

**Avaliação experimental das condições de conforto térmico
e visual no interior de edifícios através da aplicação de
películas nos vãos envidraçados**

Susana Filipa Santinhos de Figueiredo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão da Energia

Orientadores: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Júri

Presidente: Prof. Luís Filipe Moreira Mendes

Orientador: Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Vogal: Prof. Maria da Glória de Almeida Gomes

Novembro 2018

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao professor Rui Neto, por toda a sua dedicação, apoio e motivação prestada, assim como, ao professor Carlos Silva pela oportunidade do tema, apoio demonstrado e por ter disponibilizado equipamentos bastante fulcrais para a realização da dissertação.

Ao professor André Pina e à professora Helena por disponibilizarem os seus gabinetes para a realização do trabalho experimental.

À *Formula Student* pela disponibilização da câmara termográfica, para a realização a captação de imagens termográficas bastante importantes.

Por toda a dedicação, apoio incondicional, por todas as vossas palavras de conforto e constante motivação em todos os momentos da minha vida um enorme obrigada à minha Mãe, Avó e Prima. Sem vocês nada disto teria sido possível.

Resumo

A fim de melhorar o conforto térmico e o conforto visual do ambiente interior dos gabinetes de trabalho no campus do IST-TagusPark, foi implementada uma película inteligente (PI) do tipo PDLC e uma película reflexiva (PR) com proteção solar em 37,76% da área envidraçada de dois gabinetes. O conforto térmico foi analisado pela monitorização de temperaturas e humidades relativas interiores, assim como a irradiância e temperatura exteriores para as seguintes situações: na primeira, foi utilizada a PI em modo opaca e a PR e na segunda, utilizando a PI em modo transparente para a PR. Os resultados foram comparados com os obtidas num gabinete de referência sem películas. Para analisar o seu impacto no conforto visual, foram criadas duas zonas, uma junto à janela (ZJ) e outra na zona de trabalho (ZT) nas quais foram retirados valores de iluminância no gabinete de referência, no gabinete com PI opaco e transparente e no gabinete com PR para uma hora específica na presença de radiação essencialmente direta e difusa.

Constatou-se que comparativamente ao gabinete de referência, as películas possibilitam um decréscimo da temperatura interior, contudo pouco significativa ($\Delta T > -1^{\circ}\text{C}$), assim como uma redução da necessidade de arrefecimento. Pelo seu controlo de entrada de radiação, a PI apresenta melhorias no conforto visual quando na presença de radiação essencialmente direta e embora na presença de radiação essencialmente difusa o gabinete de referência apresentar um valor ligeiramente acima de 500 lx, a PI possibilita valores igualmente próximos, enquanto que a PR não apresenta melhorias tão significativas.

Palavras-chave: Ganhos solares em janelas de edifícios; Película inteligente PDLC; Película reflexiva; Conforto térmico; Conforto visual.

Abstract

In order to improve thermal comfort and visual comfort in the indoor environment of offices in IST-Taguspark campus, a PDLC type intelligent film, and a reflexive film with solar protection were implemented in two offices room in 37,76% of the glazed area.

Thermal comfort was analyzed using indoor temperatures and relative humidity monitoring, as well as external temperature and irradiance for two conditions: the first one for opaque PDLC and reflexive film, and in the second for the transparent PDLC. The variables were compared with those obtained in a reference office room without films.

To analyze its impact on visual comfort, two zones were created, one next to the window (ZJ) and another in the work zone (ZT), where the illuminance values were obtained in the reference office room, in the office with PDLC opaque and transparent and in the office with reflexive film in the presence of essentially direct and diffuse radiation for specific time.

It was found that, comparatively to the reference office, PDLC and reflexive film are able to slightly reduce the internal temperature ($\Delta T > -1^\circ\text{C}$), as well as the cooling needs.

Due to its radiation control, PDLC induces an improvement in the visual comfort when in the presence of essentially direct radiation. Further, although in the presence of essentially diffuse radiation the reference presents an average illuminance value slightly above 500 lx, the PDLC allows values to obtain similar values, while reflexive film does not show such significant improvements in the illuminance obtained values.

Keywords: Solar gains on building windows; PDLC switchable smart film; Reflexive film with solar protection; Thermal comfort; Visual comfort

Índice

Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
Acrónimos.....	x
Nomenclatura	xi
1. Introdução	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.2. ESTRUTURA	3
2. Estado de Arte.....	4
2.1. IMPORTÂNCIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS.....	4
2.1.1. Legislação existente	4
2.2. CONFORTO TÉRMICO E CONFORTO VISUAL.....	4
2.2.1. Conforto Térmico.....	4
2.2.2. Conforto Visual	5
2.3. IMPACTO DAS JANELAS NO CONSUMO DE ENERGIA.....	8
2.3.1. Fenómenos de transferência de calor que ocorrem nos vãos envidraçados.....	8
2.3.2. Desempenho térmico e ótico do vidro	9
2.4. TIPOS DE MATERIAIS, TECNOLOGIAS E REVESTIMENTOS	11
2.5. JANELAS INTELIGENTES	12
2.5.1. Condutores transparentes	13
2.5.2. Dispositivos ativos	13
I. Dispositivo Electrocrómico	14
II. Cristais líquidos dispersos em polímero (PDLC)	16
III. Dispositivo de partículas suspensas (SPD).....	18
IV. Janelas gasocrómicas	19
2.5.3. Dispositivos passivos.....	20
I. Dispositivo Fotocrómico	20
II. Dispositivo Termocrómico	21
2.5.4. Principais vantagens e desvantagens	24
2.5.5. Evolução no mercado	26
2.6. PELÍCULAS ADESIVAS POLIMÉRICAS	27
2.7. CONCLUSÕES.....	27
3. Caso de Estudo	29

3.1.	LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO.....	29
3.2.	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA.....	30
3.3.	INÉRCIA TÉRMICA.....	32
3.4.	TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR.....	33
3.5.	METODOLOGIA.....	35
3.5.1.	Configurações gerais.....	36
3.6.	PELÍCULAS IMPLEMENTADAS.....	36
3.6.1.	Película inteligente do tipo PDLC.....	37
3.6.2.	Película reflexiva (PR) com proteção solar.....	38
3.7.	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS E A SUA FINALIDADE.....	39
3.7.1.	Câmara termográfica.....	39
3.7.2.	Estação meteorológica.....	39
3.7.3.	Luxímetro.....	40
3.7.4.	Medidor de CO ₂	40
3.7.5.	Multímetro e termopares.....	41
3.7.6.	Sensores de temperatura e humidade relativa.....	41
3.8.	IMPACTO DAS PELÍCULAS NO CONFORTO TÉRMICO DOS GABINETES.....	42
1ª Situação -	Análise do perfil de temperatura da fachada em contacto com o exterior, sem qualquer película implementada.....	42
2º Situação-	Amostras termográficas do gabinete de referência, película inteligente (PI) opaca e da película reflexiva (PR) com proteção solar.....	43
3º e 4º Situação-	Impacto da Película inteligente (modo opaco 3ª situação e modo transparente 4ª Situação) e da Película reflexiva no conforto térmico comparativamente à utilização de Vidro duplo.....	43
3.9.	IMPACTO DAS PELÍCULAS NO CONFORTO VISUAL DOS GABINETES.....	44
5ª Situação-	Influência de placas cinzentas na iluminância do gabinete 2N.16.20.....	46
6ª Situação-	Impacto da Película inteligente modo opaco e transparente e da película reflexiva no conforto visual comparativamente à utilização de Vidro duplo- Radiação essencialmente direta.....	46
7ª Situação-	Impacto da Película inteligente modo opaco e modo transparente e da película reflexiva no conforto visual comparativamente à utilização de Vidro duplo- Radiação essencialmente difusa.....	46
4.	Resultados e discussão.....	46
4.1.	IMPACTO DAS PELÍCULAS NO CONFORTO TÉRMICO DOS GABINETES.....	47
1ª Situação-	Análise do perfil de temperatura da fachada em contacto com o exterior, sem qualquer película implementada.....	47
2ª Situação-	Amostras termográficas captadas nos três gabinetes.....	48
3ª e 4º Situações-	Impacto da Película inteligente (modo opaco 3ª situação e modo transparente 4ª situação) e da Película reflexiva no conforto térmico comparativamente à utilização de Vidro duplo.....	50
4.2.	INFLUÊNCIA DAS PELÍCULAS NO CONFORTO VISUAL DOS GABINETES.....	57

5ª Situação- Influência de placas de cor cinzenta na iluminância de gabinete	57
6º Situação e 7º Situação- Impacto da Película inteligente no modo opaco e no modo transparente e da película reflexiva no conforto visual comparativamente à utilização de Vidro duplo (Gabinete de referência- Radiação essencialmente direta e Radiação essencialmente difusa	59
5. Conclusão	66
6. Trabalhos futuros	68
7. Referência bibliográficas	69
Anexo I- Especificações de janelas inteligentes comercializadas para aplicação em edifícios	72
Anexo II- 6ª Situação- Iluminância nos gabinetes- Radiação essencialmente direta	73
Anexo III- 7ª Situação - Iluminância nos gabinetes- Radiação Difusa	74

Índice de Figuras

Figura 1- ASHRAE STANDART 55-2017- Zonas de Conforto térmico verão (à esquerda) e inverno (à direita) (CBE Thermal Comfort Tool, 2018).....	5
Figura 2- Mecanismos de transferência de calor que ocorrem nos vãos envidraçados	9
Figura 3- Decomposição da radiação incidente no envidraçado	10
Figura 4 - Evolução do coeficiente de transmissão de calor nas janelas	12
Figura 5- Tipos de dispositivos para vidros inteligentes, ativos e passivos	13
Figura 6- Dispositivo electrocrómico	14
Figura 7- Janelas eletrocrómicas at Chabot College, Califórnia	15
Figura 8- Princípio de funcionamento do PDLC	16
Figura 9- Modos de funcionamento PDLC: modo transparente e modo opaco respetivamente	17
Figura 10- Modo de funcionamento de dispositivos de partículas suspensas	18
Figura 11- Exemplo de aplicação SPD.....	19
Figura 12 - Transmitância janela gasocrómica	20
Figura 13- Janela termocrómica.....	22
Figura 14- Transmitância VO ₂	23
Figura 15- Evolução da tecnologia eletrocrómica e termocrómica (n-Tech Research, s.d.)	26
Figura 16- Janelas inteligentes no mercado 2014-2021 (\$ Milhões) Fonte: (n-Tech Research, s.d.)	26
Figura 17- Localização do caso de estudo.....	29
Figura 18- Localização dos gabinetes de estudo no Bloco E	29
Figura 19 - Inércia térmica dos elementos de construção dos gabinetes	32
Figura 20- Decaimento de CO ₂ no gabinete 2N.16.20.....	34
Figura 21- Regressão linear da concentração logarítmica de CO ₂	35
Figura 22- Metodologia para o caso de estudo.....	36
Figura 23- Implementação das películas nos vidros inferiores dos gabinetes.....	37
Figura 24- À direita esquema da composição da película inteligente SmartCling Self Adhesive (Fonte: (Smart Tint, s.d.)); à esquerda Montagem Botão on/off para permitir a comutação das películas.....	38
Figura 25- Propriedades da película inteligente PDLC Smart Cling Self Adhesive Smart Tint- Low driving voltage	38
Figura 26 - Propriedades da película reflexiva Linea Hogar- Safe Auto-Adhesive UV Protection.....	39
Figura 27- Câmara termográfica Milwaukee	39
Figura 28- Estação meteorológica Davis Instruments Vantage Pro2	40
Figura 29- Luxímetro vici modelo LX-1332B	40
Figura 30- Medidor de CO ₂ Chauvin Arnouc C.A 1510.....	40
Figura 31- Multímetro Omega Newport® TrueRMS SUPERMETER e termopare do tipo k	41
Figura 32- Sensor Hobo U12-011 Temp/RH colocado à altura do hipotálamo.....	41
Figura 33- À esquerda, montagem dos termopares e à direita, corte esquemático da parede exterior localização dos termopares.....	43
Figura 34- Gabinete de referência (2N.16.22) e Gabinete com Película Reflexiva (2N.17.14) respetivamente	44

Figura 35- Gabinete com Película Inteligente opaca (à esquerda) e transparente (à direita) (2N.16.20)	44
Figura 36- Zona J e Zona T para efeitos de análise de iluminância nos gabinetes	45
Figura 37- Perfil de Temperaturas: Parede, caixilho e vidro respetivamente	47
Figura 38 - a) Imagens termográficas envidraçado gabinete de referência: a) captada às 9h30 e b) às 17h30.....	48
Figura 39- Imagens termográficas chão no gabinete de referência: a) captada às 9h30 e b) às 17h30	48
Figura 40- 3ª Situação- Temperaturas interiores nos gabinetes de referência, com PI modo opaco e PR; temperatura irradiância exteriores.....	51
Figura 41- 3ª Situação- Zona de conforto dos gabinetes em estudo	52
Figura 42- 3ª Situação: Variações de temperatura no interior dos gabinetes, temperatura exterior e irradiância	52
Figura 43- Temperaturas interiores mês de agosto 2017 no gabinete de referência, gabinete com PI opaca e gabinete com PR	54
Figura 44- 4ª Situação-Temperaturas interiores nos gabinetes de referência, com PI modo transparente e PR; temperatura irradiância exteriores.....	54
Figura 45- 4ª Situação- Zona de conforto dos gabinetes em estudo	55
Figura 46- 4ª Situação- Variações de temperatura no interior dos gabinetes, temperatura exterior e irradiância	56
Figura 47- Influência da diferença de mobiliário nos valores de iluminância obtidos no dia 14 de julho às 14:00	58
Figura 48- Influência de placas cinzentas no gabinete 2N.16.20 para 3 horas diferentes ao longo do dia	58
Figura 49- Iluminância no gabinete de referência na ZJ e ZT- Radiação essencialmente direta.....	59
Figura 50- Variações de iluminância nos gabinetes com películas comparativamente ao gabinete de referência- Radiação Direta.....	60
Figura 51- Iluminância no gabinete de referência na ZJ e ZT- Radiação essencialmente difusa	61
Figura 52- Variações de iluminância nos gabinetes com películas comparativamente ao gabinete de referência- Radiação Difusa	61
Figura 53- Radiação Direta Vs Radiação Difusa na ZJ e ZT	62
Figura 54- Iluminâncias médias nas zonas J e T -Radiação essencialmente direta (cor laranja) e Radiação difusa (cor azul).....	64
Figura 55- Dados de janelas electrocrómicas comercializadas para aplicação em edifícios	72
Figura 56- Dados de janelas baseadas em cristais líquidos comercializadas aplicadas para aplicação em edifícios	72
Figura 57- Dados de janelas baseadas em partículas suspensas comercializadas para aplicação em edifícios.....	72
Figura 58- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente direta- Gabinete com película reflexiva com proteção solar (PR).....	73

Figura 59- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente direta- Gabinete com película inteligente modo opaco	73
Figura 60- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente direta- Gabinete com película inteligente modo transparente	73
Figura 61- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente difusa- Gabinete com película reflexiva com proteção solar (PR).....	74
Figura 62- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente difusa- Gabinete com película inteligente modo opaco	74
Figura 63- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente difusa- Gabinete com película inteligente modo transparente	74

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Norma DIN 5035: 1990- Níveis de iluminância de acordo com o tipo de atividade	6
Tabela 2- Norma 8995 (2002)- Iluminância média (Em) em escritório de acordo com o tipo de tarefa..	7
Tabela 3 - Norma 12464 Em na área circundante de acordo com a Em no local de trabalho.....	7
Tabela 4- Principais especificações dos dispositivos utilizados em janelas inteligentes	24
Tabela 5- R_{se} e R_{si} segundo a norma EN ISO 6946	31
Tabela 6- Materiais de construção dos elementos opacos do gabinete e os respetivos coeficientes de transmissão de calor	31
Tabela 7- Propriedades óticas vidro incolor 6 mm	37
Tabela 8- Erros considerados para correção dos valores obtidos	42
Tabela 9- Casos de estudo para a 5ª e 6ª situação	45
Tabela 10- Imagens Termográficas às 15h30m referentes à parede sudoeste, chão e paredes interiores	49
Tabela 11- 3ª Situação Período Diurno-Valores máximo, mínimo e média	53
Tabela 12- 4ª Situação Período Diurno-Valores máximo, mínimo e média	56

Acrónimos

EC- Eletrocrómico

Ext- Exterior

HR- Humidade Relativa

Int- Interior

PDLC- Cristais líquidos dispersos em polímero

PI- Película inteligente

PR- Película reflexiva

SPD- Dispositivos de partículas suspensas

Tamb- Temperatura ambiente

Text- Temperatura exterior

Tp- Temperatura da parede

Tv-Temperatura do vidro

ZJ- Zona da janela

ZT- Zona de trabalho

Nomenclatura

τ - Transmitância

ε -emissividade

g_{\perp} - fator solar

G [W/ m²]- Irradiância

U [W/(m².K)]- Coeficiente de transmissão de calor

R[(m².K)/W]- Resistência térmica

°C- Graus celsius

L- Luminância [cd/m²]

k [W/(m.k)]- Condutibilidade térmica

Em- Iluminância média [lx]

E- Iluminância [lx]

1. Introdução

A quantidade de dióxido de carbono presente na atmosfera tem vindo a aumentar exponencialmente, o que leva conseqüentemente ao aquecimento global que induz alterações climáticas. Este aumento, deve-se essencialmente à queima de combustíveis fósseis, pelo que, existe necessidade de recorrer a alternativas seguras e limpas.

