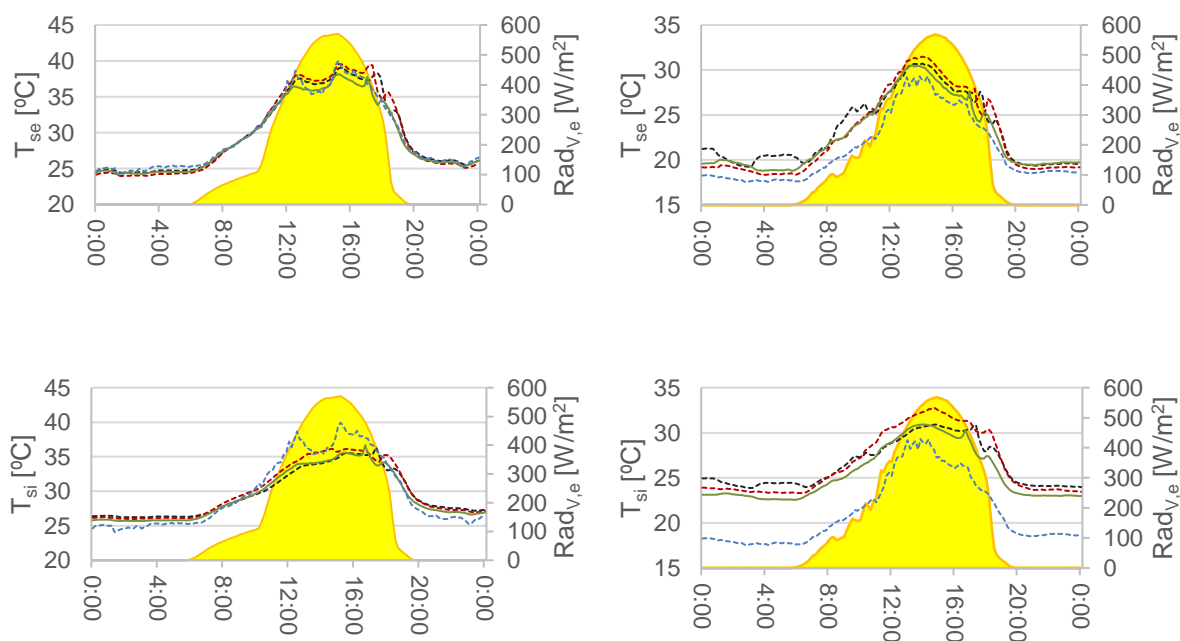
Tabela 5-7 Valores médios, máximos e mínimos de temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ), superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ) e ambiente interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ), no DMR.

Gabinetes	$T_e$ [°C]	$T_{se}$ [°C]			$T_{si}$ [°C]			$T_i$ [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m <sup>2</sup> ]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
<b>Média</b>	21.2	22.7	22.8	23.3	25.4	26.6	26.4	27	27.2	27.5	271
<b>Máximo</b>	29.3	30.5	31.5	30.7	30.9	32.8	30.9	28.4	29.1	29.4	568
<b>Mínimo</b>	17.5	18.8	18.4	19.2	22.6	23.3	23.9	26.2	26.1	26.5	0

De modo a facilitar a interpretação e o tratamento dos dados, apresentam-se os registos da temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ) e da radiação vertical exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{V,e}$ ) conjugados com: a temperatura superficial exterior ( $T_{se}$ ), com a temperatura superficial interior ( $T_{si}$ ) e com a temperatura interior ( $T_i$ ) para o DMQ, assim como os registos da temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ) e da radiação vertical exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{V,e}$ ) conjugados com: a temperatura superficial exterior ( $T_{se}$ ), com a temperatura superficial interior ( $T_{si}$ ) e com a temperatura interior ( $T_i$ ) para o DMR.

Através da análise dos gráficos da Figura 5-7 a) referentes ao DMQ verifica-se, tal como para o DMF Figura 5-1 a), a influência da radiação solar no aumento das temperaturas superficiais e ambiente interior, o que é justificado pelo facto do DMQ se tratar de um dia de céu limpo com um nível de radiação solar incidente elevado. Contudo esta influência nos aumentos de temperatura não é tão notória nas temperaturas interiores como é nas temperaturas superficiais dos envidraçados.

Quando analisados os gráficos referentes à temperatura superficial exterior ( $T_{se}$ ) (Figura 5-7 a e b) verifica-se que esta apresenta, de uma forma geral, valores muito próximos para os três gabinetes. Embora nas horas de maior radiação, os valores de temperatura superficial exterior para o gabinete B (gabinete com película do tipo PDLC em modo *off*) sejam ligeiramente superiores aos valores registados para os gabinetes A (gabinete de referência/sem película) e C (gabinete com película refletiva), esta diferença é insignificante e como tal considera-se inconclusiva. Quanto ao gabinete C, as diferenças pouco significativas de temperatura superficial exterior comparativamente ao gabinete A continuam a sugerir uma ação irrelevante da película de controlo solar nele existente.



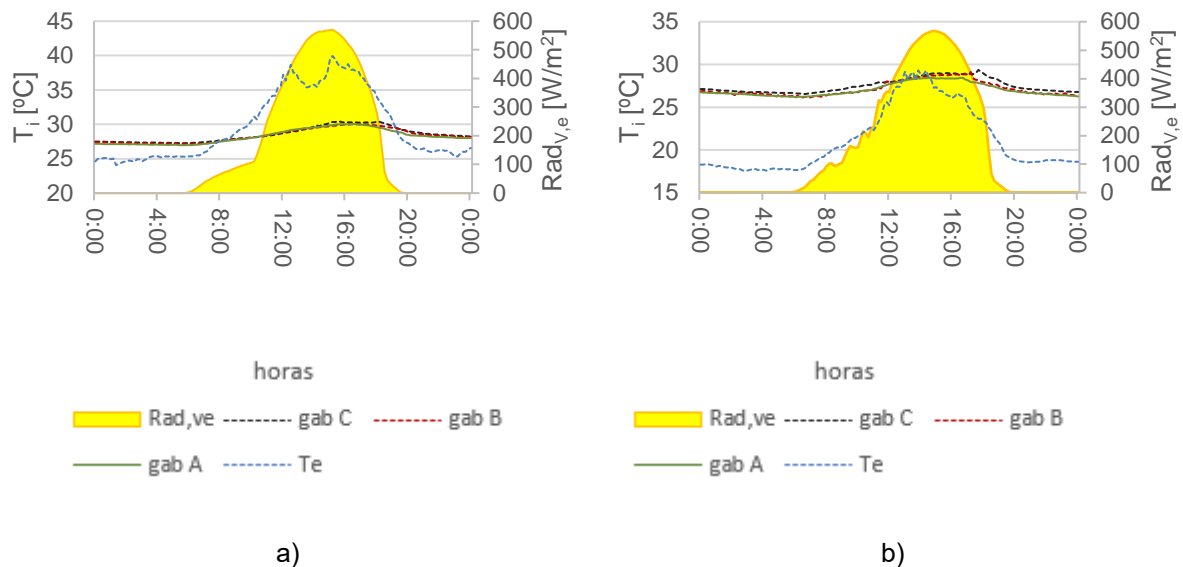


Figura 5-7 Temperaturas superficial exterior ( $T_{se}$ ), superficial interior ( $T_{si}$ ), exterior ( $T_e$ ), interior ( $T_i$ ) e radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b).

Analisando os gráficos referentes à temperatura superficial interior ( $T_{si}$ ) no DMQ e no DMR (Figura 5-7 a e b respetivamente) verifica-se que a temperatura superficial interior é de uma maneira geral superior para o gabinete B, observando-se uma maior diferença para o DMR, no qual a temperatura exterior é mais baixa. Para o DMQ esta diferença do gabinete B para os gabinetes A e C não é tão notória. Tal como na campanha de Inverno, estes valores mais elevados de temperatura superficial interior para o gabinete B sugerem uma maior absorção para esta película (película do tipo PDLC).

Quanto à temperatura ambiente interior dos gabinetes ( $T_i$ ), é possível observar, tanto no gráfico referente ao DMQ (Figura 5-7 a) como no gráfico referente ao DMR (Figura 5-7 b), valores muito semelhantes para os três gabinetes o que não era esperado acontecer. Importa ainda fazer referência ao pico de temperatura que continua a ocorrer, embora mais disfarçado, para o gabinete C em torno das 17h do DMR, tal como se verificou durante a campanha de Inverno.

Embora se observem algumas diferenças nas temperaturas registadas para os diferentes gabinetes, continuam a não existir registos de diferenças muito acentuadas. Pelo que, quaisquer conclusões comparativas entre as duas películas relativamente ao desempenho térmico das mesmas, poderão ser precipitadas e sujeitas ao erro.

## 5.2.2. Fluxos de calor

Neste subcapítulo apresentam-se os registos dos valores de fluxo de calor dos envidraçados obtidos nos três gabinetes conjugados com os valores de radiação global vertical exterior ( $Rad_{v,e}$ ) para o DMQ e para o DMR. Importa lembrar que na instalação do fluxímetro considerou-se como positivo o sentido do interior para o exterior.