Para que haja uma descarbonização, é consensual tomar diferentes tipos de medidas, nomeadamente no setor dos edifícios, estes responsáveis por 30%-40% do uso global de energia primária (Granqvist, 2016) que contribuem aproximadamente em 36% das emissões totais de carbono (Allen, Connelly, Rutherford, & Wu, 2017).

Nos projetos de arquitetura, o tamanho e as formas do edifício são componentes arquitetónicas onde o fator criatividade é tida em consideração e muitas vezes a potencialidade energética é desvalorizada (Zawidzki, 2015). Porém em Portugal existe legislação desde 1990 quanto ao desempenho energético de edifícios que visa promover o conforto térmico e reduzir a necessidade de energia, sendo que o objetivo traçado para 2020 é uma poupança de 20% no consumo de energia final.

São vários os fatores associados a condições de conforto dos ocupantes num edifício. Salienta-se que, tanto o aquecimento como o arrefecimento do espaço são empregados de forma a que se consigam atingir temperaturas de conforto, correspondendo estas necessidades a um terço do consumo dos edifícios (International Energy Agency (IEA), 2013).

Atualmente os edifícios comerciais e residenciais utilizam na sua construção, fachadas com áreas bastante elevadas de envidraçados por fim a maximizar a visibilidade para o exterior, assim como aumentar a quantidade de luz natural no interior. Contudo, um dos componentes que mais contribui para os ganhos e perdas de calor são as janelas, o que contribui conseqüentemente para a necessidade de cargas de aquecimento e de arrefecimento (Rezaei, Shannigrahi, & Ramakrishna, 2017), sendo que, um dos fatores que contribui para o aumento das necessidades de arrefecimento são os ganhos por radiação solar através das áreas envidraçadas.

A radiação solar, quando incide no envidraçado composta por espectro visível e invisível. O espectro visível contribui para a entrada de luz natural bastante importante para o ocupante, embora em excesso possa comprometer o conforto visual, causando desconforto. A parte invisível do espectro além de ser prejudicial para a saúde, altera as propriedades termofísicas do edifício contribuindo com cargas térmicas indesejáveis.

As películas adesivas poliméricas permitem alterar as propriedades do vidro existente, sendo que, em particular as películas de controlo solar permitem diminuir os ganhos solares, pela diminuição do fator solar do envidraçado contribuindo conseqüentemente para a diminuição das necessidades energéticas (Lourenço, 2016). Todavia este tipo de película é um componente estático pelo que não permite a modulação da sua transmitância.

Surge, então, o conceito janelas inteligentes que visa contornar essas necessidades promovendo a sustentabilidade energética, uma vez que podem diminuir drasticamente o consumo nos edifícios

(Baetens, Jelle, & Gustavsen, 2010) em 30% (Carl M Lampert, 1998). Podem ainda apresentar uma melhoria face as tecnologias estáticas, uma vez que possibilitam a regular da quantidade de radiação e comprimentos de ondas transmitidas para o interior (Allen et al., 2017), assim como contribuir para a melhoria do conforto visual e térmico ocupante.

Contrariamente às janelas estáticas, as janelas inteligentes possibilitam o controlo das suas propriedades óticas através da aplicação de um campo elétrico ou em resposta a condições ambientais, podendo ser classificadas como ativas ou passivas respetivamente. Consideram-se ativas as janelas que utilizam dispositivos electrocrómicos, dispositivos de partículas suspensas, cristais líquidos dispersos em polímero ou gasocrómicas e passivas as janelas com películas fotocrómicas e termocrómicas.

Apesar dessas , terem surgido há algumas décadas, hoje em dia, apesar de alguns tipos de janelas inteligentes já terem sido implementadas no setor automóvel e dos edifícios, ainda existe a necessidade de evoluir em termos tecnológicos de forma a melhorar algumas propriedades óticas, uma vez que o principal objetivo é garantir uma baixa emissividade, uma modulação solar considerável, diminuir os ganhos solares, uma boa transmitância para a radiação visível, baixo tempo de comutação entre outras.

1.1. Objetivos

Pela implementação de dois tipos de películas, uma película inteligente do tipo PDLC e uma película reflexiva com proteção solar em 50% da área total de vidro dos gabinetes, pretende-se entender o seu impacto em termos de conforto térmico e conforto visual no ambiente interior. Para o efeito, o estudo foi realizado em três gabinetes localizados no bloco E do IST-Taguspark. Um gabinete terá implementado a película inteligente que possibilita dois valores de transmitância pela aplicação de um campo elétrico, no outro a película reflexiva com proteção solar, cuja transmitância é fixa e por fim existirá um gabinete denominado como gabinete de referência, sem qualquer película implementada que representa as condições atualmente existentes.

De forma a entender o impacto nas películas no conforto térmico a temperatura e a humidade relativa foram monitorizadas nos três gabinetes. Para o efeito foram consideradas duas situações. Na primeira foram monitorizadas estas variáveis interiores para os gabinetes com a película inteligente no modo opaco e com a película reflexiva e no gabinete de referência por fim a entender o impacto da utilização das películas e a sua atenuação na temperatura interior. Na segunda situação o mesmo objetivo foi pretendido, contudo para a película inteligente no modo transparente.

Além do impacto das películas no conforto térmico, foram também retirados valores de iluminância para duas situações em duas zonas criadas, na zona J junto à periferia da janela e na zona T considerada a zona de trabalho dos gabinetes, nomeadamente para radiação essencialmente direta e essencialmente difusa. Estas duas situações permitiram entender o impacto das películas no conforto visual, assim como compará-lo com o gabinete de referência.

1.2. Estrutura

No primeiro capítulo será feita uma abordagem da relação que existe entre a quantidade de dióxido de carbono presente na atmosfera e o setor dos edifícios e, portanto, a necessidade de atuar neste setor, assim como a importância do conforto térmico e visual dos ocupantes.

São vários os tipos de tecnologia que visam a gestão de energia. Neste caso em concreto, tecnologia que possa ser aplicada em envidraçados, denominando-se por janelas inteligentes ou películas adesivas. Assim serão apresentados vários tipos de dispositivos que existem e qual o seu funcionamento, assim como as suas principais características e de que forma podem contribuir para diminuir a necessidade de aquecimento e de arrefecimento dos edifícios, como também garantir condições de conforto e possibilidade de controlar a entrada de radiação.

O terceiro capítulo é referente ao caso de estudo, o qual será realizado em 3 gabinetes, sendo que um deles será considerado como gabinete de referência para comparações de resultados, o qual não terá qualquer película implementada, no segundo num implementada uma película reflexiva e no terceiro gabinete uma película inteligente do tipo PDLC. Para tal ter-se-á em consideração o coeficiente de transmissão térmica, a inércia térmica, a taxa de renovação de ar dos gabinetes, assim como a metodologia adotada para a análise experimental do caso de estudo, as especificações das películas utilizadas e os equipamentos de medição utilizados.

Ainda no capítulo supracitado serão descritas as 4 primeiras situações que servirão de análise para o conforto térmico e por último a 5ª, 6ª e a 7ª situação que terão como objetivo analisar o impacto das películas no conforto visual.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos no caso de estudo e a respetiva análise e discussão dos resultados experimentais.

Por último no quinto e sexto capítulo serão apresentadas as conclusões e anotados futuros trabalhos respetivamente.

2. Estado de Arte

2.1. Importância da Eficiência Energética em Edifícios

Em Portugal os edifícios são responsáveis por 30% do consumo final de energia. Ainda que, todos os edifícios não estejam abrangidos pela certificação energética é importante tomar medidas que promovam a eficiência. Para além do usufruto de uma fatura energética mais baixa, uma simples alteração, por exemplo neste caso em concreto, no tipo de envidraçado utilizado ou até mesmo com a implementação de energias renováveis, contribui para todas as problemáticas ambientais assim como, para o decréscimo da energia consumida nos edifícios.

Tanto a envolvente como a própria construção afeta o conforto e conseqüentemente a produtividade dos ocupantes. Dessa forma, em fase de projeto, devem ser considerados vários aspetos, pois poderão ter um impacto significativo nas condições de conforto e conseqüentemente contribuir para gastos energéticos desnecessários.

O tipo de material de toda a envolvente é de extrema importância pelo facto de contribuir, no caso de um mau dimensionamento, com perdas ou ganhos de energia inevitáveis. Aleando vários aspetos, como o tipo de janelas, sombreamento e orientação, para que não tenham um ganho excessivo de calor é possível promover a eficiência energética.

2.1.1. Legislação existente

O Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), regido pelo Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de agosto, que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios. Estão sujeitos ao SCE todos os novos edifícios, assim como edifícios sujeitos a grandes alterações.

Quanto à térmica dos edifícios, em Portugal existe um Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 40/90, de 6 de fevereiro que após algumas alterações, por ser pouco exigente, relativamente aos seus objetivos concretos devido às questões de viabilidade económica face a potenciais consumos baixos, hoje em dia, o RCCTE impõe requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações, por fim a melhorar o comportamento térmico dos edifícios estando este, sujeito a atualizações consoante as exigências de contexto social, económico e energético.

2.2. Conforto térmico e conforto visual

Para que haja um bom desempenho nas funções desempenhadas pelo ocupante de um espaço é extremamente importante o conforto térmico como o conforto visual.

2.2.1. Conforto Térmico

De acordo com a norma ASHRAE 55, o conforto térmico é definido como o “estado mental que expressa satisfação com o ambiente térmico envolvente”, sendo por isso bastante importante entender quais as variáveis que influenciam as condições interiores de um espaço consoante a função do ocupante.

São vários os fatores que influenciam o conforto térmico do utilizador num determinado local, este fundamental para que haja sensação de bem-estar e de produtividade. O conforto térmico depende essencialmente da humidade e da temperatura interior, estas as variáveis que serão analisadas, mas depende também da taxa metabólica, do nível de roupa, da velocidade do ar e da temperatura média radiante.

Para que seja possível a análise do conforto térmico do utilizador recorreu-se ao modelo ASHRAE STANDART 55-2017, o qual permite entender qual a necessidade de aquecimento e de arrefecimento do espaço. Para o efeito considerou-se que no gabinete o ar é “quieto”, onde a velocidade é 0,01 m/s, a taxa metabólica é 1,0 met (Leitura e utilizador sentado), a temperatura média radiante é 25 °C e o nível de roupa no interior tem um valor típico de 1,0 clo no inverno e um valor de nível de roupa para o interior de verão de 0,5 clo. Para o efeito na figura 1 encontram-se presentes as zonas de conforto para a estação de verão e inverno.

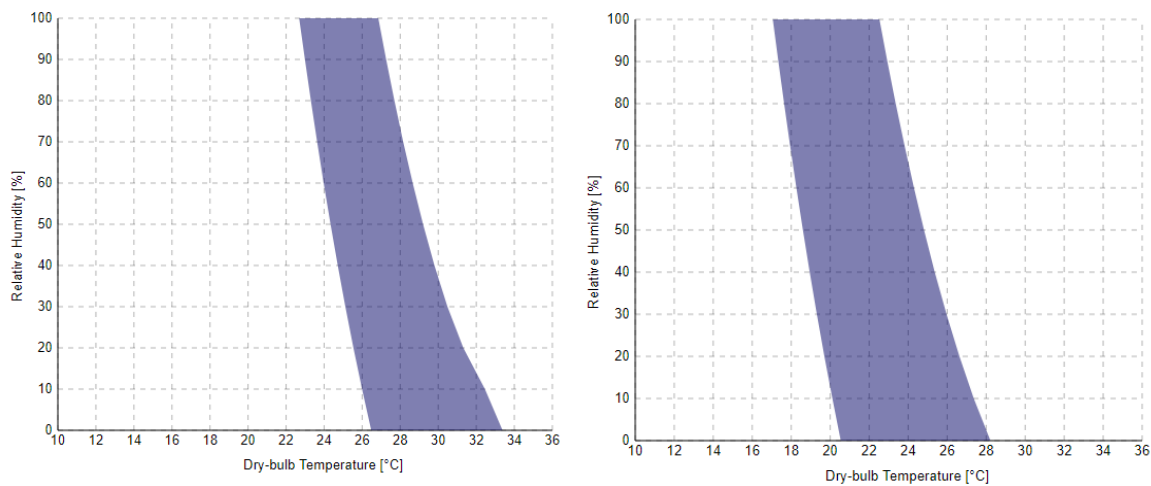


Figura 1- ASHRAE STANDART 55-2017- Zonas de Conforto térmico verão (à esquerda) e inverno (à direita) (CBE Thermal Comfort Tool, 2018)

2.2.2. Conforto Visual

O conforto visual no local de trabalho é um fator crucial, pois influencia diretamente a segurança e o bem-estar do trabalhador. Uma iluminação adequada possibilita a criação de um ambiente visual que permite que as pessoas vejam, se movam com segurança, realizem tarefas de forma eficiente, precisa, segura, sem causar fadiga visual e desconforto (ISO 8995, 2002). A fadiga visual pode causar dores de cabeça, nos olhos, irritabilidade nos olhos, olhos secos ou lacrimejantes, visão embaçada ou dupla, aumento da sensibilidade à luz e dificuldade de concentração.

A iluminação de um espaço pode ser realizada de forma natural e/ou artificial, isto é, através da entrada de luz por meio de vãos envidraçados, esta é uma opção mais económica, ou por uma fonte de iluminação elétrica. Porém, é extremamente importante tanto a quantidade como a qualidade de luz no espaço, sendo necessária especial atenção à iluminância do espaço, devendo esta ser de acordo com a função desempenhada no espaço como veremos mais adiante, como o desconforto causado pelo excesso de brilho.

Assim, por forma a promover o conforto visual é importante a distribuição de luminância, a iluminância, o brilho, a luz direcional, a luz natural, entre outras.

Luminância (L) é uma medida de densidade de luz refletida numa direção e caracteriza-se por descrever a quantidade de luz atravessada ou emitida de uma superfície, segundo um ângulo sólido ($\partial\Omega$), sendo a sua unidade SI [cd/m^2].

$$L = \frac{I}{A \cos\theta} [cd/m^2] \quad (1)$$

I: Intensidade luminosa

A cosθ: Área que a reflete segundo uma determinada direção θ

Iluminância (E) segundo norma EN 12665, é o quociente entre o fluxo luminoso ($\partial\Phi$) incidente num elemento de superfície a área (∂A) desse elemento, ou seja, é a quantidade de fluxo luminoso recebido pela unidade de área iluminada, sendo a sua unidade SI [lx].

$$E = \frac{\partial\Phi}{\partial A} [lx] \quad (2)$$

Para que haja conforto visual do indivíduo a iluminação deve ser adequada à tarefa a desempenhar no local, sendo bastante importante a quantidade e a qualidade da iluminação (Pais, 2011). Desse modo, existem determinadas normas que permitem entender a iluminância recomendável a cada tipo de atividade, nomeadamente a norma DIN 5035: 1990, ISO 8995 (2002) e EN 12464.

A norma DIN 5035:1990 descreve os níveis de iluminância consoante o tipo de atividade (Tabela 1)

Tabela 1 - Norma DIN 5035: 1990- Níveis de iluminância de acordo com o tipo de atividade

Iluminância [lx]	Tarefa
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

Por outro lado, a norma ISO 8995 (2002), faz referência aos vários níveis de iluminância nos locais de trabalho de acordo com os tipos de tarefas. Na tabela 2 são apresentados os valores de iluminância média para tarefas de escritório.

Tabela 2-Norma 8995 (2002) - Iluminância média (Em) em escritório de acordo com o tipo de tarefa

Tarefas de escritório	Em da tarefa [lx]
Arquivo, fotocópias, circulação, etc	300
Escrita, leitura e processamento de dados	500
Desenho Técnico	750
Unidade de CAD	500
Salas de conferência	500
Recepção	300

Por fim, a norma 12464 tem como principal foco estabelecer valores de iluminância média para espaços circundantes aos locais de trabalho (tabela 3), sendo que, os valores de iluminância média dos locais de trabalho são de acordo com as normas anteriormente apresentadas.

Entende-se por local de trabalho a área parcial ou total onde são realizadas as tarefas visuais e a área circundante a área em redor da área de trabalho dentro do campo de visual.

Tabela 3 - Norma 12464 Em na área circundante de acordo com a Em no local de trabalho

Em [lx] no local de trabalho	Em [lx] na área circundante
>750	500
500	300
300	200
≤ 200	Iluminância do local de trabalho

➤ **Uniformidade da iluminância**

De acordo com a norma ISO 8995 (2002), a área onde é desempenhada a tarefa deve estar iluminada o mais uniformemente possível. A uniformidade da iluminância, definida como a relação entre os valores mínimo e médio de iluminância (Eq.3), não deve ser inferior a 0,7 na zona onde a tarefa é realizada, assim como não deve ser inferior a 0,5 na zona circundante.

$$\text{Uniformidade da iluminância} = E_{min} / E_m \quad (3)$$

➤ **Encandeamento**

O encandeamento é a sensação visual gerada por excesso de luz no campo de visão, causando desconforto, condicionando o nível de adaptação dos olhos, afetando a visibilidade da tarefa (Pais, 2011). Esta sensação é causada pela reflexão da luz em determinadas superfícies, sendo que no interior dos locais de trabalho a luz poderá ser tanto proveniente de lâmpadas, assim como a luz solar diretamente do exterior de janelas (ISO 8995, 2002).

2.3. Impacto das janelas no consumo de energia

Como já referido, por forma a manter as condições interiores e garantir o conforto térmico, os edifícios são consideravelmente um setor de grande impacto no consumo de energia, onde a necessidade de aquecimento e arrefecimento constitui cerca de um terço do consumo dos edifícios (International Energy Agency (IEA), 2013) e globalmente as janelas são consideradas como o componente de construção com menor eficiência (Baetens et al., 2010).

Com o impacto deste componente de construção no consumo de energia, existem várias tecnologias, materiais e revestimentos que permitem através das suas propriedades aumentar a eficiência térmica do espaço.

Com o intuito de entender de que forma é que esse impacto pode ser atenuado, serão abordados alguns conceitos teóricos no que toca à transferência de calor através dos vãos envidraçados, este elemento de principal abordagem no decorrer desta dissertação, assim como, quais as propriedades que acabam por sofrer alterações de modo a minimizar todo o impacto deste elemento no consumo de energia.

2.3.1. Fenómenos de transferência de calor que ocorrem nos vãos envidraçados

A fachada de um edifício em contacto com o exterior é considerada o elemento de ligação entre o ambiente exterior e interior. Por sua vez, em fase de projeto é importante a escolha ponderada de materiais para a sua construção devido à ocorrência de fenómenos de transferência de calor que entre os dois ambientes, dado que, a temperatura interior deve possibilitar o conforto térmico dos ocupantes, assim como, ser atingida de forma eficiente.

Os vãos envidraçados são um elemento de maior impacto no edifício (Rezaei et al., 2017) entre os dois meios pelo que, os fenómenos de transferência de calor apresentados seguidamente irão essencialmente incidir para efeitos de esclarecimento neste elemento.

Os três fenómenos de transferência de calor que poderão ocorrer são: condução, convecção e radiação, sendo que, no envidraçado (figura 2) ocorre o mecanismo de condução através do vidro e do caixilho, de radiação através das superfícies do vidro e convecção no caso de vidro duplo, na camada de ar existente entre este, assim como entre os ambientes exterior e interior ao envidraçado.

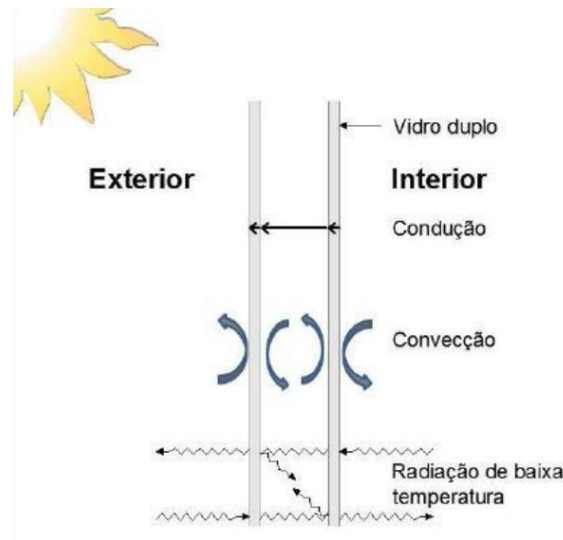


Figura 2- Mecanismos de transferência de calor que ocorrem nos vãos envidraçados

Fonte: (Figueiredo, 2014)

2.3.2. Desempenho térmico e ótico do vidro

Sendo as janelas um componente de grande impacto no que toca ao consumo de energia, assim como em termos de conforto tanto térmico como visual, é fulcral, se possível, ainda em fase de projeto ou para questões de melhoria da classe energética do edifício, considerar as propriedades térmicas e óticas do vidro, para que as perdas ou os ganhos de energia através deste elemento sejam minimizados.

Quando a radiação solar atinge o envidraçado, a radiação pode ser transmitida, absorvida ou refletida, dependendo das características óticas, assim como dependendo do seu comprimento de onda, a radiação é visível ou invisível (Rezaei et al., 2017). Os comprimentos de onda que caracterizam a radiação UV, visível e infravermelha correspondem, respetivamente aos seguintes intervalos: 300-400 nm, 400-700 nm e 700-2500 nm. A radiação UV, altamente energética tem impactos negativos quer na saúde humana, quer na durabilidade do vidro e nos materiais no interior dos edifícios, assim como a radiação infravermelha contribui bastante para o aquecimento do espaço interior.

Para analisar o desempenho de envidraçado são importantes vários fatores como o coeficiente de transferência de calor (U), a transmitância visível (T_v), o coeficiente de calor de ganho solar (SGHC) e emissividade (ε) (Rezaei et al., 2017) e o coeficiente de transmissão luminosa (R_v).

➤ Fator solar g ou coeficiente de ganho de calor solar (SHGC)

Quando a irradiação solar (I) atinge a superfície do vidro, uma fração é transmitida diretamente para o interior (T), outra refletida para o exterior (R) e outra absorvida para o interior do próprio vidro (A). Por sua vez, devido a fenómenos de convecção e radiação existe ainda uma quantidade de energia solar que é absorvida para o ambiente interior (A_i) e exterior (A_e) (Faustino, 2012), como é possível verificar na figura 3 abaixo apresentada.

Contudo, é importante entender a quantidade de energia solar que é transmitida para o interior através do vidro, contribuindo para os denominados ganhos solares.

Surge assim, o conceito fator solar, que pode variar entre 0-1 e indica essa quantidade de energia solar transmitida para o interior, quer transmitida diretamente e absorvida para o interior, tendo em consideração toda a radiação solar incidente, pelo que quanto menor for o valor de g, melhor será a sua proteção contra o aquecimento.

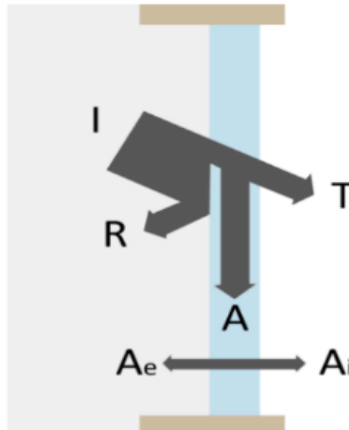


Figura 3- Decomposição da radiação incidente no envidraçado

Fonte: (Figueiredo, 2014)

$$g_{\perp} = \frac{\text{Ganho de calor através do vidro}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{T + A_i}{I} \quad (4)$$

Normalmente o valor do fator solar de um vidro deve ser dado pelo fabricante para uma incidência solar normal à superfície, porém quando essa informação não se encontra disponível poder-se-á recorrer à tabela 12 do Despacho n.º 15793-K/2013.

O fator solar para outras configurações para vidro duplo e com proteção solar pode ser calculado através pela expressão (5) da norma EN 410, porém apenas se encontram tabelados valores de $g\tau_{vc}$ para dispositivos de sombreamento mais comuns, como estores, lonas e persianas.

$$g_{\perp} = g_{\perp,vi} \cdot \prod_i \frac{g\tau_{vc}}{0,75} \quad (5)$$

➤ **Coefficiente de reflexão luminosa frontal**

O coeficiente de reflexão luminosa expressa a capacidade de um vidro se comportar como um espelho, ou seja, quantifica a radiação visível refletida novamente para o exterior, pelo que quanto mais elevado o Rv, ocorre refletância para o exterior do edifício, apesar de a visão interior- exterior se manter durante o horário diurno.(Faustino, 2012)

➤ Transmitância visível

A transmitância visível consiste na fração de luz incidente com um comprimento de onda específico (400-700 nm) que atravessa uma determinada matéria.

➤ Coeficiente de transmissão de calor do vão envidraçado

Segundo a norma ISO 10077-1 tem-se por coeficiente de transmissão térmica da janela U_w

$$U_w = \frac{A_f U_f + A_g U_g + L_g \psi_g}{A_f A_g} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6)$$

Onde:

U_w – Coeficiente de transmissão térmica da janela [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$];

U_f – Coeficiente de transmissão térmica do caixilho [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$];

U_g – Coeficiente de transmissão térmica do vidro [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$];

L_g – Perímetro de ligação entre o caixilho e o vidro;

A_g – área do vidro m^2 ;

A_f – área do caixilho m^2 ;

ψ_g – Coeficiente de transmissão térmica linear relativo à ligação entre o caixilho e o vidro (tabelado) [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$].

2.4. Tipos de materiais, tecnologias e revestimentos

Em substituição dos vidros simples, começaram a ser utilizados na construção vidros duplos. Estes, possuem entre os dois vidros um espaço hermeticamente preenchido de ar desidratado, garantindo um melhor isolamento acústico e térmico. Com a utilização desta alternativa consegue-se uma diminuição das trocas de calor entre o ambiente interior e exterior e conseqüentemente uma diminuição nos gastos energéticos. Ainda assim, a tecnologia evolui em busca de alternativas mais eficientes que visam a sustentabilidade e que cada vez mais dispensam o uso de alternativas convencionais, neste caso em concreto, visa diminuir a dependência de aquecimento e arrefecimento, controlando essencialmente a entrada de radiação, garantindo um mínimo de coeficiente de transmissão de calor como é possível observar na figura 4, para que sejam minimizadas as perdas.

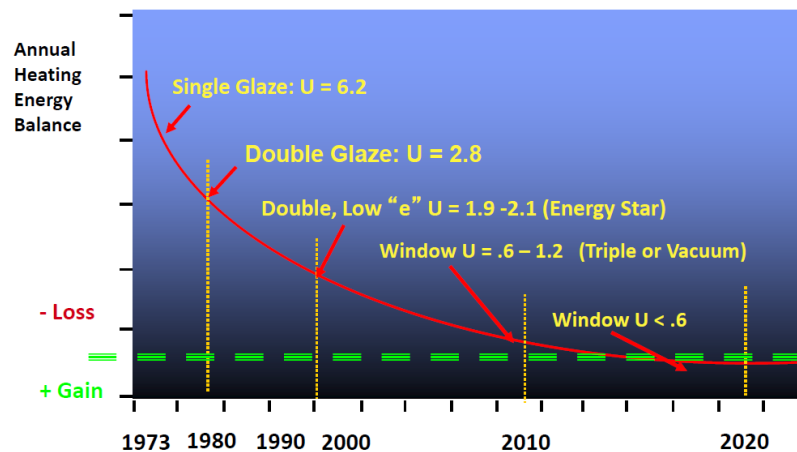


Figura 4 - Evolução do coeficiente de transmissão de calor nas janelas

Fonte: (U.S Department of Energy: *Energy Efficiency Renewable Energy*, 2017)

Obviamente que o conceito janela ideal difere consoante o clima, assim como consoante a localização a janela deve ter propriedades específicas, no entanto, o valor ideal comum de coeficiente de transferência de calor é zero, apesar desse valor na prática ser impossível (Rezaei et al., 2017), a tecnologia evolui nesse sentido.

Dessa forma, existem tecnologias que permitem o controlo solar nos envidraçados como vidros com propriedades que permitem a geração de energia elétrica, vidros com vários tipos de revestimentos ou materiais e janelas inteligentes. Estas últimas por serem o principal foco do projeto serão abordadas com mais pormenor no capítulo seguinte.

2.5. Janelas inteligentes

Em alternativa aos conhecidos vidros convencionais, onde a transmitância é fixa, surge o conceito de janelas inteligentes (*smart windows*), que podem resultar em 30% da diminuição do consumo de energia (Carl M Lampert, 1998). As janelas inteligentes têm propriedades óticas dinâmicas conferindo inteligência à envolvente do edifício (Zawidzki, 2015), permitem a passagem do vidro de um elemento fixo para um elemento dinâmico (Carl M Lampert, 1998) e são usadas em edifícios e no setor automóvel por forma a controlar a radiação incidente e o brilho de acordo com o conforto do ocupante (Cupelli et al., 2009), assim como a transmitância (C M Lampert, 2003).

Este tipo de tecnologia altera as suas propriedades como o fator solar (g (%)) e a transmissão de radiação no espectro solar, como resposta a uma tensão ou condições ambientais (Baetens et al., 2010), cujo principal objetivo é reduzir respetivamente a quantidade de energia solar no interior do edifício, e regular a quantidade de luz visível que atravessa o vidro.

São dessa forma, dispensados os vários dispositivos utilizados até há relativamente pouco tempo, como persianas, palas, estores, que acabavam por criar uma barreira, no sentido que a vista para o exterior era bloqueada. Para além disso, neste tipo de alternativa é possível alterar as propriedades com um simples comando ou pelas condições ambientais, como será apresentado seguidamente.

A utilização destas janelas pode diminuir drasticamente o consumo de energia nos edifícios, reduzindo as cargas de aquecimento e de arrefecimento, assim como a necessidade de iluminação elétrica (Baetens et al., 2010), que contribuem para questões relacionadas com gestão de energia (Carl M Lampert, 1998). A preparação deste tipo de tecnologia requer equipamento especial, controlo rigoroso e interfaces de multicamada. É, portanto, necessária eficácia no fabrico, determinadas características como a durabilidade da transparência durante a comutação, uma rápida resposta, autolimpeza e antirreflexo (Lee, Lee, Lim, Lee, & Lee, 2010).

Existem várias tecnologias para este tipo de janelas como dispositivos, fotocromáticos, termocromáticos, electrocromáticos, de cristais líquidos dispersos em polímero (PDLC) e partículas suspensas (SPD) e gasocromáticos. No esquema representado na figura 5 é possível compreender como estes dispositivos se classificam consoante as suas características classificando-se como ativos ou passivos.

Apesar de terem surgido há algumas décadas, com um progresso vagaroso, hoje em dia estão disponíveis no mercado algumas destas tecnologias (Zawidzki, 2015).

O principal objetivo é desenvolver dispositivos com um ciclo de vida estável, no entanto é importante também garantir o baixo custo e uma elevada qualidade ótica.