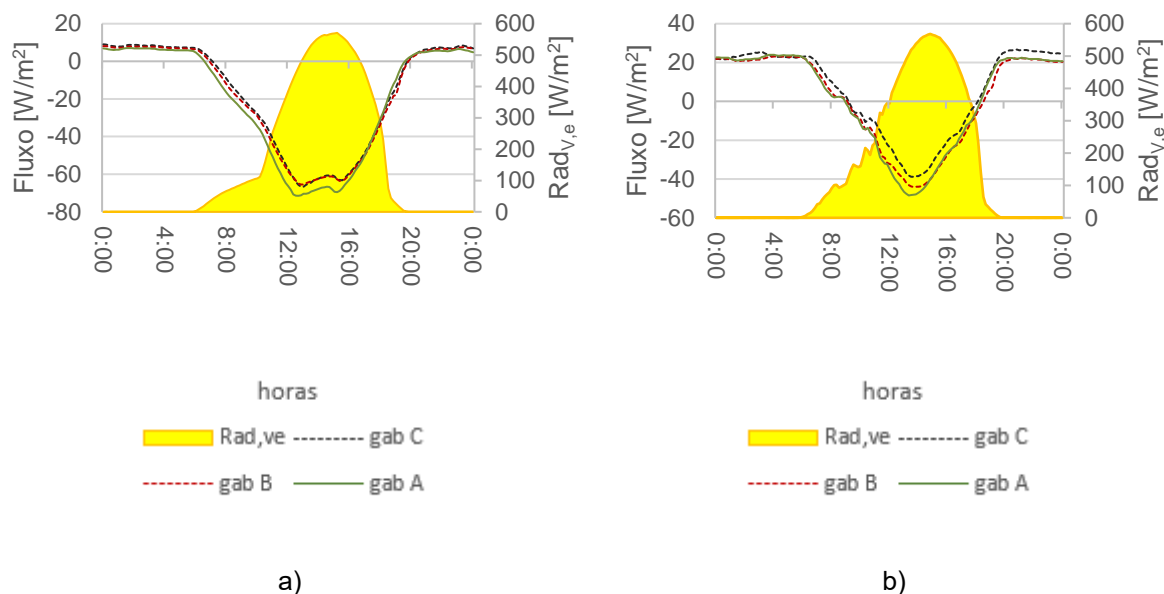


Figura 5-8 Fluxos de calor no DMQ (a) e no DMR (b).

Analisando dos gráficos da Figura 5-8, é possível identificar um maior fluxo de calor associado ao gabinete A e um fluxo muito semelhante associado aos gabinetes B e C, para o DMQ (Figura 5-8 a). Para o DMR (Figura 5-8 b) verifica-se uma diferença nos fluxos de calor dos três gabinetes, observando-se um maior fluxo associado ao gabinete A e um menor fluxo associado ao gabinete C, contudo estas diferenças não são muito acentuadas. Em qualquer dos casos, o fluxo de calor é relativamente estável durante a noite, com o sentido do interior para o exterior, o que configura uma situação de perdas de calor, e muito acentuado durante o dia, sobretudo nas horas de maior radiação solar, constituindo ganhos de calor por condução que se sobrepõem aos ganhos solares diretos, com os seus picos aproximadamente coincidentes com os picos de radiação solar.

### 5.2.3. Irradiância

Neste subcapítulo apresentam-se os valores da radiação vertical exterior ao nível dos gabinetes na fachada exterior (Rad<sub>v,e</sub>) conjugados com os valores da radiação vertical interior de cada um dos gabinetes analisados (Rad<sub>v,i</sub>), tanto para o DMQ (Figura 5-9 a) como para o DMR (Figura 5-9 b).

Analisando os gráficos da Figura 5-9 a) e b) é possível identificar uma ligeira diferença entre os valores registados para o gabinete B e os restantes gabinetes entre as 7h e as 16h, sendo os valores registados para o gabinete B ligeiramente mais baixos tanto para o DMQ (Figura 5-9 a) como para o DMR (Figura 5-9 b) o que, tal como na campanha de Inverno, sugere um menor valor de transmitância solar para o sistema envidraçado deste gabinete.

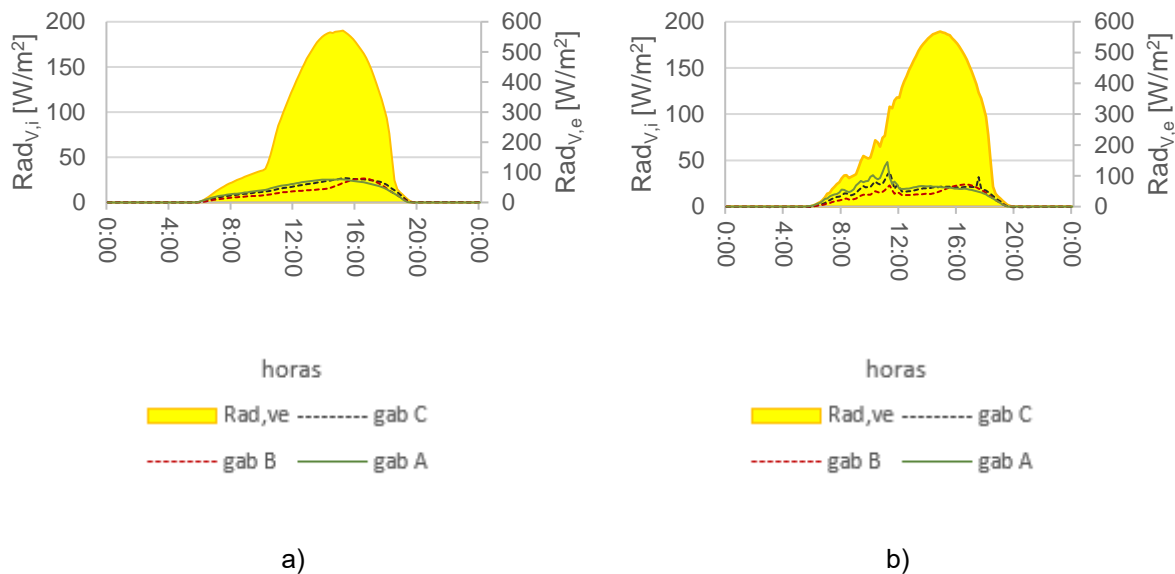


Figura 5-9 Radiação global vertical exterior ( $Rad_{V,e}$ ) e radiação global vertical interior ( $Rad_{V,i}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b).

Tal como na campanha de Inverno, também se verificou a inexistência de sombreamentos indesejados ao nível dos gabinetes, uma vez que pela Figura 5-10 a) e b) é possível observar um andamento semelhante para a radiação global vertical medida na cobertura e a medida na fachada ao nível dos gabinetes, apesar da segunda apresentar valores ligeiramente mais baixos.

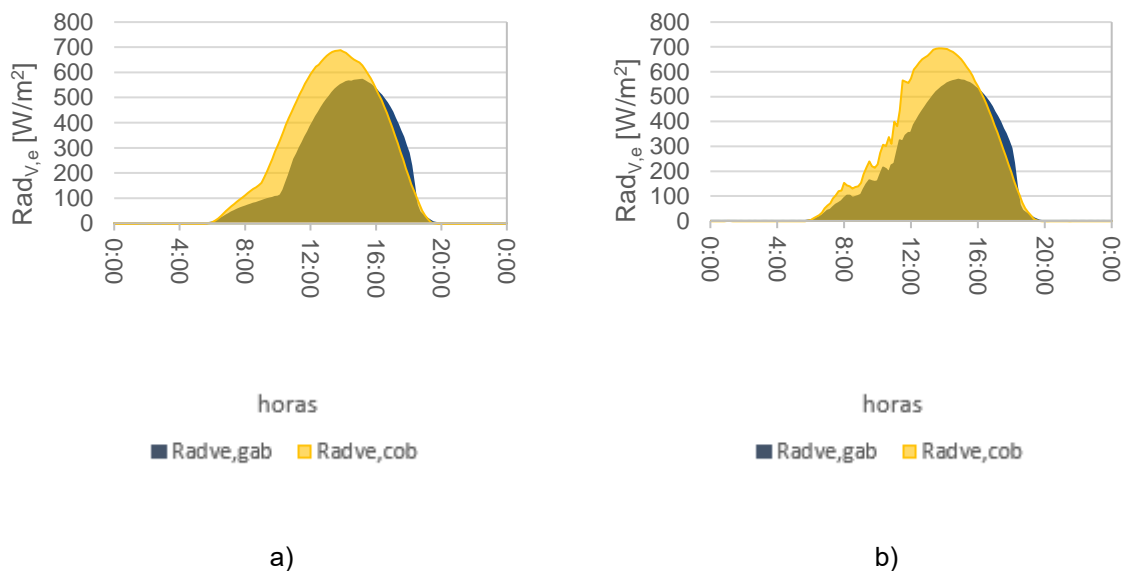


Figura 5-10 Radiação global vertical exterior medida na fachada exterior ao nível dos gabinetes ( $Rad_{V,e,gab}$ ) e radiação global vertical exterior medida na cobertura ( $Rad_{V,e,cob}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b).

Quanto aos gráficos que se seguem, eles mostram a relação entre a radiação global ( $Rad_G$ ) e a radiação difusa ( $Rad_d$ ) no plano horizontal no DMQ (Figura 5-11 a) e no DMR (Figura 5-11 b). Através da análise dos mesmos é possível verificar valores quase coincidentes para os dois tipos de radiação

no DMR (Figura 5-11 b) da parte da manhã até próximo das 12h, o que sugere uma manhã encoberta apesar de se apresentar como o dia de maior radiação.