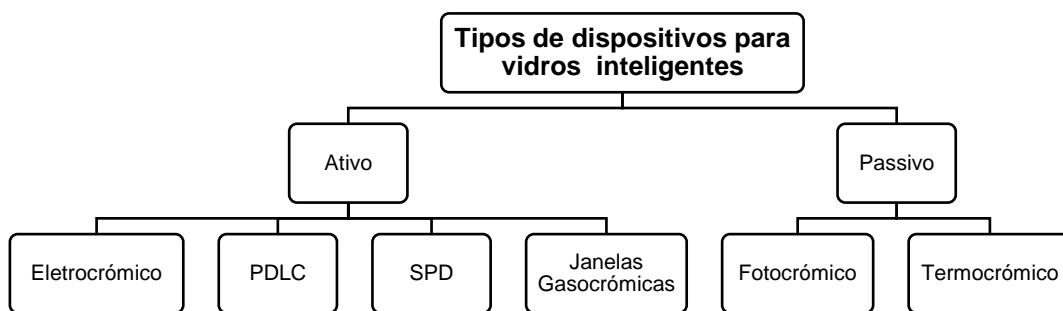


Figura 5- Tipos de dispositivos para vidros inteligentes, ativos e passivos

2.5.1. Condutores transparentes

Os condutores transparentes são importantes para todos os dispositivos ativados eletricamente, devido à sua alta qualidade e custos. Existe necessidade de serem o mais transparentes possível, para que haja possibilidade de regular ao máximo as janelas inteligentes. É necessária uma condutividade eletrónica elevada para que possibilite uma queda de tensão baixa na superfície do condutor. Os cristais líquidos e partículas eletroforéticas ou dispersas (SPD) precisam de uma menor resistividade para grandes áreas do que electrocromáticos (Baetens et al., 2010).

O condutor transparente mais usual em pequenos dispositivos é o $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$ (ITO), no entanto será substituído por outros condutores dopados como $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO), $\text{ZnO}:\text{Al}$ ou $\text{ZnO}:\text{Ga}$.

2.5.2. Dispositivos ativos

São considerados dispositivos ativos todos os dispositivos de janelas inteligentes que possibilitam uma comutação externa. É importante a modulação de transmitância visível e todo o espectro solar. O

intervalo de modulação é normalmente expresso para um único comprimento de onda na literatura, acabando por não fornecer informação suficiente para o desempenho das janelas. (Baetens et al., 2010)

A amplitude do tempo de comutação varia consoante o tamanho de dispositivo, ou seja, os dispositivos grandes tendem a ter longos tempos de comutação, sendo que, tem bastante importância o tamanho de janela alcançado, o consumo de energia total, a tensão de operação e o intervalo de temperaturas de operação (Baetens et al., 2010). No anexo I, encontram-se várias especificações deste tipo de dispositivos, comercializados para implementação em edifícios.

I. Dispositivo Electrocrómico

Os materiais electrocrómicos para vidros foram propostos em 1984 por Lambert, Svenson e Granqvist. É a tecnologia mais utilizada para dispositivos comutados e tem sido bastante desenvolvida para janelas de edifícios e espelhos no setor automóvel (C M Lampert, 2003); (Carl M Lampert, 1998).

O electrocromismo é uma propriedade do dispositivo para alterar as suas propriedades óticas reversíveis quando é aplicado um potencial externo, associado a processos de inserção e extração de iões e eletrões. Bastante promissores para reduzir custos de arrefecimento, aquecimento e eletricidade nos edifícios (Baetens et al., 2010), os dispositivos electrocrómicos podem ser orgânicos ou inorgânicos.

Os materiais orgânicos são moléculas que podem alterar a sua cor durante processos de oxidação-redução ou polímeros condutores entre outros, enquanto que os inorgânicos são constituídos por óxidos metálicos, frequentemente baseados em W e Ni (Rezaei et al., 2017).

O centro do dispositivo consiste num eletrólito transparente, que tanto pode ser uma camada de polímero como um filme fino de óxido, no estado líquido, sólido ou gel (Rezaei et al., 2017) o qual junta dois filmes finos electrocrómicos usualmente de óxido de tungsténio WO_3 e níquel desordenados. Estas três camadas são colocadas entre condutores elétricos transparentes como ITO, $SnO_2:F$ ou $ZnO:Al$, como se pode verificar na figura 6.

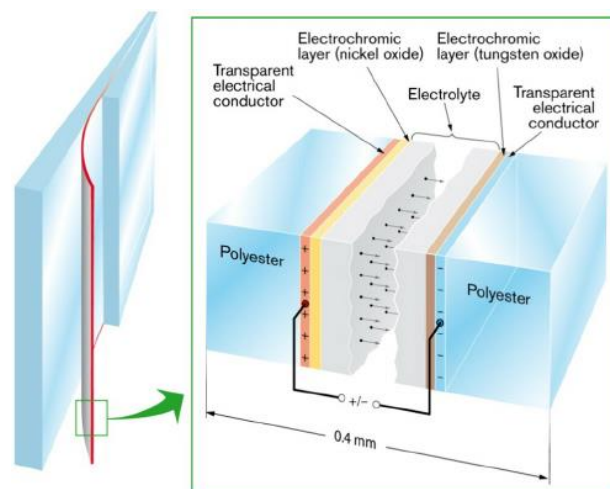


Figura 6- Dispositivo electrocrómico

Fonte: (Wen, Arvizu, Niklasson, & Granqvist, 2015)

Apesar de existirem várias possibilidades electrocrómicas, os dispositivos electrocrómicos utilizados em janelas inteligentes, são normalmente baseados em tungsténio (W) e níquel (Ni) e possibilitam alterar a transmitância até 68% (Baetens et al., 2010) de energia solar e luz visível pela aplicação de tensão (Granqvist, 2015);(Wen et al., 2015). Quando aplicada uma tensão, normalmente 2 volt, ocorre uma troca de iões e electrões em equilíbrio de carga entre as películas de W e Ni (Wen et al., 2015). O número de ciclos para electrocrómicos baseados em WO_3 são na ordem dos 10^3 - 10^4 (Baetens et al., 2010).

Os materiais electrocrómicos podem alterar as suas propriedades devido à ação do campo eléctrico, assim como podem voltar ao seu estado inicial aplicando um campo inverso. São possíveis vários tipos de iões de coloração, como Li^+ , H^+ , Na^+ e Ag^+ , dependendo disso do tipo de material electrocrómico utilizado (C M Lampert, 2003).

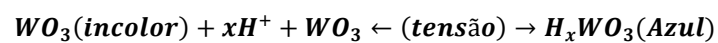


Figura 7- Janelas electrocrómicas at Chabot College, Califórnia

Fonte: (International Energy Agency (IEA), 2013)

Quando a carga reside do lado do óxido de W, ambos os filmes se encontram escuros, como se pode verificar à direita na figura 7. Por outro lado, quando a carga se encontra do lado do óxido de níquel os filmes ficam branqueados (Wen et al., 2015). Pelo anteriormente descrito verifica-se que é possível variar a transmitância consoante a localização da carga, sendo importante que os iões no eletrólito sejam pequenos para que o transporte de carga ocorra o mais rapidamente possível e consequentemente haja uma rápida alteração das propriedades óticas.

Os materiais electrocrómicos são vantajosos, pois apenas necessitam de potência durante a comutação, requerem baixa tensão (1-5V) e permitem um escurecimento contínuo. Tipicamente têm transmissão visível de 0,65-0,50 e transmitância totalmente colorida de 0,25-0,10 (Carl M Lampert, 1998).

A modelação computacional relativamente à eficiência energética das janelas electrocrómicas em edifícios, verifica que, proporcionam um melhoramento energético comparativamente às janelas de vidros duplos (Carl M Lampert, 1998). Com a utilização de vidros electrocrómicos, projetos piloto demonstraram economias de iluminação até 60%, redução da carga de refrigeração até 20% e redução do pico de energia de 26% (International Energy Agency (IEA), 2013).

Uma desvantagem dos dispositivos electrocrómicos comuns tem a ver com o facto de no momento de ativação de tensão a transmitância de radiação visível e perto da radiação infravermelha (NIR) alterar. Dessa forma é importante desenvolver camadas electrocrómicas onde a radiação NIR possa ser alterada sem comprometer a radiação visível (Rezaei et al., 2017).

Atualmente, este é o tipo de tecnologia mais avançada, pelo que a sua implementação está a ser feita em edifícios inovadores. Para além de ser energeticamente eficiente, permite o conforto no espaço interior e benefícios económicos (Granqvist, 2016).

Segundo um estudo desenvolvido por (DeForest et al., 2015), onde a NIR em materiais electrocrómicos é modulada sem afetar a radiação visível e posteriormente material é aplicado em 18% nas janelas do edifício possibilitou uma diminuição de 50% do consumo total de energia.

II. Cristais líquidos dispersos em polímero (PDLC)

Devido ao seu potencial de aplicação em dispositivos óticos como é o caso das janelas inteligentes este tipo de material tem sido alvo de estudos. Este filme consiste em cristais líquidos com baixo peso molecular em forma de gotas de tamanho na ordem dos micrómetros dispersos numa matriz de polímero (Sahraoui, Delenclos, Longuemart, & Dadarlat, 2011).

Compreendidos entre dois condutores transparentes, os cristais líquidos dispersos em polímero, alteram as suas propriedades de transmissão óticas quando é imposta uma tensão, possibilitando um rearranjo da direção de cristais líquidos, normalmente cristais líquidos nemáticos, que permite alterar a sua transmitância (figura 8) (Cupelli et al., 2009); (Murray, Ma, & Munday, 2016).

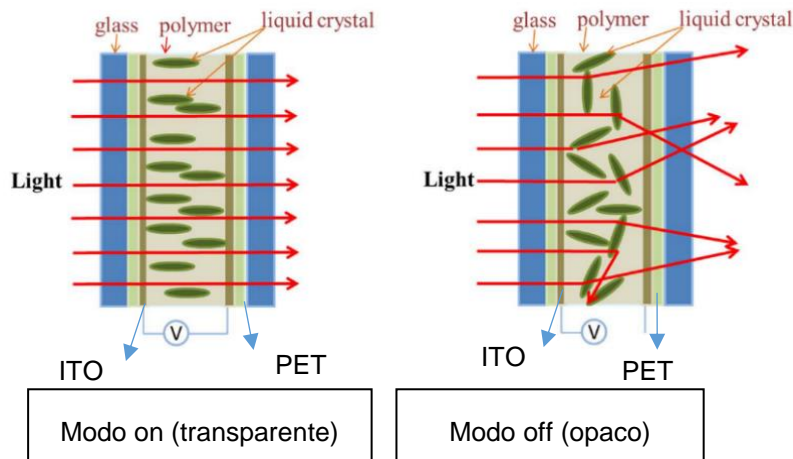


Figura 8- Princípio de funcionamento do PDLC

Fonte: Adaptado de (Ghosh & Mallick, 2018)

Desse modo, este dispositivo permite dois modos de funcionamento, ou seja, no estado inicial sem qualquer tensão aplicada (modo opaco), os cristais encontram-se desorientados e a luz é dispersa em múltiplas direções pela não combinação do índice refrativo das gotas e da matriz. Quando é imposto um campo elétrico, as moléculas orientam-se no interior dos cristais e caso o seu índice refrativo e do polímero combinem, permite a passagem de luz pela sua transparência (Sahraoui et al., 2011). Devido

à rápida resposta dos cristais líquidos, a passagem do modo transparente para opaco verifica-se em 1/10 segundos.

“A dispersão dos cristais no interior da matriz é alcançada por processos de separação de fases provocados por polimerização, evaporação do solvente ou uma têmpera térmica, dependente dos materiais utilizados (Sahraoui et al., 2011)” e a reorientação do campo elétrico depende de vários parâmetros como o tamanho e a forma das gotas dos cristais líquidos, como a fronteira do polímero, o seu peso e a sua natureza química. Segundo investigação realizada, a condutividade elétrica nos cristais líquidos dispersos em polímero é fortemente afetada pela resposta eletro-óptica, no entanto pode ser ajustada adicionando pequenas quantidade de moléculas com condutividade no polímero (Cupelli et al., 2009).

Embora este tipo de janela inteligente possibilite espalhar a radiação incidente, normalmente não permitem um bloqueio significativo de modo a reduzir o fator solar geralmente na ordem dos 0,69 e 0,55 (Casini, 2015)

Contrariamente aos dispositivos electrocrómicos este dispositivo, para um correto funcionamento necessita de a aplicação de um campo elétrico constante (Casini, 2015), para o seu funcionamento no modo transparente, o que acarreta custos adicionais de energia, pelo que o seu modo de funcionamento oposto poderá ser preferível e mais eficiente. Além disso, segundo a literatura por questões de segurança, é preferível o modo de operação oposto em edifícios e aplicações automóveis (Cupelli et al., 2009).

Contudo, vários estudos estão a ser desenvolvidos para contornar esta necessidade de forma eficiente. Um dos estudos que visa contornar este inconveniente é a utilização do PDLC com uma película fina absorvedora de a-Si (Murray et al., 2016).



Figura 9- Modos de funcionamento PDLC: modo transparente e modo opaco respetivamente

Fonte: (Rezaei et al., 2017)

As janelas inteligentes que utilizam este tipo de dispositivo (figura 9) podem ser utilizadas para uma opacidade dinâmica para a privacidade, redução de brilho e redução de custos associados à climatização do espaço interior.

À primeira vista não se trata de uma tecnologia económica, devido ao seu valor no mercado rondar os 558\$/m², contudo é importante tanto desenvolver tecnologias inovadoras que possibilitem diminuir a

dependência energética, assim como testar os benefícios da sua implementação, como verificar quais as suas vantagens a longo prazo e a sua viabilidade.

III. Dispositivo de partículas suspensas (SPD)

Os dispositivos de partículas suspensas são uma patente tecnológica desenvolvida por *Research Frontiers Inc.* Este tipo de dispositivo consiste em 3-5 camadas das quais as camadas ativas absorvem o dipolo em forma de agulha ou partículas esféricas, normalmente poli-halogeneto, suspensas num fluido orgânico ou gel entre os dois condutores transparentes, usualmente ITO (C M Lampert, 2003);(Lemarchand, Doran, & Norton, 2014).

No modo *off*, quando não é aplicada qualquer tensão, as partículas encontram-se aleatoriamente posicionadas e absorvem a luz, diminuindo a quantidade de luz transmitida. No entanto, pela aplicação de um campo elétrico as partículas alinham-se aumentando a transmitância (C M Lampert, 2003), como se pode verificar na figura 10.

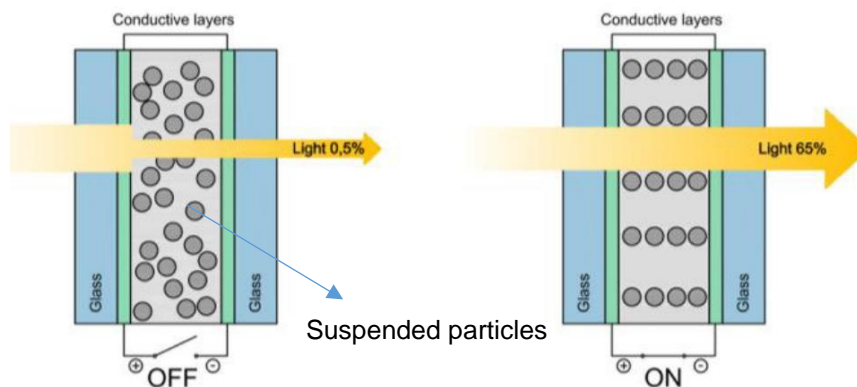


Figura 10- Modo de funcionamento de dispositivos de partículas suspensas

Fonte: Adaptado de (Casini, 2015)

Tipicamente a transmissão é de 20-60%, 10-50% e 0,1-10% e depende do tipo e densidade de partículas absorvente e a espessura da película (Lemarchand et al., 2014).

Este tipo de dispositivos tem um rápido tempo de comutação, na ordem dos 100 e 200 ms, e a tensão de operação em corrente alternada (AC) corresponde a 100 V, no entanto, segundo a bibliografia, com pesquisas é possível que seja diminuída até aos 35 V. Para além disso permite um controlo significativa transmissão de luz visível, no entanto um controlo razoável da radiação infravermelha (Lemarchand et al., 2014).

Na seguinte figura (figura 11) é possível ver um exemplo da aplicação deste tipo de tecnologia em modo *off* (opaco) e *on* (transparente) (C M Lampert, 2003).