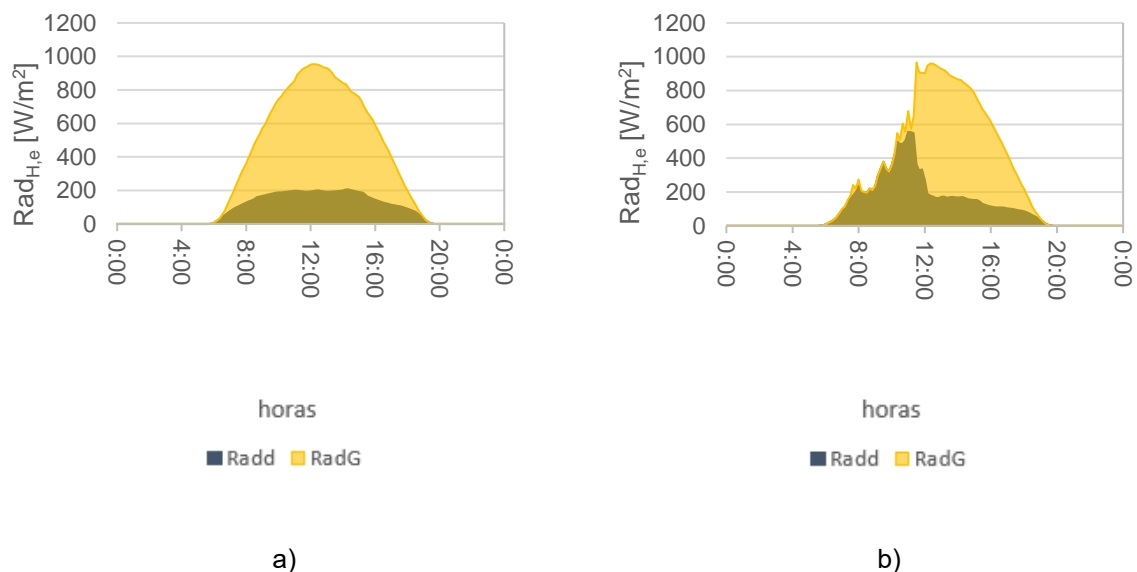


Figura 5-11 Radiação horizontal exterior global ( $Rad_e$ ) e difusa ( $Rad_d$ ) no DMQ (a) e no DMR (b).

## 5.2.4. Iluminância

Neste subcapítulo apresentam-se os registos dos valores de iluminância obtidos no interior dos três gabinetes ( $E_{int}$ ) conjugados com os valores de iluminância vertical exterior ( $E_{ext}$ ) para o DMQ (Figura 5-12 a) e para o DMR (Figura 5-12 b).

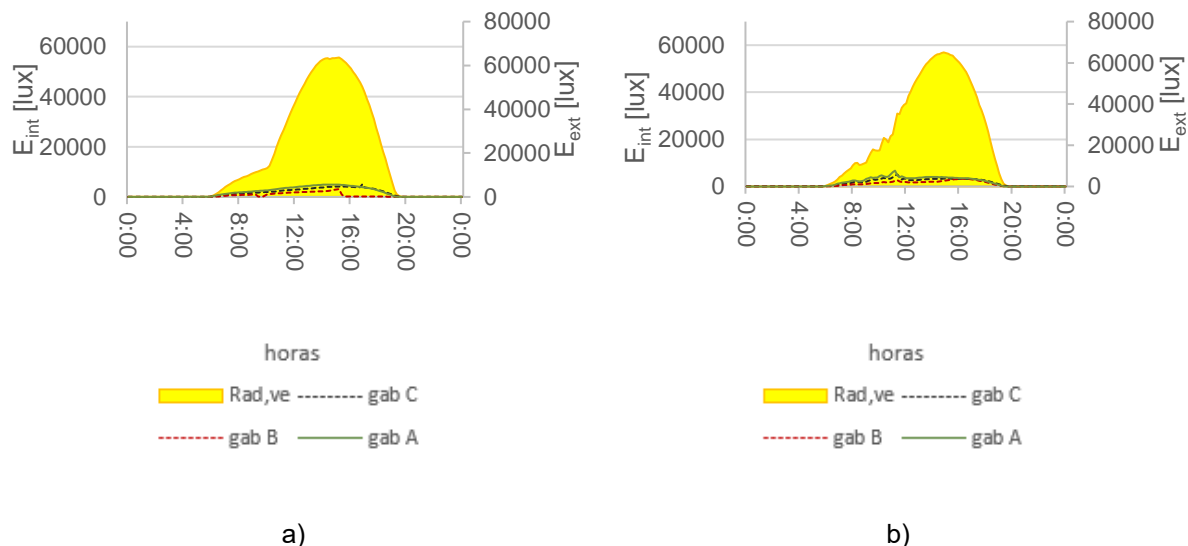


Figura 5-12 Iluminância vertical exterior ( $E_{ext}$ ) e iluminância vertical interior ( $E_{int}$ ) no DMQ (a) e no DMR (b).

Tal como se observou para a campanha de Inverno, os valores mais baixos de iluminância registados são referentes ao gabinete B com películas inteligentes PDLC instaladas, o que, quando bem geridas entre modo on e modo off, podem trazer vantagens do ponto de vista do conforto visual, mais propriamente na redução do encandeamento por excesso de luz natural. Contudo, era de esperar



para os registos de radiação solar e de iluminância desta fase da campanha experimental uma ordem de grandeza superior à verificada efetivamente. Tendo por base os valores obtidos na campanha de Inverno era de esperar valores superiores de iluminância na campanha de Verão, o que levanta algumas questões, havendo a possibilidade de os sensores interiores no Verão estarem à sombra enquanto no Inverno poderiam estar com incidência solar direta (dada a diferente posição do sol, o efeito de sombreamento das lâminas de proteção durante o verão poderá ser maior. Outras justificações para estes valores poderão existir, como o facto do ângulo de incidência solar no Verão ser maior, resultando numa transmitância maior no Inverno e menor no Verão. Contudo, para esta última possibilidade dever-se-iam registar maiores diferenças entre a iluminância registada no exterior e a registada no interior dos gabinetes, o que de uma forma geral não se verifica, observando-se também valores inferiores para a iluminância exterior.

### **5.3. Mapa e perfil de iluminâncias nos gabinetes**

De forma a compreender a distribuição da iluminação natural no interior dos gabinetes, desenvolveu-se uma campanha experimental assente no levantamento dos valores de iluminância em plano horizontal sobre uma grelha de pontos a uma cota de 0,75 m, tendo-se registado ainda os valores de iluminância em plano vertical ao longo do eixo central dos gabinetes (linha azul na Figura 5-13) a uma cota de 1,5 m. Foram definidos três horários distintos para a realização do mapeamento nos três gabinetes, nomeadamente: 9 horas, 12 horas e 15 horas. Esta campanha foi realizada num dia de céu maioritariamente limpo próximo do solstício de Inverno. De referir que, apesar de ter-se como ideal a recolha de valores dever ser em simultâneo nos três gabinetes, tal não foi possível, por limitação quer do número de sensores quer do número de experimentadores, pelo que foram conduzidas campanhas sequenciais nos três gabinetes.

Após a recolha de dados, recorreu-se ao programa *Surfer 7* para a realização do mapeamento das iluminâncias.

A Figura 5-13 apresenta a grelha de pontos utilizada para fazer a recolha dos valores de iluminância nos três gabinetes, assim como o eixo sobre o qual se registou os valores à cota de 1,5 m.

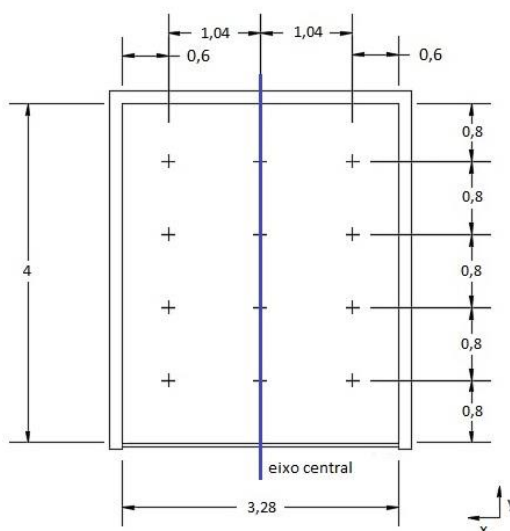


Figura 5-13 Grelha de pontos de medição adaptado de [10].

### 5.3.1. Mapeamento às 9 horas

Através da análise do gráfico da Figura 5-14 referente ao perfil das iluminâncias em plano vertical no interior dos gabinetes à cota de 1,5 m, assim como da Figura 5-15 referente aos mapas de iluminâncias no plano horizontal à cota de 0,75 m, é possível verificar que da parte da manhã a radiação solar não incide diretamente nos gabinetes, dado os baixos valores registados. Tanto o gráfico do perfil de iluminâncias em plano vertical (Figura 5-14) como os mapas de iluminâncias (Figura 5-15) sugerem uma maior transmitância visível para o gabinete B com a película PDLC em modo *on* e uma menor transmitância visível para o gabinete C (gabinete com película refletiva). Quando se observa o mapa de iluminâncias do gabinete A e do gabinete B no modo *off* verifica-se uma menor transmitância visível para o gabinete B neste modo do que para o gabinete A (gabinete de referência), o que não é perceptível se se analisar apenas o perfil de iluminâncias em plano vertical destes gabinetes.

Importa referir que os baixos valores registados no mapa de iluminâncias do gabinete B em modo *on* e *off* para  $3m < y < 4m$ , (sendo “y” a distância em metros ao envidraçado), poderão ser fruto da maior opacidade da película inteligente no modo *off*, do facto da película no modo *on* apenas estar ativa num dos lado do envidraçado, e da posição dos equipamentos como o computador pessoal e o armário junto da parede (Figura 5-15 b e c). Contudo, tendo presente a Tabela 5-4 para a classe I (tarefas visuais simples), é possível concluir-se que para as situações acima mencionadas os valores mínimos de iluminância nem sempre são satisfeitos para distâncias ao envidraçado superiores a 3m com a película inteligente (Figura 5-15 b e c), verifica-se valores de iluminância inferiores a 250 lux.

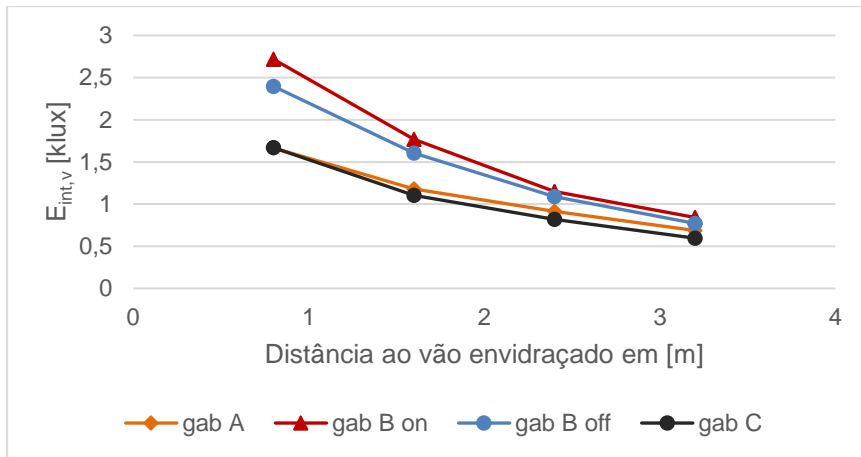


Figura 5-14 Perfil de iluminâncias em plano vertical à cota de 1,5 m no interior dos gabinetes às 9h ( $E_{Ext}=29,21$  Klux).

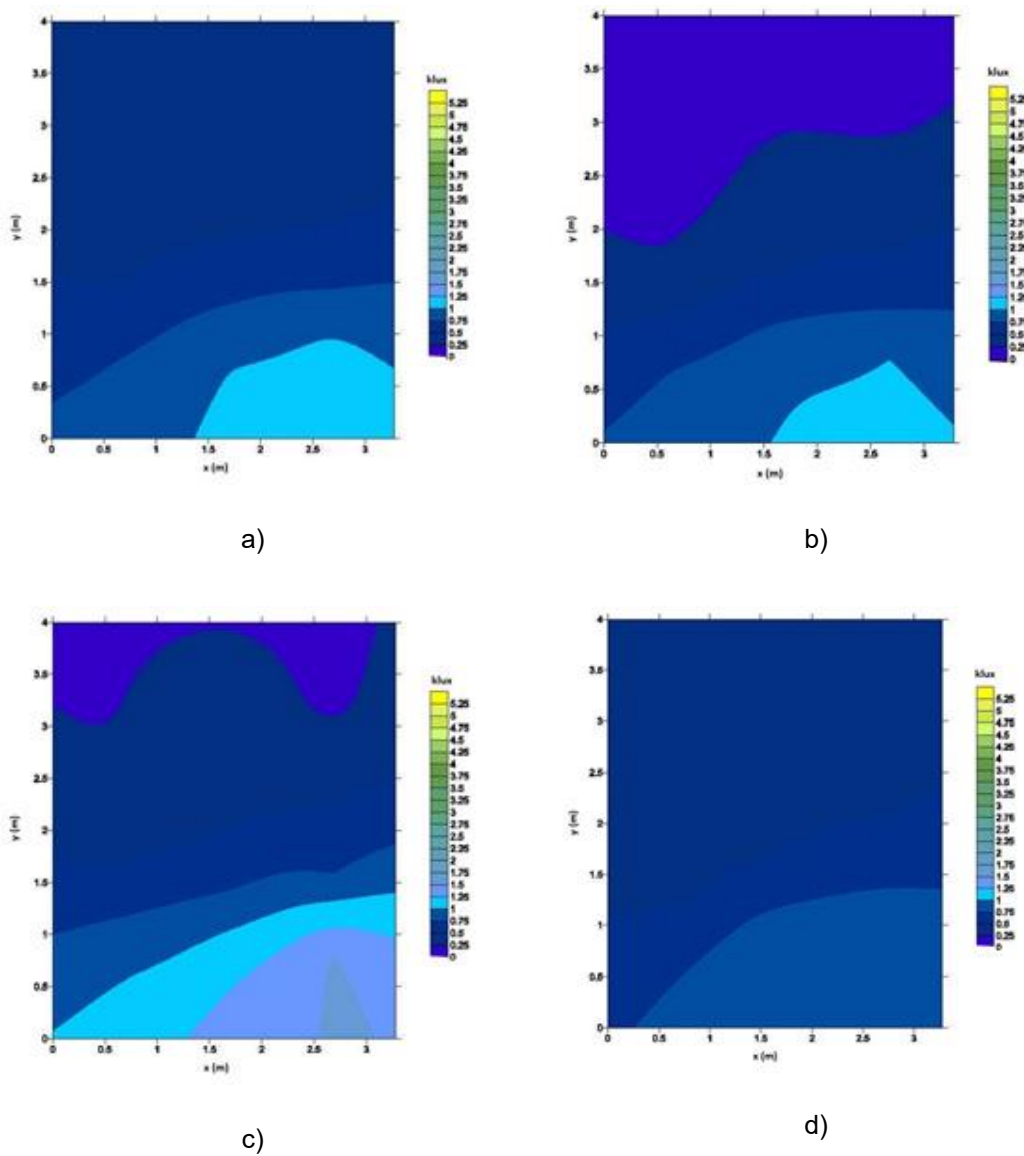


Figura 5-15 Mapas de iluminância em plano horizontal à cota de 0,75 m às 9h: a) gabinete A ( $E_{Ext}=16,83$  Klux); b) gabinete B com película em modo off ( $E_{Ext}=25,46$  Klux); c) gabinete B com película em modo on ( $E_{Ext}=25,46$  Klux); d) gabinete C ( $E_{Ext}=28,03$  Klux).

### 5.3.2. Mapeamento às 12 horas

Relativamente às medições feitas pelas 12h pode-se verificar, através da análise da Figura 5-17 referente aos mapas de iluminâncias que, embora exista um aumento dos valores de iluminância em plano horizontal no interior dos gabinetes, a radiação solar ainda não incide diretamente nos envidraçados nesta fase do dia. Nesta fase é possível verificar que o gabinete C (gabinete com película refletiva) continua a apresentar valores mais baixos de iluminância, tanto através da análise do gráfico referente ao perfil de iluminâncias em plano vertical (Figura 5-16) como através da análise dos mapas de iluminâncias em plano horizontal (Figura 5-17). Ao contrário das medições realizadas às 9 horas é possível observar nesta fase da campanha experimental uma maior diferença entre o gabinete A (gabinete de referência) e o gabinete C (gabinete com película refletiva) no gráfico referente ao perfil de iluminâncias em plano vertical a eixo dos gabinetes (Figura 5-16). Relativamente ao gabinete B em modo *on* e em modo *off*, tanto a análise do perfil longitudinal de iluminâncias (Figura 5-16) como o mapeamento das iluminâncias em plano horizontal (Figura 5-17 b e c), continuam a apontar para uma maior transmitância visível para o gabinete B em modo *on* em comparação ao modo *off*.

Tal como para as medições feitas às 9 horas, também estas medições apontam para a influência dos equipamentos no gabinete B nos valores de iluminância registados para  $3m < y < 4m$  (Figura 5-17 b e c). De referir que apesar de se verificarem os valores mínimos de iluminância em todos os mapas de iluminâncias para as 12h, para as situações acima mencionadas (gabinete B com película inteligente) os valores observados encontram-se muito próximos dos valores mínimos aceitáveis apresentados na Tabela 5-4.

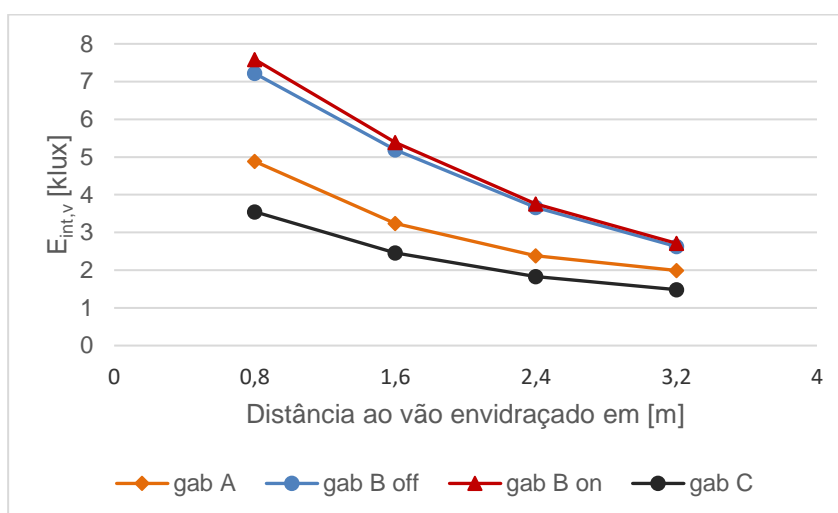


Figura 5-16 Perfil de iluminâncias em plano vertical à cota de 1,5 m no interior dos gabinetes às 12h ( $E_{Ext}=90,56$  Klux).