Figura 11- Exemplo de aplicação SPD

Fonte: (C M Lampert, 2003)

Em 2011, o modelo SLK da Mercedes-Benz, foi o primeiro veículo a usar a patente da Research Frontiers Inc. SPD-Smart light-control technology (New, Sky, & Roof, 2011), onde possibilitou a aplicação deste tipo de dispositivo no vidro existente no tejadilho por fim a controlar a entrada de radiação. Este tipo de tecnologia permite ao utilizador pela ação de um botão, bloquear 99.5% a luz visível o que é 50-60 vezes mais escuro que um vidro tipicamente utilizado para o efeito, assim como bloquear 99% da radiação UV e reduzir o calor dentro do veículo.

IV. Janelas gasocrómicas

Neste tipo de janelas, é colocado no interior das camadas de vidro uma camada gasocrómica. Esta última camada anteriormente citada, quando composta no seu interior por gás de hidrogénio diluído em árgon no estado gasoso, permite que haja bloqueio da radiação infravermelha e visível, sendo a sua transparência determinada pelo volume de hidrogénio e a coloração atingida é azul. Contudo, a sua transparência pode ser restabelecida pela inserção de oxigénio no estado gasoso. Assim quando a camada gasocrómica é composta no seu interior por oxigénio e árgon, ambos no estado gasoso, é atingida a transparência da janela, pelo que, toda a radiação visível e infravermelha (IV) é transmitida (Feng et al., 2016).

Tipicamente o material constituinte da camada gasocrómica é o óxido de tungsténio WO_3 , revestida de uma camada fina catalisadora, geralmente platina ou paládio que quebra as moléculas de H_2 em iões de H^+ e normalmente a relação de redução de gás que existe é $4\%H_2/Ar$ gás (Feng et al., 2016).

Obviamente que a capacidade de bloqueio de radiação é superior para radiação IV do que para a radiação visível, como se pode verificar na figura 12, o que possibilita no modo de bloqueio/coloração economizar energia, por bloqueio da radiação IV, não aumentando a luz artificial (Feng et al., 2016).

Note-se que quanto maior a reação de redução H_2/Ar gás, a transmitância relativa à radiação infravermelha decresce substancialmente.

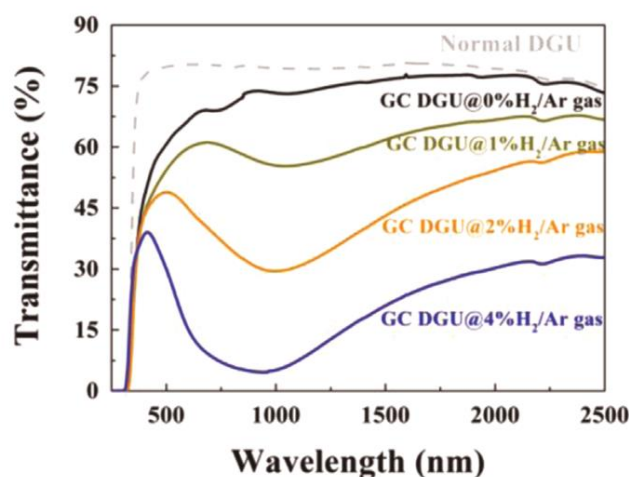


Figura 12 - Transmittância janela gasocrômica

Fonte: (Feng et al., 2016)

Com base em pesquisas sobre um filme altamente ordenado e mesoporoso de WO_3 , a estrutura porosa e a parede de poros cristalinos são bastante importantes em termos de comutação e durabilidade (Feng et al., 2016).

Apesar de algumas limitações, como a limitação do fornecimento de gás e montagem do sistema, a janela inteligente gasocrômica, pode ser adequada para a poupança de energia em larga escala com a vantagem de um baixo custo de fabricação (Feng et al., 2016).

2.5.3. Dispositivos passivos

Existem dois tipos de dispositivos passivos, os dispositivos fotocromáticos e os dispositivos termocrômicos. Contrariamente ao que acontece nos dispositivos ativos, os dispositivos presentes nesta secção respondem à luz e à temperatura, alterando as suas propriedades, pelo que a sua modelação não pode ser diretamente alterada.

I. Dispositivo Fotocrômico

Os materiais fotocromáticos alteram a sua cor quando expostos à luz com determinados comprimentos de onda. Dependendo do tipo de material e mecanismos de coloração o processo reversivo pode ser obtido por diferentes estímulos. É de extrema importância uma rápida comutação, estabilidade fotoquímica e um alto contraste de foto coloração (Wang, Runnerstom, & Milliron, 2016).

Comparativamente aos dispositivos ativos, o dispositivo fotocromático é muito mais simples e de fácil instalação por não necessitar de uma potência externa. Normalmente este tipo de revestimentos que respondem à incidência de luz são constituídos por polímeros ou cerâmicas onde são colocados no seu interior materiais ativos.

Este tipo de tecnologia já se encontra disponível para edifícios e para o setor automóvel, no entanto, comparativamente aos materiais electrocrômicos, não são tão utilizados em janelas inteligentes, devido ao facto de dependerem fortemente da luz e conseqüentemente não poderem ser regulados pelo

utilizador. Apesar disso, é possível o fabrico de filmes fotocromicos/ electrocromicos que permitem contornar esse inconveniente (Wang, Runnerstom, and Milliron 2016).

- **Polímeros e moléculas fotocromicas**

Nos sistemas orgânicos o foto-cromismo é caracterizado por uma transformação foto-induzida entre 2 isómeros químicos que possuem diferentes espectros de absorção. A reorganização das ligações químicas durante a transformação, lida com mudanças estruturais e eletrônicas das moléculas, nomeadamente moléculas como espiropirano e diariletano

Quando a molécula de espiropirano é sujeita a radiação UV, isómera alterando a sua cor de transparente para azul-escuro. Como a sua foto coloração autoinduzida aumenta energeticamente, a sua coloração não é termicamente estável e espontaneamente volta ao estado incolor após a remoção da radiação UV. Por outro lado no caso do diariletano no estado de coloração é termicamente estável, pelo que não é possível a sua coloração quando não existe luz e à temperatura da sala, mas sim quando exposto à luz visível e a altas temperaturas (Wang et al., 2016).

- **Óxidos metálicos**

São alguns os óxidos metálicos que possibilitam o electrocromismo como MoO_3 , WO_3 , Nb_2O_5 , ZnO e TiO_2 , através da transferência de eletrões acoplados a protões, o que conduz à formação de óxidos metálicos reduzidos e coloridos, como por exemplo a cor azul para o óxido de tungsténio reduzido. A coloração ocorre quando os óxidos coloridos são expostos ao ar ou oxidados electroquimicamente (Wang et al., 2016).

Por exemplo os dispositivos electrocromicos utilizam este efeito para armazenar ou regenerar a carga. A combinação de TiO_2 e o electrocromico WO_3 possibilita o fabrico de células foto electrocromicas, ou seja, quando TiO_2 está sob iluminação, os protões absorvidos são convertidos em eletrões e buracos, sendo posteriormente os eletrões injetados no filme electrocromico induzindo a coloração e os buracos oxidados no eletrólito (Wang et al., 2016).

II. Dispositivo Termocromico

Os materiais termocromicos foram propostos para vidros em 1986/1987 por Jorgenson, Lee e Babulanam. Ainda em fase de evolução, este tipo de tecnologia ainda não foi comercializada, mas prevê-se a sua implementação num futuro próximo (Granqvist, 2016).

Este tipo de materiais responde à mudança de temperatura, pelo que as suas propriedades óticas alteram quando sujeitas a tensão ou corrente (Granqvist, 2015). Habitualmente o modo transparente corresponde a temperaturas mais baixas e o modo escuro a temperaturas mais altas (Wang et al., 2016).

A alteração de propriedades óticas do material como resposta à temperatura ocorre à temperatura crítica τ_c . A esta temperatura a condutividade do material sofre alteração, assim como um rearranjo da estrutura do material.

As janelas com materiais termocrômicos, para além de serem visivelmente transparentes, podem aumentar a gestão de energia em edifícios controlando a transmitância da luz, principalmente para comprimentos de onda próximos da radiação infravermelha, e os ganhos solares (Rezaei et al., 2017). Têm como principal inconveniente o alto valor da τ_c , que pode ser controlado através de dopagem, nano estruturas ou outro processo que possibilite aproximar o seu valor da temperatura ambiente (Wang et al., 2016).

- **Revestimentos de dióxido de vanádio VO₂ (Sólidos inorgânicos)**

Apesar de haverem mais materiais como polímeros, o dióxido de vanádio é o material mais utilizado (Rezaei et al., 2017). O termocromismo associado ao dióxido de vanádio, surgiu em 1959 (Morin, 1959) e, segundo (Granqvist, 2016), é o material mais promissor para os vidros termocrômicos, no entanto devido ao seu custo-desempenho de preparação, estabilidade e desempenho ainda não foi comercializado (Gao et al., 2012) e, até à data ainda nenhuma alternativa é atualmente suficientemente simples que permita a produção de revestimentos em longa escala.

Em resposta à temperatura exterior, o VO₂ sofre alterações estruturais de um estado semiconductor transparente para um estado semiconductor metálico infravermelho translúcido e bloqueia parcialmente a luz, enquanto permanece transparente (Gao et al., 2012) e reflete a radiação infravermelha (Rezaei et al., 2017) (figura 13).

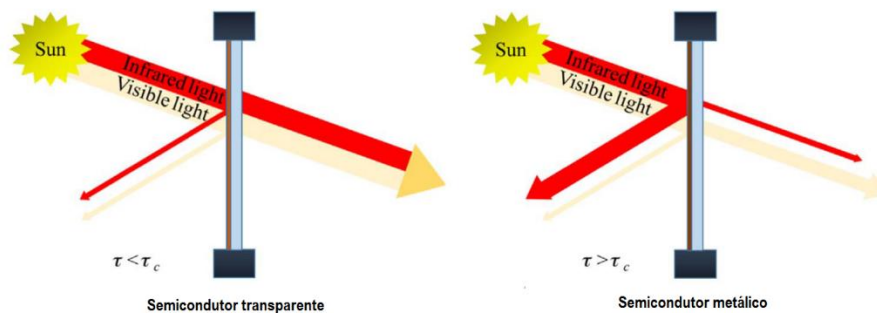


Figura 13- Janela termocrômica

Fonte: Adaptado de (Rezaei et al., 2017)

A sua temperatura crítica de $\tau_c = 68^\circ\text{C}$, é um valor interessante por não variar muito comparativamente à temperatura da sala (Granqvist, 2016). Note-se que, a esta temperatura ocorre o rearranjo reversível da estrutura do cristal, ou seja, ocorre mudança entre semiconductor e metálico. Esta alteração, depende apenas da temperatura exterior, como referido, e a resposta é quase instantanea ocorrendo usualmente em 10^{-12} s (1ps).

A sua comutação ocorre entre a fase monoclinica de baixa temperatura com propriedades semiconductoras e uma alta transmitancia infravermelha e a fase de rutila (de alta temperatura, de condutividade metálica e refletância infra-vermelha (Granqvist, 2016). Quando a temperatura é inferior à temperatura critica, este tipo de material é transparente (a radiação passa com facilidade) para radiação próxima de infravermelho e quando superior o material fica translúcido bloqueando grande parte da radiação infravermelha.

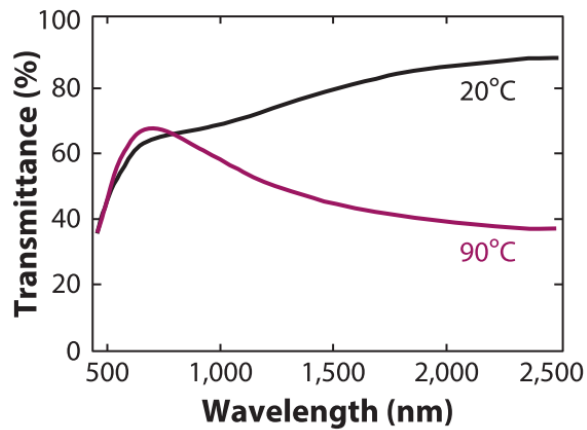


Figura 14- Transmittância VO₂

Fonte: (Wang et al., 2016)

Pela figura 14 anteriormente apresentada, verifica-se que a curva preta corresponde ao estado semicondutor, onde a temperatura é inferior à crítica e a curva vermelha ao estado metálico, onde a temperatura é superior à crítica. A transmittância é superior no estado semicondutor com o aumento significativo do comprimento de onda e a refletância é superior no estado metálico (Granqvist, 2016), principalmente para a radiação IV.

Com o aumento da temperatura, a diferença entre as transmittância de cada estado aumenta com o aumento do comprimento de onda, pelo que quanto menor a temperatura maior é a energia que atravessa o revestimento (Granqvist, 2016); (Granqvist, 2015).

Apesar de um cristal de VO₂ isolado não suportar desordens estruturais, estas que ocorrem com temperaturas superiores ou inferiores à temperatura crítica, e sofrer rutura, os filme de VO₂ suportam alterações na estrutura em mais de 108 ciclos.

2.5.4. Principais vantagens e desvantagens

Tabela 4- Principais especificações dos dispositivos utilizados em janelas inteligentes

Fonte: Adaptado de (Rezaei et al., 2017);

	Vantagem	Desvantagem	Principais características
Eletrocrômicos (EC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modulação solar ▪ Controlo do brilho ▪ Reduz as cargas de aquecimento e arrefecimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Custo ▪ Níveis de modulação limitados ▪ Alto tempo de comutação ▪ Necessita de energia elétrica para a modulação transparente ▪ Baixo $g \perp$ para climas frios 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Normalmente 2V ▪ Alteração de transmitância até 60% ▪ Economias de iluminação até 60%
Dispositivos de partículas suspensas (SPD)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modulação solar ▪ Controlo do brilho ▪ Rápido tempo de resposta ▪ Vários níveis de transparência ▪ Controla radiação UV 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisa de energia elétrica para manter a transparência ▪ Custo ▪ $g \perp$ relativamente baixo ▪ Controlo razoável de IV 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transmissão depende do tipo e densidade das partículas ▪ Comutação (100-200 ms) ▪ 10^6 ciclos
Cristais líquidos dispersos em polímero (PDLC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Controlo do brilho ▪ Fica opaco para questões de privacidade ▪ Minimizar custos energéticos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisa de energia elétrica para manter a transparência ▪ Não permite a modulação de $g \perp$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bloqueio radiação UV e IV ▪ Comutação 1/10 s ▪ $10^5 - 10^6$ ciclos

Gasocrômico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modulação solar ▪ Controlo do brilho ▪ Rápida resposta relativamente a EC ▪ Estrutura mais simples que EC ▪ Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ainda não se encontra no mercado ▪ Precisa de equipamento especial e energia elétrica para a operação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transmitância varia de acordo com a relação %H₂/Ar gás ▪ Não contem na sua estrutura condutores transparentes
Fotocrômico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabricação e instalação simples ▪ Não precisa de fornecimento de potência 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regulação apenas em conformidade com a luz, pelo que ainda não foi comercializado 	
Termocrômico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduz o brilho ▪ Reflete a radiação infravermelha ▪ Reduz $g \perp$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixa transmitância visível ▪ A modulação solar não é substancial ▪ A temperatura de ativação é alta 	

2.5.5. Evolução no mercado

Segundo dados disponibilizados pela Nano Markets (figura 15) é possível verificar a constante evolução da tecnologia electrocrómica e termocrómica, tendo a tecnologia electrocrómica uma maior implementação por m² em 2018 e ambas, apresentarão uma redução de aproximadamente 60 % do custo/ m² em 2018 face a 2011.

ELECTROCHROMIC TECHNOLOGY								
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Electrochromic Window Glass Volume (Million Square Meters)	0.19	0.35	0.61	0.96	1.49	2.30	3.54	5.48
Average Cost per Square Meter (\$)	700.0	609.0	529.8	461.0	401.0	348.9	303.5	264.1
Electrochromic Glass Revenues (\$ Million)	136.0	213.5	321.7	443.9	597.8	800.9	1075.2	1446.3
THERMOCHROMIC TECHNOLOGY								
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Thermochromic Window Glass Volume (Million Square Meters)	0.07	0.10	0.14	0.26	0.48	0.76	1.06	1.48
Average Cost per Square Meter (\$)	400.0	352.0	309.8	272.6	239.9	211.1	185.8	163.5
Thermochromic Glass Revenues (\$ Million)	30.0	35.7	42.4	71.8	114.9	160.5	196.9	242.3

Source: "Next-Generation Smart Windows: Materials and Markets: 2011," available from Nanomarkets, www.nanomarkets.net.