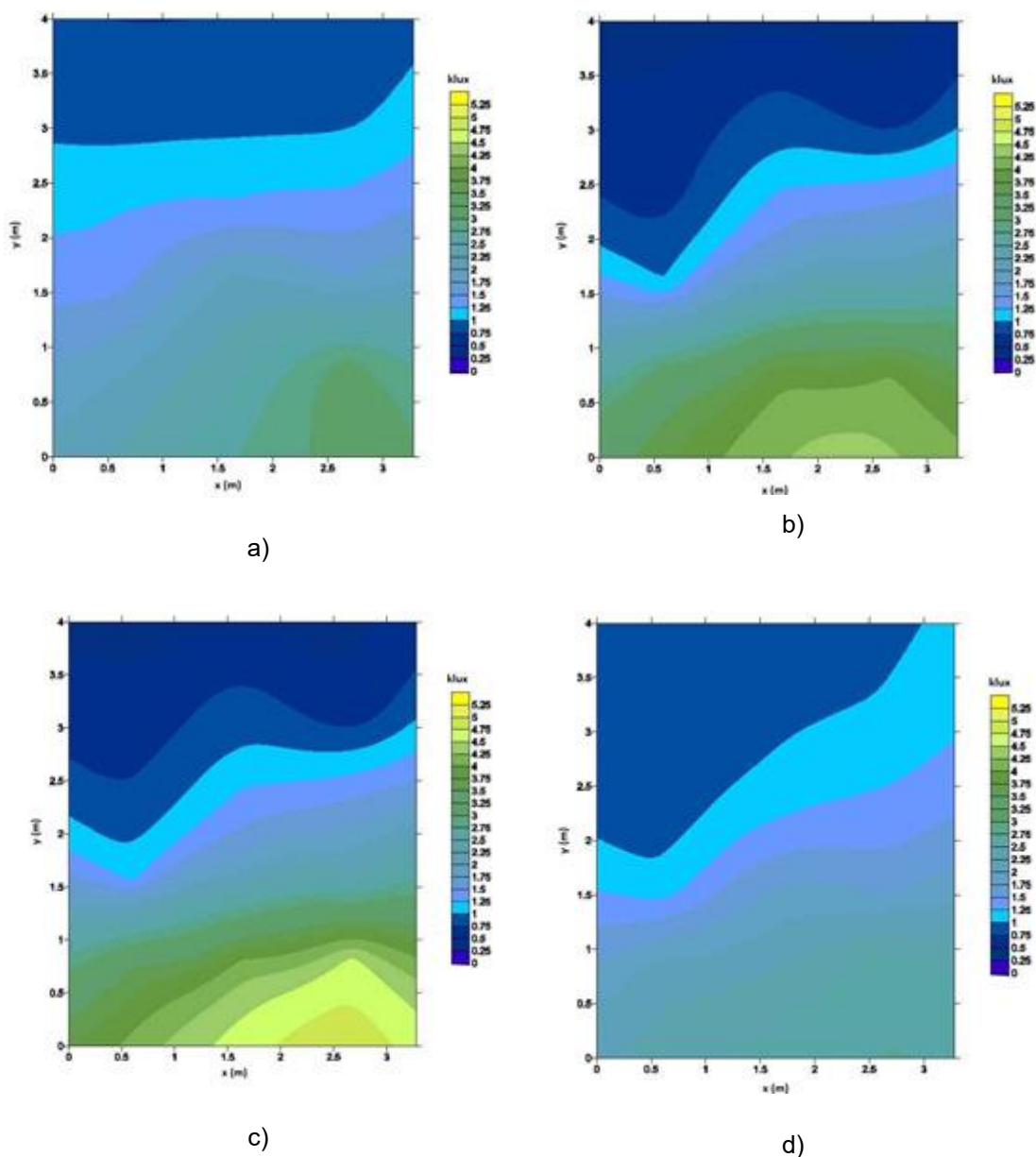


Figura 5-17 Mapas de iluminância em plano horizontal à cota de 0,75 m às 12h: a) gabinete A ( $E_{Ext}=66,01$  Klux); b) gabinete B com película em modo off ( $E_{Ext}=70,65$  Klux); c) gabinete B com película em modo on ( $E_{Ext}=70,93$  Klux); d) gabinete C ( $E_{Ext}=63,35$  Klux).

### 5.3.3. Mapeamento às 15 horas

Através da análise do gráfico da Figura 5-18 verifica-se uma maior transmitância para o gabinete B em modo *on* assim como para o gabinete A (gabinete de referência), nas posições mais próximas do vão envidraçado. Contudo, apesar do gráfico sugerir uma significativa redução de transmitância para os sistemas envidraçados do gabinete B em modo *off* e do gabinete C (gabinete com película refletiva), o mais provável é que esta diferença se deva à incidência direta da radiação solar nos sensores aquando das medições no gabinete A e no gabinete B em modo *on*, ao contrário do gabinete B em modo *off* e gabinete C. Além disto é importante referir que os valores de iluminância registados aumentaram significativamente, o que sugere que é nesta fase do dia que a radiação solar

incide diretamente nos envidraçados dos gabinetes A e B, havendo uma ligeira diferença relativamente ao gabinete C, no qual se nota alguma influência da curvatura do edifício (Figura 5-18).

Importa referir que tanto para o mapeamento realizado a esta hora como para o mapeamento das 9 e das 12 horas seriam de esperar diferenças mais acentuadas entre os valores obtidos para o gabinete B com a película em modo *on* e os valores obtidos para o gabinete B com a película em modo *off*, o que não se verificou pelo facto de um dos painéis do envidraçado se encontrar com a película avariada, funcionando apenas em modo *off*.

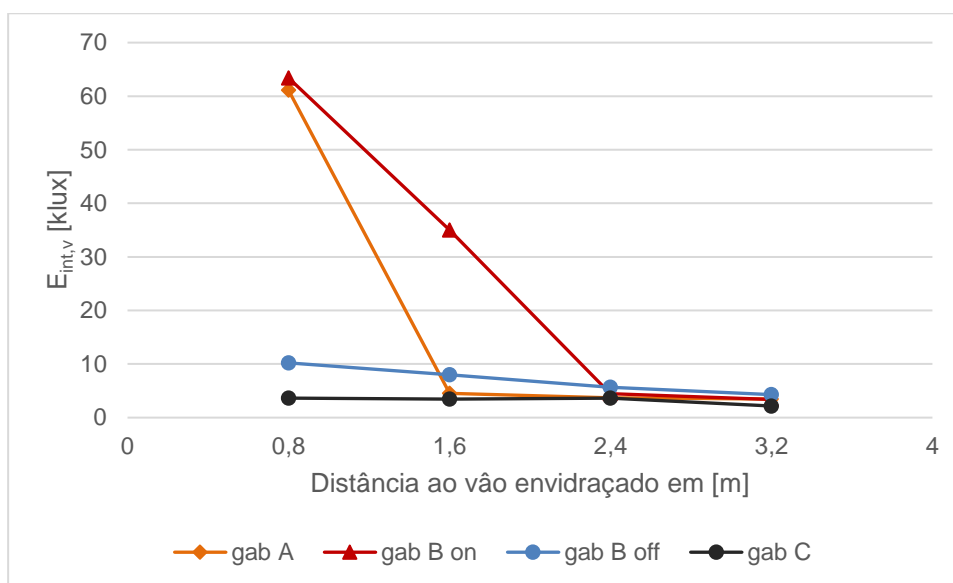


Figura 5-18 Perfil de iluminâncias em plano vertical à cota de 1,5 m no interior dos gabinetes às 15h ( $E_{Ext}=94.79$  Klux).

Relativamente aos mapas de iluminância obtidos e apresentados na Figura 5-19, a diferença em relação aos mapas obtidos para as 9 horas e para 12 horas é notória, o que reforça a conclusão da incidência direta da radiação solar nesta fase do dia. Contudo importa referir que a medição do mapa de iluminâncias em plano horizontal para o gabinete A (Figura 5-19 a) sofreu algumas irregularidades, uma vez que alguns dos pontos em que foi feita a medição da iluminância neste gabinete a radiação direta passava entre as lâminas do sistema de sombreamento de forma a influenciar o valor registado, o que não se verificou nas medições nos restantes gabinetes, onde a radiação visível medida em plano vertical à cota de 1,5 m era sobretudo difusa.

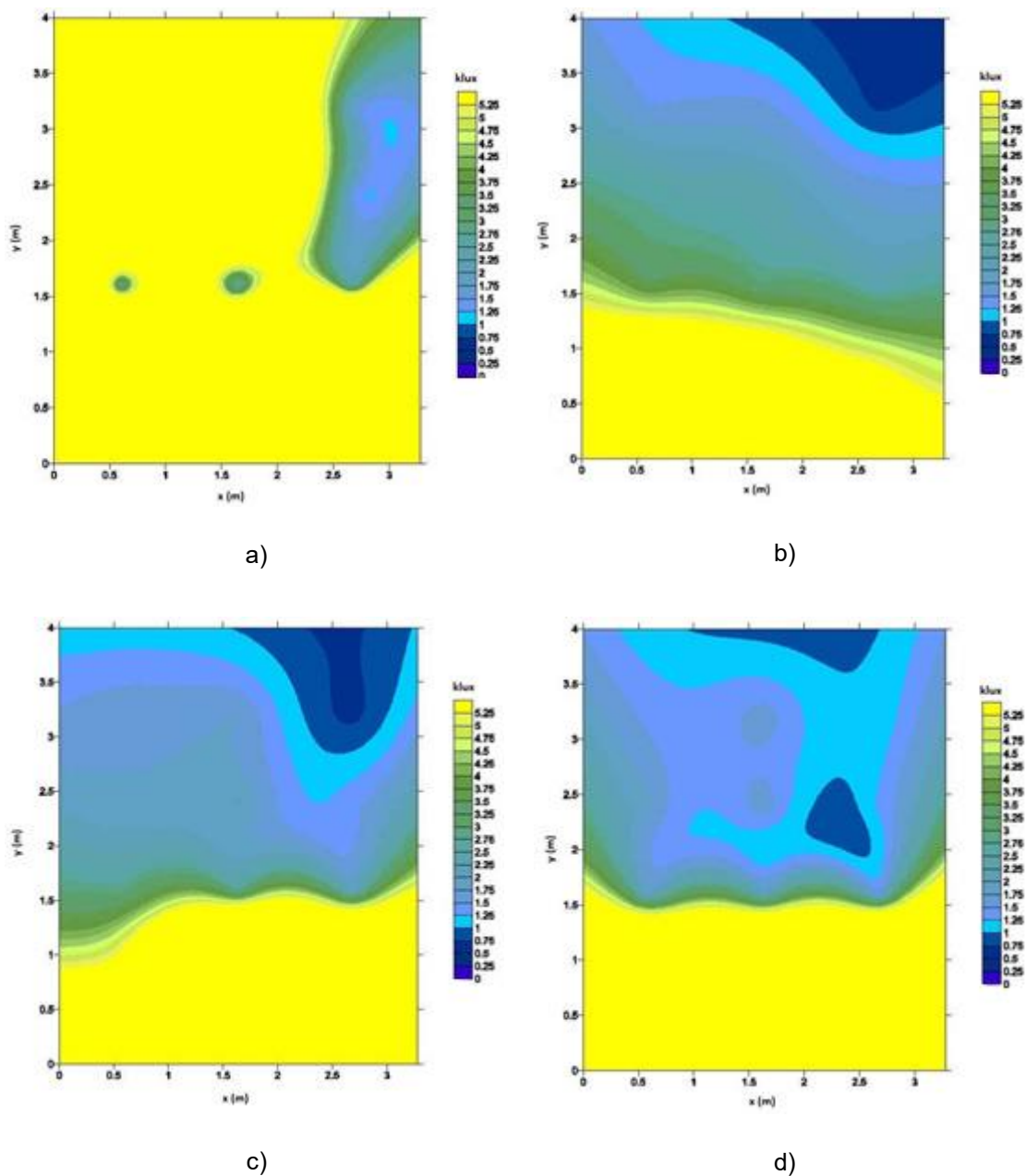


Figura 5-19 Mapas de iluminância em plano horizontal à cota de 0,75 m às 15h: a) gabinete A ( $E_{Ext}=44,95$  Klux); b) gabinete B com película em modo off ( $E_{Ext}=46,45$  Klux); c) gabinete B com película em modo on ( $E_{Ext}=43,34$  Klux); d) gabinete C ( $E_{Ext}=40,76$  Klux).





# 6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

## 6.1. Conclusões

Atualmente os consumos energéticos destinados a manter condições de conforto térmico e ótico no interior dos edifícios representa uma grande parte da energia total consumida. Neste contexto, a intervenção no edificado no sentido da reabilitação energética da envolvente dos edifícios torna-se crucial, assistindo-se a uma crescente aposta na melhoria da eficiência energética dos vãos envidraçados, que são responsáveis pela maior parte dos ganhos solares e conseqüente aumento das necessidades de climatização.

Por outro lado, apesar de se assistir a uma tendência para o aumento das áreas envidraçadas, verifica-se a um ineficiente aproveitamento de luz natural, resultando por vezes em situações de desconforto visual por encandeamento.

Um exemplo desta aposta na reabilitação energética da envolvente dos edifícios, através da melhoria da eficiência energética dos vãos envidraçados, são as películas de controlo solar e inteligentes que atuam ao nível da alteração de algumas das propriedades do envidraçado, como a transmitância solar e visível e o fator solar.

Neste sentido optou-se por estudar ao longo deste trabalho o comportamento de uma película inteligente do tipo PDLC (apresentada pelo fabricante como uma película de controlo de privacidade na sua finalidade primária) e o comportamento de uma película polimérica de controlo solar refletiva.

Apesar das películas em estudo não terem sido aplicadas na totalidade da área envidraçada, foi possível verificar diferenças no comportamento dos sistemas envidraçados nos diferentes gabinetes, tendo-se observado melhores resultados para a campanha de Inverno do que para a campanha de Verão.

No que diz respeito às temperaturas interiores, verificou-se que ambos os gabinetes com películas no sistema envidraçado permitiram de uma forma geral uma pequena diminuição das mesmas em relação ao gabinete sem película, pelo que se aconselha o desenvolvimento de estudos com a aplicação destas películas na totalidade do envidraçado no sentido de apurar o verdadeiro potencial destas películas na redução da temperatura interior.

No que diz respeito à irradiância e à iluminância, verificou-se menores valores para a película inteligente do tipo PDLC no modo opaco (alteração da transmitância), principalmente aquando do mapeamento das iluminâncias dos gabinetes, o que sugere potencialidades desta película ao nível da melhoria do conforto visual na estação quente através da utilização do modo *off*, para além das potencialidades anunciadas pelo fabricante relativas ao controlo de privacidade. Importa destacar a

desvantagem da utilização deste modo na estação fria, que poderá acarretar um aumento das necessidades de iluminação artificial, principalmente em dias mais encobertos. Esta situação foi evidenciada no mapeamento das iluminâncias, no qual se verifica que para algumas zonas do gabinete B os valores mínimos de iluminância aconselhados não são cumpridos.

Apesar de um dos painéis do envidraçado com película PDLC se encontrar com a película avariada, funcionando apenas em modo *off*, é possível verificar uma diminuição da transmitância visível neste modo comparativamente ao modo *on*, o que revela algumas potencialidades deste tipo de películas no controlo da transmitância não só para aumentar a privacidade, mas também para aumentar o conforto visual em situações em que exista excesso de iluminância no interior.

O facto de as películas não terem sido aplicadas na totalidade do envidraçado, associado à orientação das fachadas envidraçadas que, segundo a bibliografia consultada, não é a mais aconselhada para a aplicação de películas de controlo solar em climas mediterrânicos, poderão ter sido fatores para a não observação das diferenças que seriam de esperar entre os valores registados de cada gabinete. Deste modo, para além dos desenvolvimentos futuros aconselhados no subcapítulo que se segue, julga-se ser útil fazer um alerta para que a orientação e a área dos envidraçados sejam aspetos fulcrais a considerar na escolha do caso de estudo em análises de natureza semelhante à presente dissertação, aconselhando-se a aplicação das películas a estudar na totalidade do envidraçado do caso de estudo.

## 6.2. Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros nesta temática da eficiência energética dos envidraçados, propõe-se:

- Analisar o comportamento térmico e lumínico deste tipo de películas em fachadas com orientações distintas, no sentido de aprofundar a melhor aplicação das mesmas;
- Analisar a possibilidade de regulação da transmitância de forma gradual e conveniente para películas do tipo electrocrómicas e PDLC, através da incorporação de sensores de luminosidade;
- Estudar a possibilidade de desenvolvimento de vidros duplos com este tipo de películas junto da caixa de ar, no sentido de minimizar os erros de aplicação e diminuir a velocidade de degradação e durabilidade das mesmas.
- Realizar uma análise económica de custo-benefício comparativa entre a combinação de películas PDLC (possíveis vantagens ao nível do conforto visual e regulação da privacidade) com películas adesivas poliméricas de controlo solar (vantagens ao nível do conforto térmico) e películas electrocrómicas com potencialidades semelhantes;
- Realizar uma análise comparativa em edifícios de serviços com aplicação de diferentes tipos de películas de controlo solar em grandes áreas de envidraçados.

## 7. Referências

- [1] DGEG, "ENERGIA em Portugal", 2018.
- [2] R. K. Pachauri, "Climate Change 2014 Synthesis Report", 2014.
- [3] I. E. Agency, "Global status report 2017", 2017.
- [4] Ang Allen, "Buildings and Climate Change", Global Alliance for Buildings and Construction, 2017.
- [5] A. Delgado, "A racionalização do consumo de Energia e o sector da Construção", 2018.
- [6] D. Faggembauu, M. Costa, M. Soria, e A. Oliva, "Numerical analysis of the thermal behaviour of ventilated glazed facades in Mediterranean climates. Part I: development and validation of a numerical model", Vol. 75, pp. 217–228, 2003.
- [7] J. O. Pereira, "Simulação energética de películas em envidraçados", 2015. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, IST, Lisboa, Portugal, novembro de 2015.
- [8] C. E. Ochoa, M. B. C. Aries, E. J. Van Loenen, e J. L. M. Hensen, "Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort", *Appl. Energy*, Vol. 95, pp. 238–245, 2012.
- [9] P. Tavares e H. Bernardo, "Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in mediterranean buildings refurbishment", Vol. 134, pp. 236–250, 2016.
- [10] D. L. Lourenço, "Estudo experimental do desempenho térmico e óptico de envidraçados com películas de controlo solar", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.
- [11] G. A., "Towards zero-emission efficient and resilient buildings", Global Status Report, 2016.
- [12] DGGE, "Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais", 2004.
- [13] H. E. G. Gaspar, "Melhoria da eficiência energética de edifícios existentes – Análise técnico-económica", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, ISEC, Coimbra, Portugal, junho de 2016.
- [14] M. Ferreira, "A eficiência energética na reabilitação de edifícios", Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal 2009.
- [15] V. Rocheta e F. Farinha, "Práticas de projecto e construtivas para a construção sustentável", 2007.