Figura 15- Evolução da tecnologia electrocrómica e termocrómica (n-Tech Research, 2017)

Fonte: (n-Tech Research, 2017)

Em constante evolução no mercado, segundo a Comissão Europeia os dispositivos electrocrómicos podem representar em 2024 cerca de 580 milhões € e os dispositivos fotocrómicos, termocrómicos, SPD e PDLC cerca de 650 milhões €.

Pela figura 16, disponibilizada pela Nano Markets, verifica-se que em 2021 as janelas inteligentes triplicarão o seu valor comparativamente ao ano de 2014, o que representará um aumento da eficiência energética em vários setores.

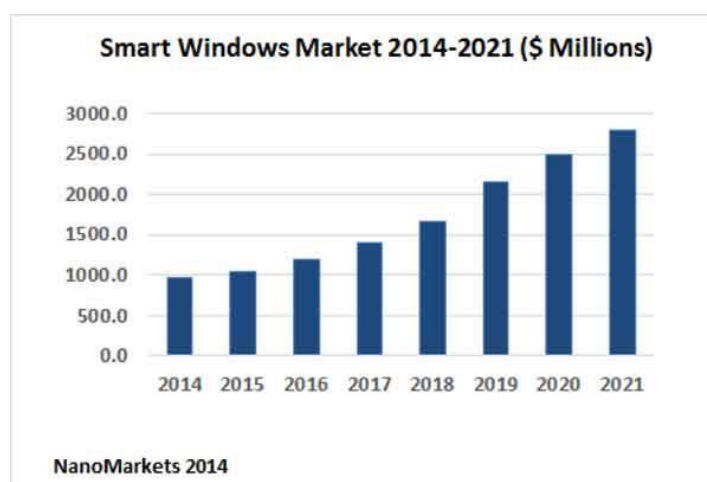


Figura 16- Janelas inteligentes no mercado 2014-2021 (\$ Milhões) Fonte: (n-Tech Research, s.d.)

2.6. Películas adesivas poliméricas

Em contraste com os dispositivos de sombreamento comuns, as películas adesivas não afetam significativamente as condições de luz natural no interior do espaço e possibilitam a reflexão da radiação solar, diminuindo a necessidade de aquecimento em espaços interiores, as películas de poliéster tendem a absorver e a refletir radiação infravermelha longa que é emitida no espaço interior, melhorando bastante a retenção de calor no interior do local de implementação, aumentando assim, a eficiência energética dos envidraçados em climas frios (Lourenço, 2016).

Embora não seja uma solução duradoura, a aplicação deste tipo de películas pode ser feita tanto no interior, como no exterior do vidro, conferindo-lhe proteção de raios UV e infravermelhos, permitindo a entrada de luz natural e aumentar o desempenho térmico.

Existem vários tipos de películas, nomeadamente películas de controlo solar, transparentes, de proteção e segurança, decorativas, anti-graffiti, de proteção aos raios UV, de baixa emissividade, de privacidade e de proteção de radiofrequência e frequência eletromagnética, podendo ser implementadas num envidraçado, por adesivos sensíveis à pressão ou ativados com água (Lourenço, 2016).

Note-se que a película de controlo solar, esta de maior importância para o caso em estudo, tem como objetivo diminuir os ganhos solares, pela diminuição do fator solar do envidraçado contribuindo conseqüentemente na diminuição das necessidades energéticas, porém sem uma diminuição acentuada da transmissão visível.

Pela aplicação deste tipo de solução em todas as fachadas da Torre Sul, à exceção da fachada a norte, do Instituto Superior Técnico, segundo comunicação pessoal junto do gestor do espaço, possibilitou uma redução da necessidade de arrefecimento de cerca de 30% pelo que uma escolha ponderada deste tipo de material, com base nas suas propriedades é possível economizar os gastos energéticos.

2.7. Conclusões

A temática eficiência energética é considerada o motor para os avanços tecnológicos e nesse sentido surgem as janelas inteligentes, que podem ser aplicadas em vários setores, nomeadamente em edifícios. Como foi possível verificar o envidraçado passa a ser considerado um elemento dinâmico e a sua comutação pode ser ativada pela ação de um controlador ou por condições externas como luz ou temperatura.

Relativamente aos vários tipos de dispositivos que podem ser implementados nas janelas o electrocrómico tem vantagens comparativamente ao PLDC e SPD pelo facto de não necessitar de potência para permitir a passagem de radiação, uma vez que normalmente o dispositivo electrocrómico apenas requer potência para a “simples” comutação, no entanto, o seu tempo de resposta ainda necessita de ser melhorado.

Apesar dos vários conceitos de janelas inteligentes terem surgido há algumas décadas, ainda se encontram em fase de desenvolvimento os vários tipos de materiais, polímeros, iões que podem ser utilizados para maximizar as várias propriedades óticas, assim como para possibilitar uma redução de

custo, uma vez que, a este tipo de tecnologia está associado uma quantia bastante considerável por m^2 , devido naturalmente ao facto de ser considerada uma tecnologia inovadora, assim como devido ao custo de alguns materiais utilizados na sua fabricação.

Além disso, a possibilidade de conjugar vários tipos de tecnologias pode possibilitar algumas melhorias como o caso do PLDC conjugado com a-Si para a produção de eletricidade, reduzindo a carência de potência no modo transparente, onde a tecnologia permite a passagem de radiação para o interior. Adicionalmente é de extrema importância desenvolver o VO_2 , usualmente presente nos dispositivos termocrómicos este que, segundo a bibliografia é um material bastante promissor para as janelas inteligentes, devido à sua rápida resposta, dado que a sua relação custo-desempenho é bastante elevada levando à sua não comercialização, assim como à sua temperatura crítica.

Este tipo de tecnologias permite, opacidade, variação de transmitância, controlar a entrada de radiação, assim como os seus ganhos solares, diminuindo significativamente o coeficiente de transmissão de calor do envidraçado por diminuição das perdas, promovendo a eficiência energética do edifício.

3. Caso de Estudo

O conforto térmico num edifício pode ser comprometido pelos materiais de construção utilizados, mais concretamente pela sua espessura e características térmicas e o conforto visual pelas propriedades óticas do envidraçado e/ou por uma área excessiva ou escassa de entrada de iluminação natural, assim como uma má projeção de iluminação elétrica.

Esta dissertação tem como principal foco analisar o impacto no conforto térmico e no conforto visual pela utilização de uma película reflexiva com proteção solar e uma película inteligente do tipo PDLC colocadas em 50% da área total de vidro de dois gabinetes, sendo esse impacto analisado em termos experimentais.

3.1. Localização e descrição geral do edifício

O estudo foi realizado no campus do IST, no Taguspark, localizado na região metropolitana de Lisboa, concelho de Oeiras, representado na figura 17.



Figura 17- Localização do caso de estudo

Fonte: (Raposo, 2015)

Para o presente estudo, foram disponibilizados três gabinetes (2N.16.14, 2N.16.20, 2N.16.22) com a mesma área ($13,14 \text{ m}^2$) situados no 2º andar do núcleo 16 do edifício, este localizado no bloco E (figura 18) com uma orientação aproximada de 30° relativamente a Sul, mais adiante renomeada de sudoeste, para que fosse possível realizar o estudo com os dois tipos de películas, inteligente (PDLC) e reflexiva, e posteriormente a comparação de resultados com um gabinete na forma original.

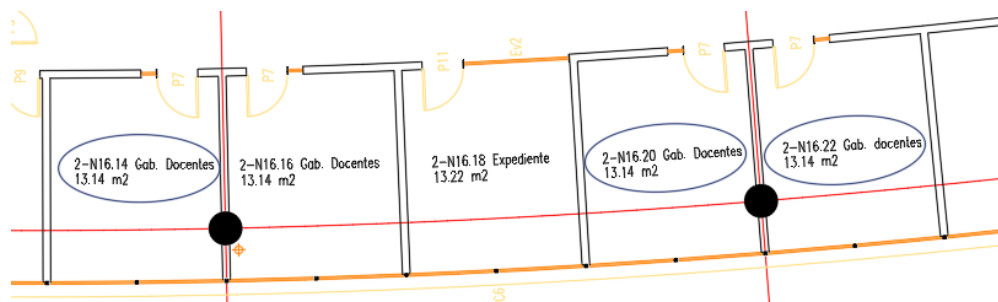


Figura 18- Localização dos gabinetes de estudo no Bloco E

Dessa forma, o gabinete 2N.16.22 foi considerado como gabinete de referência, não tendo sido implementada qualquer película no envidraçado, no gabinete 2N.16.20 foi implementada a película inteligente (PI) do tipo PDLC e no gabinete 2N.16.14 a película reflexiva com proteção solar (PR).

Quanto aos materiais de construção, os gabinetes são homólogos entre si, e o mobiliário de escritório bastante semelhante, apesar de no gabinete de referência a sua disposição ser diferente. Além disso, é de referir que no gabinete 2N.16.20, onde será implementada a película inteligente, existem placas cinzentas suspensas no teto. Desse modo, estas duas particularidades dos gabinetes em estudo serão tidas em consideração por fim a minimizar influências nos resultados experimentais.

A fachada sudoeste dos gabinetes, de maior importância no decorrer deste caso de estudo, é constituída por um vão envidraçado com uma área total de 4,63 m², constituído por duas janelas fixas superiores e duas janelas móveis inferiores, compostas por vidro incolor duplo de 6mm de espessura com uma caixa de ar de 12mm e por caixilharia de alumínio de policloreto de vinilo (PVC). Dispõe ainda de um dispositivo de sombreamento que permite o controlo de entrada de radiação solar excessiva no envidraçado superior, nomeadamente três palas de sombreamento possibilitando o controlo de entrada de radiação natural e reflexão de ganhos solares indesejáveis.

Esta fachada, tem ainda uma parede superior e outra inferior ao envidraçado com uma área de 2,56m² e 2,7m². Além das fachadas sudoestes, os tetos dos gabinetes encontram-se igualmente em contacto com o ambiente exterior. Dessa forma, devido às constantes variações de temperaturas e radiação exteriores, antes de se proceder à análise experimental é importante entender o desempenho térmico do edifício, tendo em conta os seus materiais de construção, assim como as suas propriedades térmicas.

3.2. Coeficiente de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica designado por U, constitui um parâmetro importante para entender o comportamento térmico do edifício, quando sujeito a transferência de calor. Este fenómeno pode ocorrer por radiação, convecção e condução sempre que existam diferença de temperaturas entre dois ambientes ou meios que este separa.

O coeficiente de transmissão térmica superficial de um elemento, deve ser determinado segundo a norma europeia EN ISO 6946 definida pela equação 6,

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} [W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (7)$$

Onde:

$\sum_j R_j$: Somatório das resistências térmicas das camadas constituintes, dependente da espessura [m] e da condutibilidade térmica, $k [W/m \cdot ^\circ\text{C}]$.

R_{si} e R_{se} : Resistência térmica interior e exterior respetivamente, dependentes do sentido do fluxo de calor presentes na tabela 5

Tabela 5- R_{se} e R_{si} segundo a norma EN ISO 6946

EN ISO 6946			
Sentido fluxo de calor		R_{se}	R_{si}
Horizontal ¹		0,04	0,13
Vertical ²	Ascendente	0,04	0,1
	Descendente	0,04	0,17

1- Paredes até (+/- 30° com a vertical)

2- Coberturas e pavimentos até (+/- 60° com a horizontal)

Segundo a norma anteriormente referida, no caso de o elemento separar o espaço interior com um espaço não útil ou um edifício adjacente R_{se} toma o valor de R_{si} .

Assim, para a obtenção dos coeficientes de transmissão de calor das envolventes opacas do gabinete foi apenas considerada R_{se} para a análise da parede com o vão envidraçado e o teto do gabinete, e os sentidos dos fluxos de calor horizontais para todas as paredes à exceção do teto e do chão, considerando assim para estes, um sentido descendente e ascendente respetivamente.

Os coeficientes de transmissão de calor das envolventes opacas dos gabinetes, dependem essencialmente dos materiais presentes na sua constituição e das suas propriedades térmicas, assim como as suas espessuras. Por fim a entender o comportamento térmico do edifício procedeu-se à análise dos coeficientes de transmissão de calor de cada envolvente do gabinete, presente na tabela 6. Note-se que o teto é enumerado por I, II, III, uma vez que é constituído por três espessuras diferentes de betão.

Tabela 6- Materiais de construção dos elementos opacos do gabinete e os respetivos coeficientes de transmissão de calor

Zona	Materiais	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m3)	Calor específico (J/kg.k)	R [m ² .k.W ⁻¹]	U [W.m ⁻² .k ⁻¹]	Área [m ²]
Chão	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		
Parede externa (inferior ao envidraçado)	Eflex- 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		
Parede externa (superior ao envidraçado)	Eflex	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		
	Ar Horizontal	0,015	---	1,2922	0,24	0,1700		
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		
Paredes interiores	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167	1,184	12,33
	Alvenaria de Tijolo furado	0,25	0,39	1200	920	0,6410		
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		
Teto I,II,III	Lajeta de betão	0,06	1,13	2000	1000	0,0531	0,490/0,504/0,519	7,87 / 1,02 / 4,36
	Isolamento XPS	0,05	0,037	30	1550	1,3514		
	Tela impermeabilização	0,002	0,14	1200	1040	0,0143		
	Betonilha	0,03	1,13	2000	1000	0,0265		
	Concreto de argila	0,2	1,3	1460	880	0,1538		
	betão	0,47/0,35/0,22	2,2	2300	900	0,214/0,1590/0,1		
	Estuque projetado	0,005	0,3	600	920	0,0167		

Por se tratarem de elementos em contacto com o ambiente exterior, pelo que estão sujeitos a uma maior diferença de temperatura, a parede exterior (superior e inferior ao envidraçado) e o teto têm

presentes na sua constituição um isolamento XPS que lhes confere uma maior resistência térmica às diferenças de temperatura, apresentando um baixo coeficiente de transmissão térmica (U).

Os restantes elementos opacos apresentam um coeficiente de transmissão térmica ligeiramente superior, porém trata-se de paredes que separam ambientes interiores com temperaturas semelhantes pelo que não necessitam de camadas com alta resistência térmica.

O vão envidraçado é o elemento de construção com maior coeficiente de transmissão térmica, comparativamente aos restantes elementos de construção. Segundo valores tabelados disponibilizados pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), o vão envidraçado presente nos gabinetes constituído vidro duplo incolor com uma espessura de 6 mm e uma camada de ar de 12 mm, caixilharia de alumínio com corte térmico tem um coeficiente de transmissão térmica de $U_w = 3,46 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

3.3. Inércia térmica

Entende-se por inércia térmica a capacidade de armazenamento de calor, dependente da massa superficial útil e conseqüentemente do tipo de construção do elemento. Pode ser utilizada para absorver e armazenar ganhos de calor durante o período diurno, reduzindo cargas de arrefecimento e por sua vez libertá-los durante o período noturno, reduzindo cargas de aquecimento.

De forma a analisar a inércia térmica dos gabinetes e tendo em conta as propriedades dos materiais de construção, nomeadamente as suas espessuras, calor específico e densidades recorreu-se à equação 8, por fim a determinar a capacidade de armazenamento de energia de cada um dos elementos quando sujeitos a uma variação de temperatura.

$$E = m \cdot cp \cdot \Delta T [kJ] \quad (8)$$

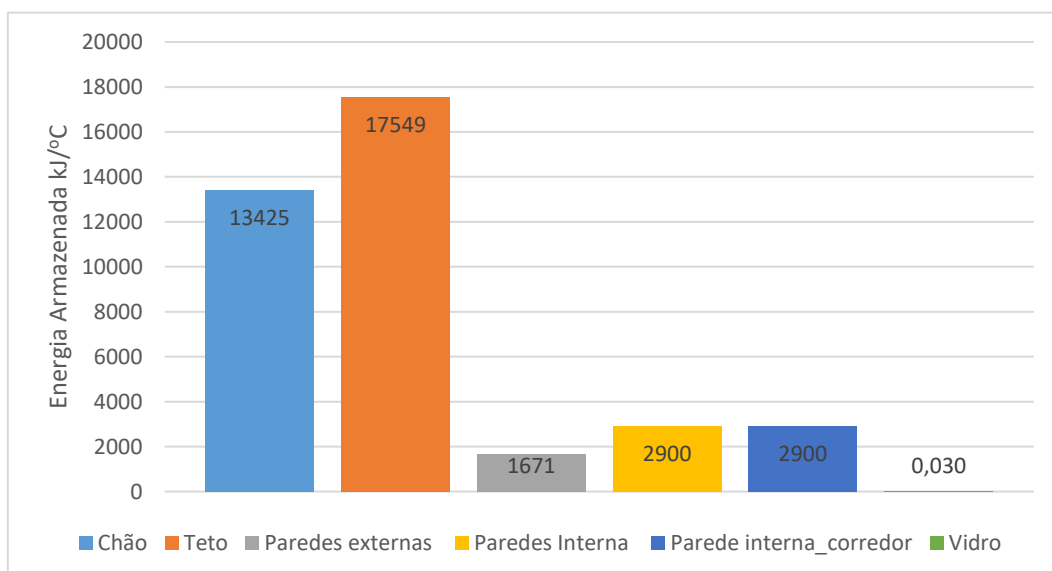


Figura 19 -Inércia térmica dos elementos de construção dos gabinetes

Pela análise na figura 19, como espectável, verifica-se que o vidro por ter uma massa bastante baixa é o elemento com menor inércia térmica no edifício, pelo que, pelo valor apresentado, a capacidade de armazenamento de energia é aproximadamente nula.