- [16] E. Moretti e E. Belloni, "Evaluation of energy, thermal, and daylighting performance of solar control films for a case study in moderate climate", *Build. Environ.*, 2015.
- [17] M. G. Gomes, A. J. Santos, e A. M. Rodrigues, "Solar and visible optical properties of glazing systems with venetian blinds: Numerical , experimental and blind control study", *Build. Environ.*, Vol. 71, pp. 47–59, 2014.
- [18] E. S. C. LLC, "Managing Energy Costs in Office Buildings", 2010.
- [19] D. H. W. Li, J. C. Lam, e S. L. Wong, "Daylighting and its implications to overall thermal transfer value ( OTTV ) determinations", Vol. 27, pp. 991–1008, 2002.
- [20] V. C. Miranda, P.M.A., F.E.S. Coelho, A.R. Tomé, M.A. Valente, A. Carvalho, C. Pires, H.O. Pires e C. R. Pires, "20 th Century Portuguese Climate and Climate Scenarios", pp. 23–83, 2002.
- [21] T. Frank, "Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland", Vol. 37, pp. 1175–1185, 2005.
- [22] H. Wang e Q. Chen, "Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States", Vol. 82, pp. 428–436, 2014.
- [23] B. I. Ouedraogo, G. J. Levermore, e J. B. Parkinson, "Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso", Vol. 49, pp. 270–282, 2012.
- [24] Y. Yildiz, "Impacts of climate change on heating and cooling loads in residential buildings", *Gazi Univ. J. Sci.*, Vol. 29, No. 1, pp. 27–34, 2016.
- [25] L. Guan, "Implication of global warming on air-conditioned office buildings in Australia", *Build. Res. Inf.*, Vol. 37, No. 1, pp. 43–54, 2009.
- [26] P. de Wilde e W. Tian, "Management of thermal performance risks in buildings subject to climate change", *Build. Environ.*, Vol. 55, pp. 167–177, 2012.
- [27] R. Aguiar, M. Oliveira, e H. Gonçalves, "Climate change impacts on the thermal performance of Portuguese buildings. Results of the SIAM study", *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, voV. 23, No. 4, pp. 223–231, 2002.
- [28] A. C. D. F. Diogo, "Sistemas Envidraçados com e sem Protecção Solar", *Dissertação de Mestrado em Arquitetura*, IST, Lisboa, Portugal, junho de 2012.
- [29] F. Moita, "Energia Solar Passiva", 1987.
- [30] A. C. da Piedade, A. M. Braga, e A. M. Rodrigues, "Térmica de Edifícios", 2009.
- [31] A. J. Marsh, "Solar Radiation". [Em linha]. Disponível em: <http://naturalfrequency.com/wiki/solar-radiation>. [Acedido: 08-Mai-2018].
- [32] R. Russel, "Ultraviolet Radiation". [Em linha]. Disponível em: [https://www.windows2universe.org/physical\\_science/magnetism/em\\_ultraviolet.html&edu=elem](https://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_ultraviolet.html&edu=elem)

- &dev=1The. [Acedido: 12-Mai-2018].
- [33] C. R. Faustino, "Influência dos Vãos Envidraçados no Desempenho Energético de Edifícios", Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, IST, Lisboa, Portugal, outubro de 2012.
- [34] R. Russel, "Visible Light". [Em linha]. Disponível em: [https://www.windows2universe.org/physical\\_science/magnetism/em\\_visible\\_light.html&edu=high&dev=1/k=/teacher\\_resources/ozone\\_strato.html](https://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_visible_light.html&edu=high&dev=1/k=/teacher_resources/ozone_strato.html). [Acedido: 12-Mai-2018].
- [35] R. Russel, "Infrared Radiation". [Em linha]. Disponível em: [https://www.windows2universe.org/physical\\_science/magnetism/em\\_infrared.html&edu=high](https://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_infrared.html&edu=high). [Acedido: 12-Mai-2018].
- [36] A. P. de A. S. Castro, "DESEMPENHO TÉRMICO DE VIDROS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO EM CÉLULAS-TESTE", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil 2006.
- [37] S. Chaiyapinunt e B. Phueakphongsuriya, "Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission", Vol. 37, pp. 725–738, 2005.
- [38] D. Russo, C. Mckown, C. Roger, J. Brotzman, e J. Stricker, "The influence of film composition on the optical and thermal properties of solar control coatings", Vol. 399, pp. 65–70, 2001.
- [39] A. G. P. M. Rebelo, "Optimização e dimensionamento de vãos envidraçados", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2009.
- [40] F. J. C. Ramalheira, "Manual de boas práticas de escolha de vãos envidraçados Exigências Funcionais de Vãos Envidraçados", 2005.
- [41] E. Giacomini, "Tecnologias de Fachadas: Material o Vidro", pp. 1–27, 2012.
- [42] European Window Film Association, "Short History of Window Film". [Em linha]. Disponível em: <http://www.ewfa.org/Knowledge/ShortHistoryofWindowFilm.aspx>. [Acedido: 15-Mai-2018].
- [43] M. Zawidzki, "Dynamic shading of a building envelope based on rotating polarized film system controlled by one-dimensional cellular automata in regular tessellations (triangular, square and hexagonal)", Adv. Eng. Informatics, Vol. 29, No. 1, pp. 87–100, 2015.
- [44] R. Baetens, B. P. Jelle, e A. Gustavsen, "Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 94, No. 2, pp. 87–105, 2010.
- [45] C. M. Lampert, "Smart switchable glazing for solar energy and daylight control", Sol. Energy

- Mater. Sol. Cells, Vol. 52, No. 3–4, pp. 207–221, 1998.
- [46] S. F. S. de Figueiredo, "Avaliação experimental das condições de conforto térmico e visual no interior de edifícios, através da aplicação de películas nos vãos envidraçados", Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão de Energia, IST, Lisboa, Portugal, outubro de 2018.
- [47] C. G. Granqvist, "Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices", *Thin Solid Films*, Vol. 564, pp. 1–38, 2014.
- [48] A. Pawlicka, "Development of electrochromic devices", *Recent Pat. Nanotechnol.*, Vol. 3, n. 3, pp. 177–81, 2009.
- [49] C. G. Granqvist, "Electrochromics and Thermochromics: Towards a New Paradigm for Energy Efficient Buildings", *Mater. Today Proc.*, Vol. 3, n. 1c, pp. S2–S11, 2016.
- [50] S. D. Rezaei, S. Shannigrahi, e S. Ramakrishna, "A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 159, pp. 26–51, 2017.
- [51] CEN, "EN 15752-1 Glass in building - Adhesive backed polymeric film - Part 1: Definitions and requirements", 2014.
- [52] A. Hadj Sahraoui, S. Delenclos, S. Longuemart, e D. Dadarlat, "Heat transport in polymer-dispersed liquid crystals under electric field", *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, n. 3, 2011.
- [53] D. Cupelli et al., "Self-adjusting smart windows based on polymer-dispersed liquid crystals", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 93, n. 11, pp. 2008–2012, 2009.
- [54] J. Murray, D. Ma, e J. N. Munday, "Electrically controllable light trapping for self-powered switchable solar windows", *ACS Photonics*, Vol. 4, n. 1, pp. 1–7, 2017.
- [55] Smart Tint, "Smart Tint". 2018.
- [56] D. Morecroft, "Smart windows: enhancing the energy efficiency of buildings", 2015.
- [57] CEN, "EN 15755-1 Glass in building - Adhesive backed polymeric filmed glass - Part 1: Definitions and requirements", 2014.
- [58] Llummar, "WINDOW FILM PERFORMANCE DATA". [Em linha]. Disponível em: <http://www.vista-films.com/pdf/Vista-Specs.pdf>. [Acedido: 20-Mai-2018].
- [59] S. Sibilio et al., "A Review of Electrochromic Windows for Residential Applications", *Int. J. Heat Technol.*, Vol. 34, n. Special Issue 2, pp. S481–S488, 2016.
- [60] S. Capoccia, "Many Utilities See Window Film As A Cost-Effective Way To Cut Peak Demand". [Em linha]. Disponível em: <https://www.prnewswire.com/news-releases/many-utilities-see-window-film-as-a-cost-effective-way-to-cut-peak-demand-300119035.html>. [Acedido: 16-Mai-2018].