Contrariamente ao vidro, o teto e o chão do gabinete têm uma maior inércia térmica pelo que possibilitam um atraso na transição de calor.

De um modo geral, verifica-se que os gabinetes têm uma elevada inércia térmica, esta devida essencialmente às propriedades dos materiais de construção presentes no teto e no chão dos mesmos.

3.4. Taxa de Renovação de ar

No interior dos edifícios é importante a qualidade do ar, pelo que é bastante importante entender a taxa de ventilação presente no gabinete.

Um dos processos normalmente utilizados para estimar as taxas de renovação de ar em salas fechadas, mas não estanques, é o método do gás traçador, no qual o gás é injetado e conseqüentemente analisada a evolução da sua concentração ao longo do tempo.

Paralelamente a este método podem ser utilizadas várias técnicas, nomeadamente a técnica de decaimento, o qual possibilita determinar a taxa de renovação de ar. Após a obtenção de uma concentração inicial uniforme e com base nos valores registados no decaimento de concentração de CO₂.

Considerando um regime permanente onde o gás é quimicamente estável, que não ocorrem processos de absorção, a mistura da concentração é homogénea (Laussmann & Helm, 2011) e uma concentração de CO₂ nula no exterior do gabinete a equação do balanço de massa em termos de caudais é dada pela seguinte equação (Cui, Cohen, Stabat, & Marchio, 2015):

$$V \frac{dC_t}{dt} + Q C_t = 0 \quad (9)$$

Onde tem-se que:

V : Volume do gabinete [m³]

Q : Caudal de ventilação [m³ / s]

C_t : Concentração volúmica de CO₂ no local de estudo

t : tempo [s]

Porém na realidade, a concentração de CO₂ no exterior (C_{ext}) não é nula, pelo que é necessária a sua contabilização, pelo que:

$$V \frac{dC_t}{dt} + Q[C_t - C_{ext}] = 0 \quad (10)$$

Simplificando a equação 9 e resolvendo em ordem ao tempo tem-se que:

$$C_t - C_{ext} = (C_0 - C_{ext}) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (11)$$

Considerando que o n^o de renovações por hora é dado por $N = \frac{Q}{V}$ e resolvendo a equação anterior a ordem a N tem-se que o número de renovações por hora é dado por:

$$N = - \frac{\ln \left(\frac{C_t - C_{ext}}{C_0 - C_{ext}} \right)}{t} \quad (12)$$

Por sua vez, o número de renovações por hora pode ser obtido através da manipulação da equação 12 em ordem ao tempo, onde o módulo do logaritmo natural entre as concentrações corresponde à renovação horária e por sua vez, pode ser calculado através da reta de regressão linear, resultado da aplicação dos mínimos quadrados aos valores experimentais.

Uma alternativa ao supracitado, pela aplicação da equação 13 na qual são calculados a média dos módulos dos declives entre cada medição.

$$N = \frac{(\sum_{j=1}^n t_j) \cdot \sum_{j=1}^n \ln[C(t_j) - C_{ext}] - n \sum_{j=1}^n t_j \cdot \ln[C(t_j) - C_{ext}]}{n \cdot \sum_{j=1}^n t_j^2 (\sum_{j=1}^n t_j)^2} \quad (13)$$

De forma a entender o número de renovações de ar, foram registados valores de CO₂ no gabinete 2N.16.20, com recurso ao medidor Chauvin Arnoux C.A 1510, durante um período de 60h com 10 minutos de intervalo entre cada medição. Durante o todo o registo não houve ocupação, ventilação, nem abertura das janelas e portas, de forma a minimizar fatores externos no decaimento do CO₂ no gabinete em análise.

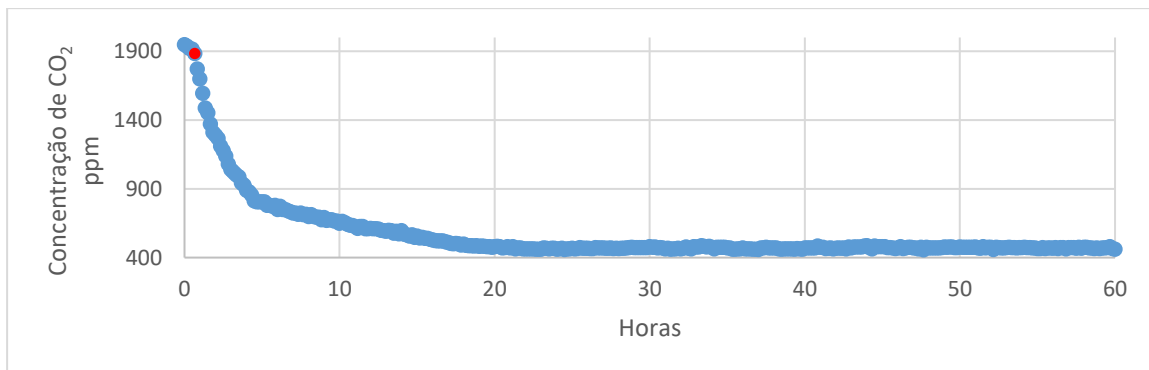


Figura 20- Decaimento de CO₂ no gabinete 2N.16.20

Pela análise da figura 20 verifica-se que após 20h a quantidade de CO₂ no gabinete começa a estabilizar assumindo um valor médio de 470 ppm pelo que é relativamente próximo da concentração atmosférica, esta que para o método do decaimento pode ser considerada constante e igual a 430 ppm (Cui et al., 2015).

Devido a regime transiente, nem sempre é possível considerar o primeiro registo como a concentração inicial do gás traçador (Cui et al., 2015). Desse modo, considerou-se a concentração inicial o momento em que a curva apresenta um comportamento exponencial sendo $C_0 = 1883 \text{ ppm}$ e a concentração final de 480 ppm correspondente ao instante $t=20\text{h}$ no qual ocorreu a estabilização da concentração.

Pela aplicação do método dos mínimos dos quadrados a reta de regressão linear obtida, não se adequa aos resultados obtidos (figura 21), pelo que a taxa de renovações de ar por hora com recurso à equação 13, foi $0,301 \text{ h}^{-1}$.

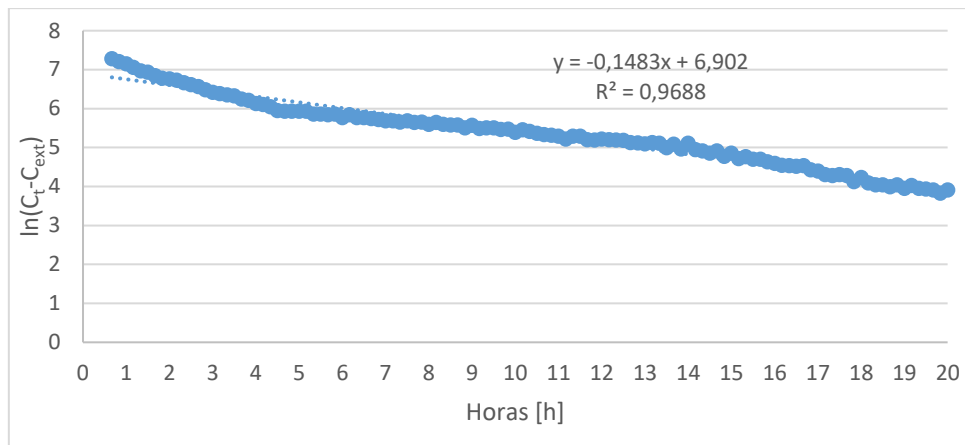


Figura 21- Regressão linear da concentração logarítmica de CO₂

3.5. Metodologia

Com o principal objetivo de contornar alguns problemas de conforto dos ocupantes dos gabinetes em análise, nomeadamente a necessidade de climatização do espaço devido a cargas térmicas provenientes de ganhos solares, o desconforto visual devido essencialmente a excesso de radiação, assim como a necessidade de recorrer à utilização de sombreamentos que acabam por comprometer a vista para o exterior do espaço, e muitas vezes reduzem significativamente a luz natural sendo necessário durante períodos diurnos utilizar iluminação elétrica para desempenharem confortavelmente as suas tarefas, foram implementadas dois tipos de películas, a película inteligente do tipo PDLC e a película reflexiva com proteção solar em 50% da área total de vidro existente.

Sucintamente, como se verifica na figura 22 apresentada seguidamente, serão comparados os impactos da película inteligente (PI) do tipo PDLC, esta que permite alteração da sua transmitância quando aplicada uma diferença de potencial e da película reflexiva (PR) com resultados obtidos no gabinete de referência. Note-se que a película inteligente sem qualquer tensão aplicada, encontra-se opaca e pela aplicação de tensão encontra-se transparente.

De forma a entender esses impactos serão analisadas variáveis, tais como a temperatura e humidade relativa interior, assim como a irradiância para a análise do conforto térmico e a iluminância por fim a possibilitar a análise do conforto visual nos gabinetes.

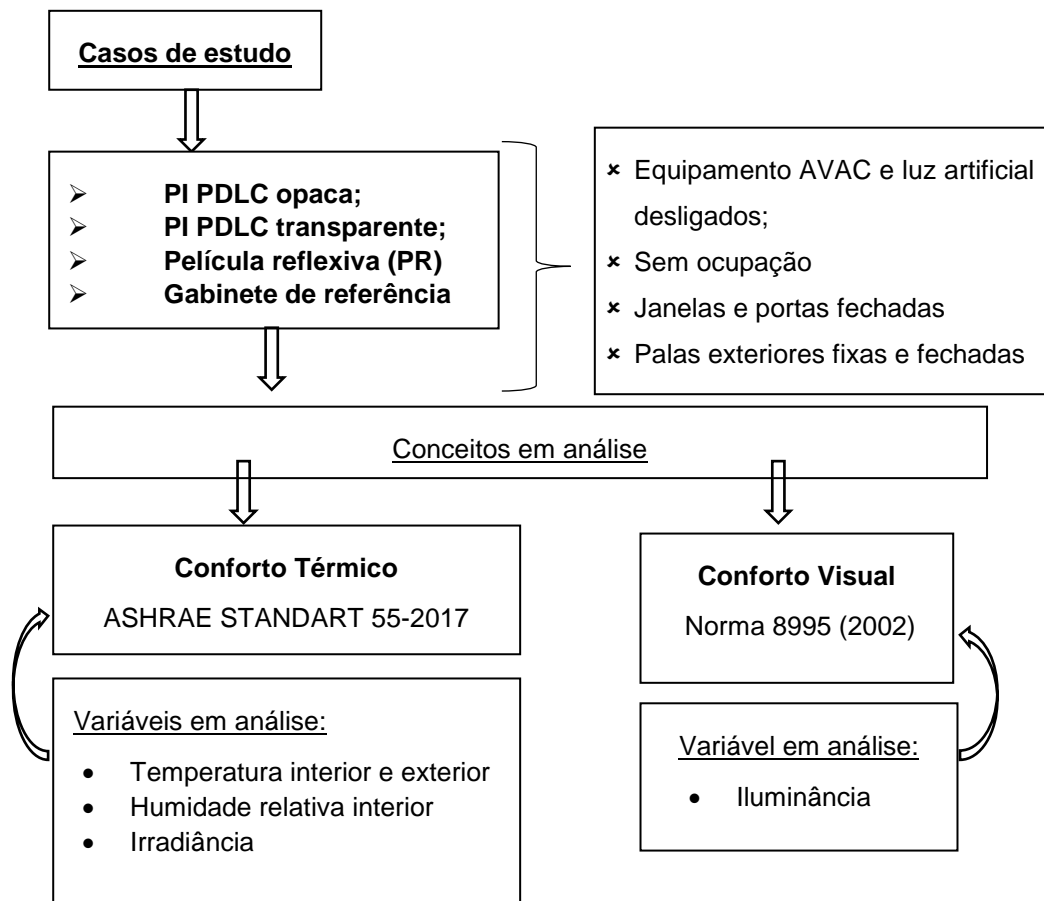


Figura 22- Metodologia para o caso de estudo

3.5.1. Configurações gerais

Durante todo o procedimento experimental a pala de sombreamento exterior, permaneceu o mais fechada possível em todos os gabinetes, por fim a minimizar os ganhos de calor nos vidros superiores, assim como a entrada de radiação, garantindo dessa forma uma menor influência nos resultados obtidos.

Tanto o equipamento AVAC e a iluminação elétrica permaneceram desligados durante os ensaios experimentais, assim como as portas e janelas encontraram-se fechadas. Relativamente à ausência de ocupação dos gabinetes, a mesma foi minimizada ao máximo, contudo poderão ter ocorrido entradas e saídas esporádicas por se tratar de locais de trabalho de docentes, assim como para efeitos de recolha de dados para o estudo.

Relativamente ao impacto das películas no conforto térmico dos gabinetes as situações em análise foram agendadas consoante as condições climáticas, uma vez que os ganhos solares têm um impacto bastante significativo na temperatura interior, assim como para a análise do conforto visual devido a flutuações de radiação e, portanto, de valores de iluminância.

3.6. Películas implementadas

Na presente dissertação foram utilizadas dois tipos de películas para que fosse possível analisar o seu impacto em termos térmicos e visuais. Assim, foi colocada no gabinete 2N.16.20 a película inteligente

(PI) do tipo PDLC, tendo na sua composição cristais líquidos dispersos em polímero e no gabinete 2N.16.14 a película reflexiva (PR) transparente com proteção solar composta 100% por poliéster, aplicadas nos vidros.

Em ambos os casos, as películas foram implementadas sobre os vidros duplos inferiores, compostos por vidro incolor de 6mm, cujas propriedades óticas encontram-se presentes na tabela 7 e uma camada de ar no seu interior de 12 mm. Estas foram colocadas do lado interior do espaço e, portanto, em contacto com o ambiente interior dos gabinetes, representado a azul na figura 23, correspondente a uma área coberta de 1,75 m² equivalente a 37,76% da área envidraçada.

Tabela 7- Propriedades óticas vidro incolor 6 mm

Vidro incolor 6 mm	
Espessura [m]	6×10^{-3}
Emissividade	84%
Refletância visível	8%
Transmitância Solar	79%
K [W/m.k]	0,9
Transmitância visível	89%

Inicialmente ainda foi ponderada a hipótese de colocação da película reflexiva em contacto com o ambiente exterior, contudo, devido à dificuldade da sua implementação, foi excluída essa hipótese.