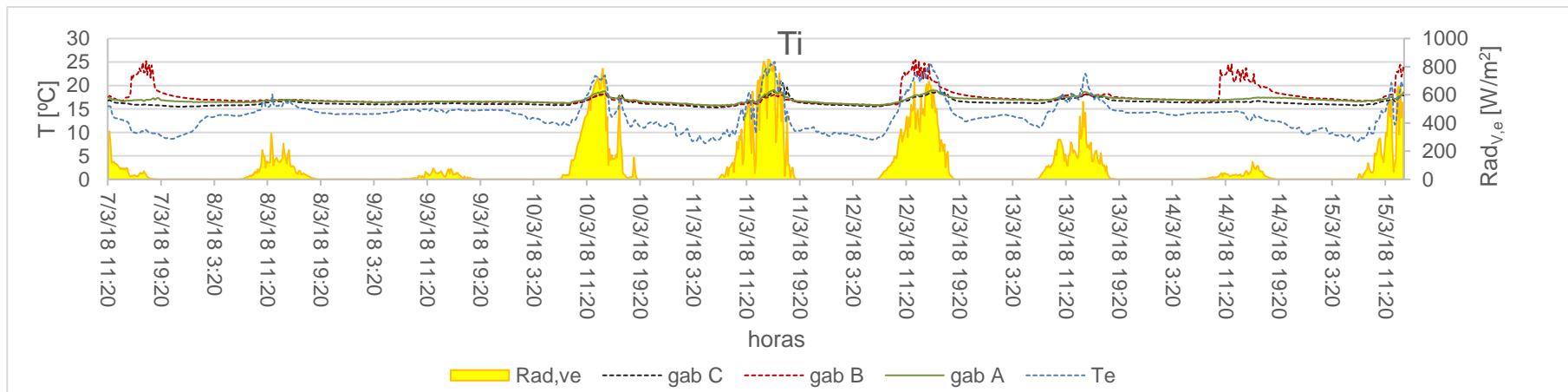
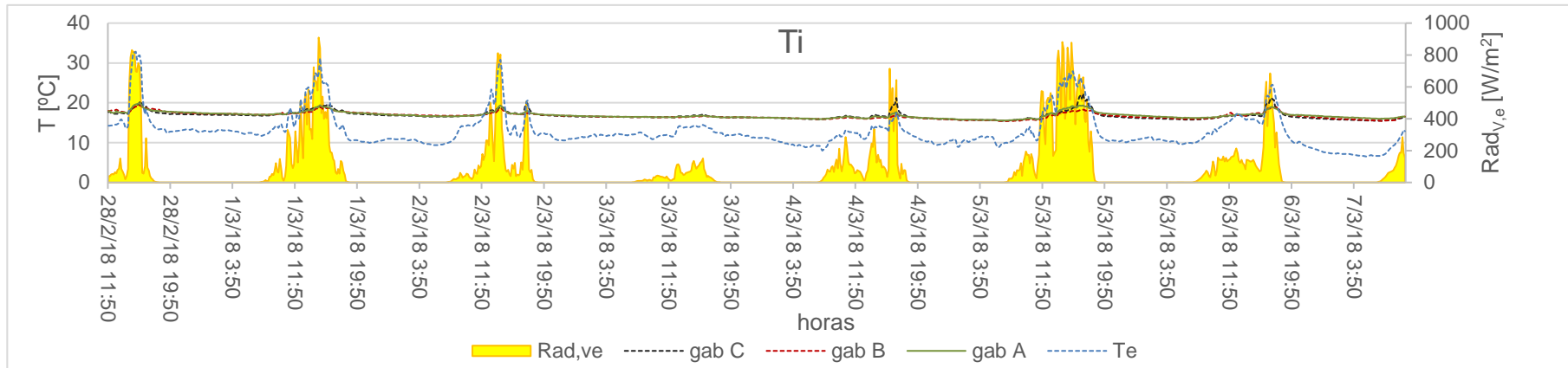
- [61] P. F. Tavares, A. R. Gaspar, A. G. Martins, e F. Frontini, "Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates", *Energy Policy*, pp. 1–14, 2013.
- [63] Windows for high-performance commercial buildings, "Visible Transmittance". [Em linha]. Disponível em: <https://www.commercialwindows.org/vt.php>. [Acedido: 18-Mai-2018].
- [64] A. Piccolo, C. Marino, A. Nucara, e M. Pietrafesa, "Energy performance of an electrochromic switchable glazing : Experimental and computational assessments", *Energy Build.*, Vol. 0, pp. 1–9, 2018.
- [65] Y. Ajaji e P. André, "Thermal comfort and visual comfort in an office building equipped with smart electrochromic glazing : an experimental study", Vol. 78, pp. 2464–2469, 2015.
- [66] N. L. Sbar, L. Podbelski, H. Mo, e B. Pease, "Electrochromic dynamic windows for office buildings", *Int. J. Sustain. Built Environ.*, Vol. 1, n. 1, pp. 125–139, 2012.
- [67] A. C. R. Bento, "Modeling and validation of a thermal energy storage based on the utilization of Phase Change Materials (PCM) in an office room Mechanical Engineering Examination Committee", *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica*, IST, Lisboa, Portugal, Outubro de 2017.
- [68] "Smart Tint Technical Data Sheet". [Em linha]. Disponível em: <https://www.smarttint.com/specs/specsheet-smart-tint.pdf>. [Acedido: 12-Mai-2018].

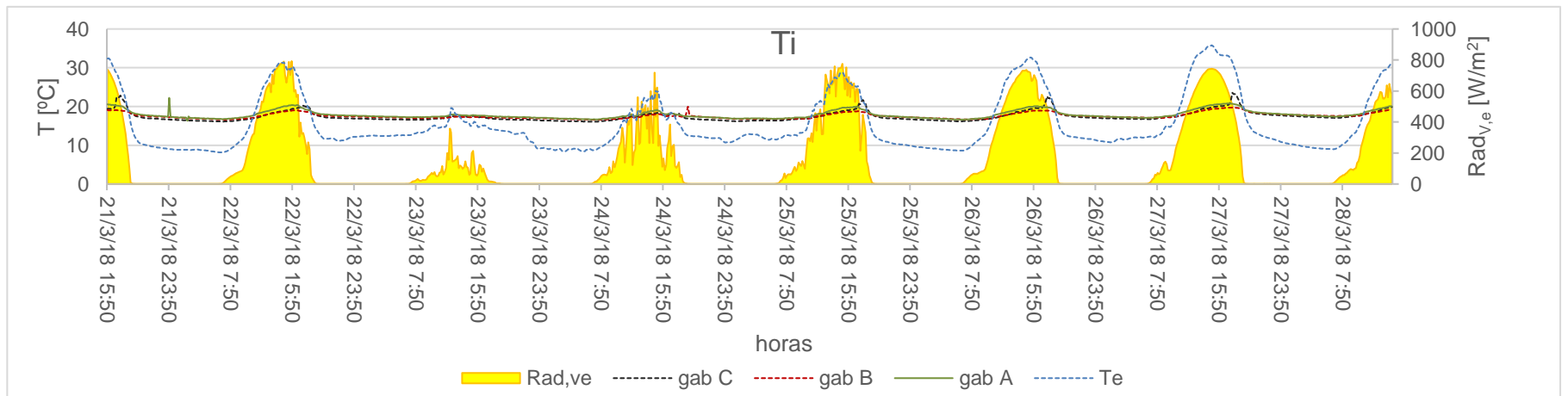
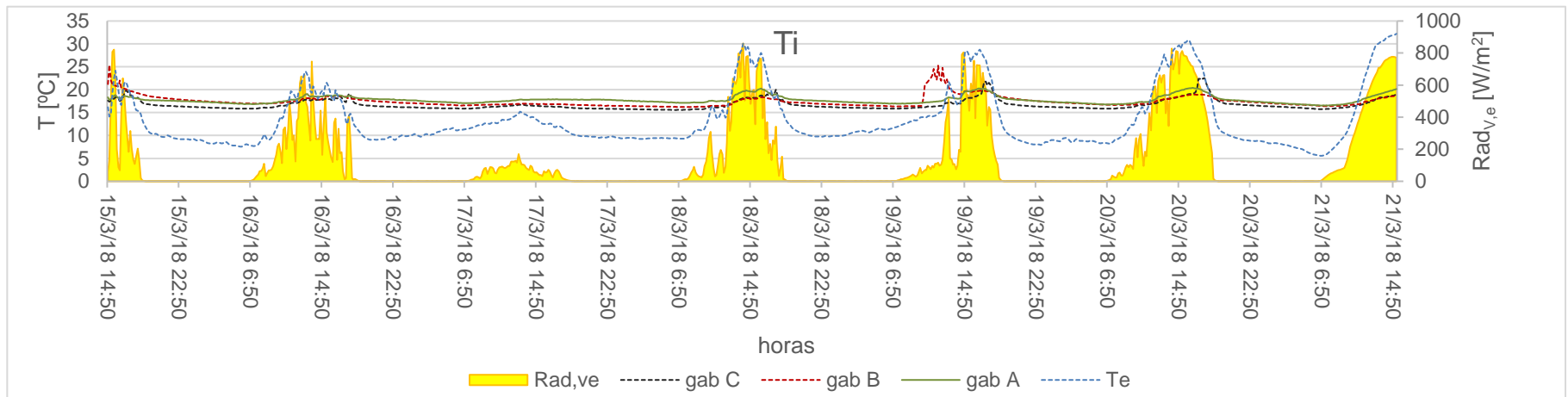
# **ANEXOS**

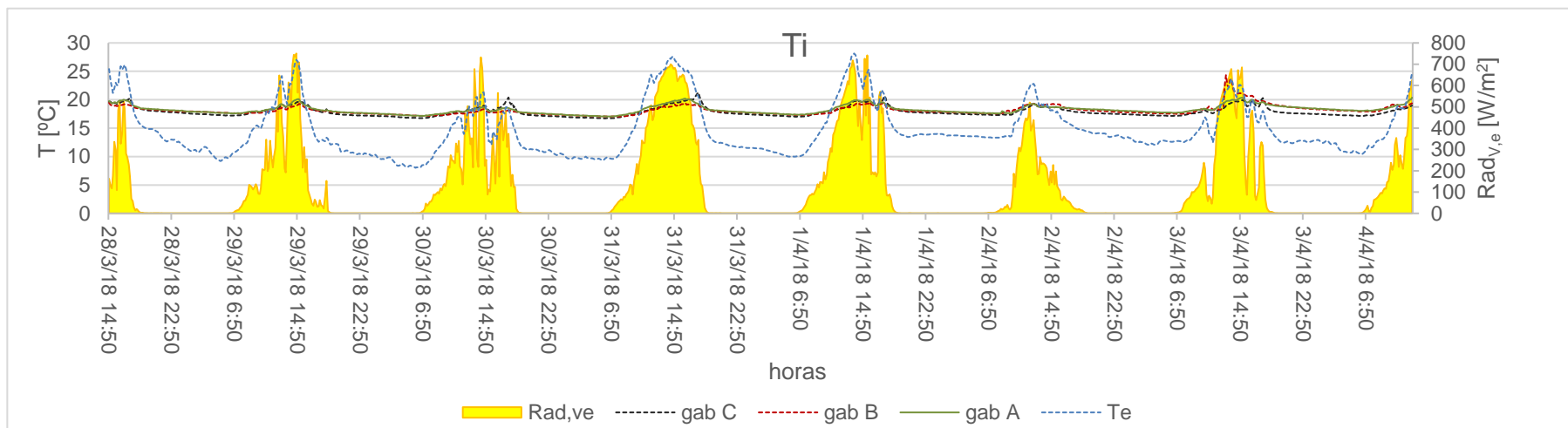




## Anexo A: Campanha de Inverno









## Anexo B: Campanha de Verão