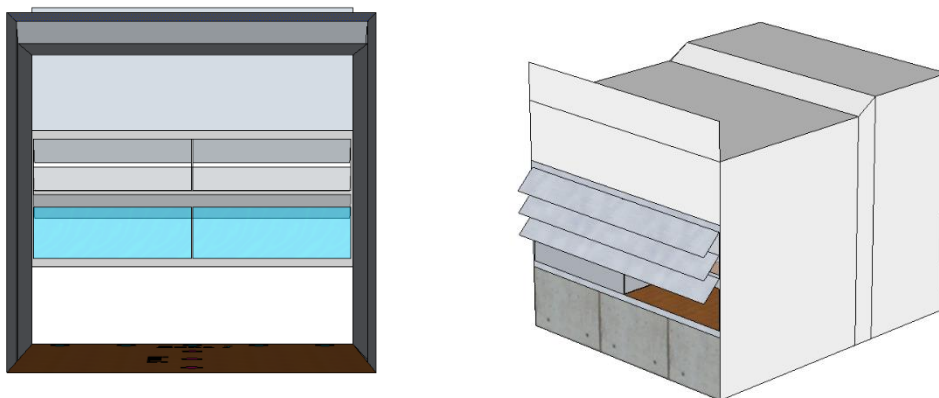


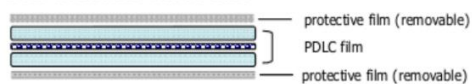
Figura 23- Implementação das películas nos vidros inferiores dos gabinetes

3.6.1. Película inteligente do tipo PDLC

A película inteligente do tipo PDLC utilizada foi *Smart Cling Self Adhesive Smart Tint- Low driving voltage* (figura 24). Tem como vantagem a sua aplicação direta nas janelas existentes através de revestimento adesivo e as suas propriedades óticas bastante atrativas inclusive, segundo dados do fabricante, presentes na figura 25, apresenta um baixo coeficiente de ganho solar, o que significa uma baixa quantidade de energia transmitida. Tem um custo associado de 558,8 \$/m² e, segundo o fabricante, tem uma durabilidade comutável elétrica >10⁶ ciclos, assim como, durabilidade face à exposição solar e possibilita 42% de redução de calor solar.

O modo de funcionamento do dispositivo pode ser controlado através de um botão *off/on* o qual permite a passagem do modo opaco para o modo transparente, respetivamente, ou por um *dimmer*, que permite a regulação da claridade, sendo que este componente não será parte integrante da análise experimental.

NON-Adhesive Smart Tint™



SmartCling™ Self Adhesive Smart Tint™

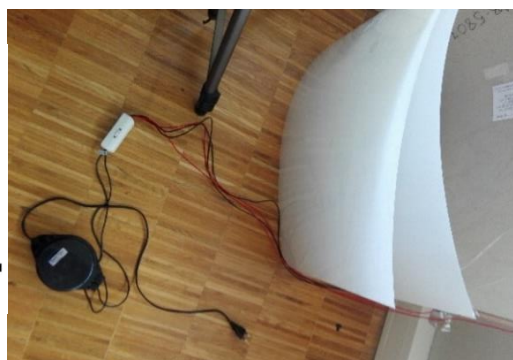
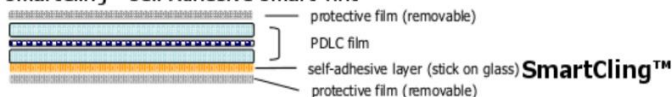


Figura 24- À direita esquema da composição da película inteligente SmartCling Self Adhesive (Fonte: (Smart Tint, s.d.)); à esquerda Montagem Botão on/off para permitir a comutação das películas



Smart Tint Technical Data Sheet

CONFIDENTIAL

Description	NON-Adhesive Smart Tint		Smart Cling Self Adhesive Smart Tint	
	High on clarity (HC-NF)	Low driving voltage (LV-NF)	High on clarity (HC-SF)	Low driving voltage (LV-SF)
Film thickness	0.4 mm		0.5 mm	
Film sizes	70" x 144" or 1778mm x 3658mm		1505mm x 3400mm or 59.25" x 133.8"	
UV block	> 99%		> 99%	
IR block	Standard Low Haze High Clarity > 20%	IR90 Low Haze High Clarity + Heat Block > 90%	Standard Low Haze High Clarity > 20%	IR90 Low Haze High Clarity + Heat Block > 90%
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)	90 ± 1 (on) 4 ± 2 (off)	90 ± 1 (on) 4 ± 2 (off)	90 ± 1 (on) 4 ± 2 (off)
Haze	3 ± 1 (on) 89 ± 2 (off)	4.0 ± 1 (on) 85 ± 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 ²			
Switching speed	Off → On : 50-100 milliseconds / On → Off : 200-300 milliseconds			

Figura 25- Propriedades da película inteligente PDLC Smart Cling Self Adhesive Smart Tint- Low driving voltage

(Fonte: (Smart Tint, 2018))

3.6.2. Película reflexiva (PR) com proteção solar

A película reflexiva adesiva com proteção solar implementada foi da *Linea Hogar- Safe Auto-Adhesive UV Protection* é também uma película de segurança, a sua composição é 100% poliéster e igualmente à película inteligente pode ser implementada em vidros existentes. Tem um custo associado de 19€/m² e as suas propriedades óticas podem ser consultadas na figura 26.

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

Figura 26 - Propriedades da película reflexiva Linea Hogar- Safe Auto-Adhesive UV Protection

3.7. Equipamentos de medição utilizados e a sua finalidade

3.7.1. Câmara termográfica

Para obtenção de imagens térmicas dos gabinetes foi utilizado o equipamento da Milwaukee, modelo 2260-21 M12TM (figura 27) com uma resolução de 160x120 pixéis, com uma escala de temperatura medida entre 0° e -100°C e uma exatidão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$.

Este equipamento permite obter o gradiente de temperaturas da imagem captada, assim como, através de mira, obter a temperatura do objeto focado.



Figura 27- Câmara termográfica Milwaukee

Fonte:(Milwaukee, 2018)

3.7.2. Estação meteorológica

O facto de existir uma estação meteorológica no IST Taguspark, Davis Instruments Vantage Pro2 (figura 28), possibilitou a obtenção de valores fundamentais para a análise experimental, nomeadamente de radiação global no plano horizontal, temperatura e humidade exterior.

Além das variáveis utilizadas, a estação também possibilita a obtenção de outras variáveis de tempo, como a pressão barométrica, a temperatura e humidade interior, velocidade e direção do vento, precipitação e o ponto de orvalho



Figura 28- Estação meteorológica Davis Instruments Vantage Pro2

3.7.3. Luxímetro

Um luxímetro é um aparelho que permite medir a intensidade de luz que chega ao seu sensor, possibilitando assim determinar a iluminância presente no espaço em análise.

Para o efeito foi utilizado um luxímetro Vici modelo LX-1332B (figura 29) para proceder a essa análise. Este equipamento digital permite medir a iluminância através do seu sensor de foto díodo e filtro num range de 0,1 até 200.000 lux com uma precisão de $\pm 4\%$ da leitura e $\pm 0,5\%$ de escala completa (f.s) no caso de ≤ 10.000 lux e $\pm 4\%$ de erro de leitura e $\pm 0,5\%$ de escala completa (f.s) para valores ≥ 10.000 lux.



Figura 29- Luxímetro vici modelo LX-1332B

3.7.4. Medidor de CO₂

Para que fosse possível determinar a taxa de renovação de ar foi utilizado um medidor de concentração de CO₂, Chauvin Arnouc C.A 1510, presenta na figura 30, cuja sua medição tem uma incerteza de ± 50 ppm.



Figura 30- Medidor de CO₂ Chauvin Arnouc C.A 1510

Fonte: (chauvin-arnoux, 2018)

3.7.5. Multímetro e termopares

Para a obtenção de amostras para a 1ª situação recorreu-se a um multímetro Ω Omega Newport® TrueRMS SUPERMETER e 8 termopares do tipo k (liga de Cromel-Alumel), presentes na figura 31, expostos, com 0,51 mm de diâmetro e isolados com uma fita de poliamida fundida, kapton. De acordo com o manual os termopares tipo k permitem a medição de temperaturas entre os -250°C e os 1200 °C e apresentam uma resolução de 0,1 °C e uma precisão de 0,5 °C para temperaturas entre os -50 e 50°C.

Os 8 termopares do tipo k foram calibrados um a um, com auxílio a 1 termopares do tipo k, não exposto, com um diâmetro de 0,5 mm com recurso ao multímetro, sendo posteriormente instalados conforme descrito na 1ª situação.



Figura 31- Multímetro Omega Newport® TrueRMS SUPERMETER e termopare do tipo k

3.7.6. Sensores de temperatura e humidade relativa

O sensor Hobo U12-011 Temp/RH (figura 32) permite a medição de temperaturas de -20°C e 70°C e de humidades relativas entre 5% e 95% com uma precisão de $\pm 0,35$ °C e 0,03% respetivamente.



Figura 32- Sensor Hobo U12-011 Temp/RH colocado à altura do hipotálamo

Para que fosse mais credível a comparação dos valores obtidos para os três gabinetes em estudo, foi realizada uma calibração dos sensores. Dessa forma, foram colocados durante um intervalo de tempo de 8h30min, com medições de 15 em 15 min no mesmo local, sem qualquer interferência exterior, o mais próximos possível.

Por forma a obter o erro de cada sensor para os valores de temperatura e de humidade relativa, foi realizada para cada medição uma média dos três valores medidos e posteriormente o valor absoluto entre a média da medição e o valor obtido de cada sensor. Por fim, considerou-se a média de cada

conjunto de valores o erro médio de cada sensor. Note-se que o procedimento foi o mesmo tanto para a temperatura como para a humidade relativa.

Os valores obtidos na calibração encontram-se presentes na tabela 8 apresentada seguidamente.

Tabela 8- Erros considerados para correção dos valores obtidos

Localização dos sensores	Erro em °C face ao valor médio	%HR
2N.16.14	0,025	0,306
2N.16.20	0,029	0,105
2N.16.22	0,019	0,411

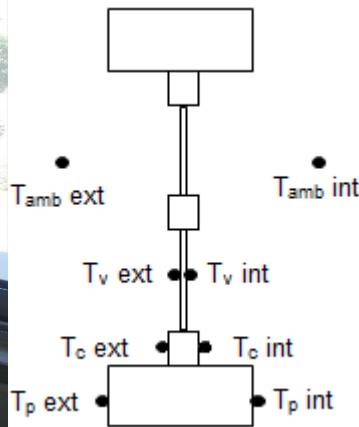
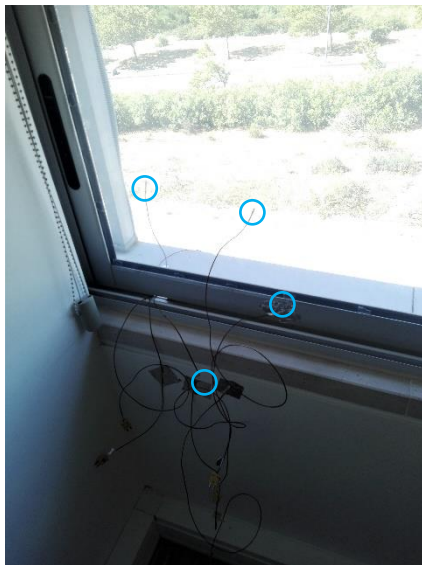
3.8. Impacto das películas no conforto térmico dos gabinetes

1ª Situação - Análise do perfil de temperatura da fachada em contacto com o exterior, sem qualquer película implementada

Para uma maior perceção em termos práticos do gradiente de temperaturas que existe, devido a fenómenos de transferência de calor, entre o ambiente interior e exterior, consoante as propriedades dos materiais, considerou-se pertinente para o estudo analisar o perfil da fachada sudoeste do gabinete em contacto com o ambiente exterior, esta constituída pelo vão envidraçado, componente esse fulcral no desenvolver deste trabalho.

Para tal, foram colocados 8 termopares do tipo k (liga de Cromel-Alumel), nas superfícies interiores e exteriores da parede, do vidro e da caixilharia assim como no ambiente interior e exterior, como apresentado na figura 33, foram retiradas e registadas as respetivas temperaturas entre as 9h30m e as 18h30m com intervalos de 1h30m no dia 12/7/2017, escolhido aleatoriamente, com recurso a um multímetro Ω Omega Newport® TrueRMS SUPERMETER k (liga de Cromel-Alumel).

Note-se que o termopar para medição da temperatura exterior foi colocado à sombra, e o termopar de medição de temperatura ambiente interior foi colocado junto ao sensor HOBO U12-011 Temp/RH, este situado à altura do hipotálamo do utilizador na área de trabalho, responsável pela regulação de temperatura corporal.



Legenda:

ext: Exterior

int: Interior

T_{amb} : Temperatura ambiente

T_v : Temperatura do vidro

T_c : Temperatura da caixilharia

T_p : Temperatura da parede

Figura 33- À esquerda, montagem dos termopares e à direita, corte esquemático da parede exterior localização dos termopares

2º Situação- Amostras termográficas do gabinete de referência, película inteligente (PI) opaca e da película reflexiva (PR) com proteção solar

Sabe-se como já mencionado no estado de arte esta dissertação que a maior influência de aumento de temperatura nos edifícios se deve essencialmente à entrada de radiação através de vãos envidraçados. Desse modo, foram captadas imagens termográficas pela utilização da câmara Milwaukee, entre as 9h30 e as 19h30, com intervalo de 2h entre medições onde foram captadas imagens do vão envidraçado, chão, paredes interiores e teto dos três gabinetes já com as películas implementadas.

3º e 4º Situação- Impacto da Película inteligente (modo opaco 3ª situação e modo transparente 4ª Situação) e da Película reflexiva no conforto térmico comparativamente à utilização de Vidro duplo

A 3ª e 4ª situação foram criadas com o objetivo de entender o impacto da película inteligente no conforto térmico comparativamente ao gabinete de referência e o impacto da película reflexiva no gabinete de referência.

Dado que a película inteligente tem dois modos de funcionamento e uma vez que apenas está colocada num gabinete é necessário realizar o mesmo ensaio duas vezes, um para a PI no modo opaco e um segundo ensaio para a PI no modo transparente, por fim a entender a influência da alteração de transmitância nas temperaturas e humidades relativas no interior do gabinete comparativamente ao gabinete de referência.

Para o efeito procedeu-se à colocação de um sensor de humidade e de temperatura, Hobo U12-011 Temp/RH, em cada um dos três gabinetes na zona de trabalho do ocupante à altura do hipotálamo conforme as figuras 34 e 35.

Contudo, como o envidraçado é o principal responsável pela entrada de radiação e consequentemente de ganhos solares, considerou-se que além destas variáveis, era também conveniente obter dados fundamentais da estação meteorológica existente no IST Taguspark, *Davis Instruments Vantage Pro2*, nomeadamente de radiação global no plano horizontal e temperatura exterior.

As amostras retiradas para ambos as situações foram obtidas para dias seleccionados aleatoriamente, contudo para minimizar influências as respetivas variáveis em análise foram registadas durante fins-de-semana (sem ocupação, sistema elétrico e AVAC desligado, janelas e portas fechadas). Assim sendo a 3ª e 4ª situação foram realizadas de 30/09/2017 a 1/10/2017 e 07/10/2017 a 08/10/2017 respetivamente.

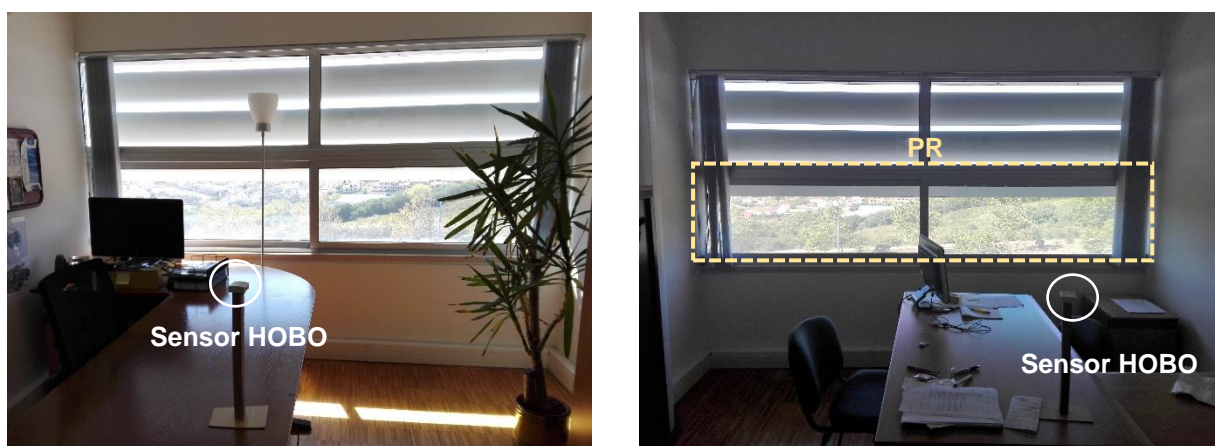


Figura 34- Gabinete de referência (2N.16.22) e Gabinete com Película Reflexiva (2N.16.14) respetivamente

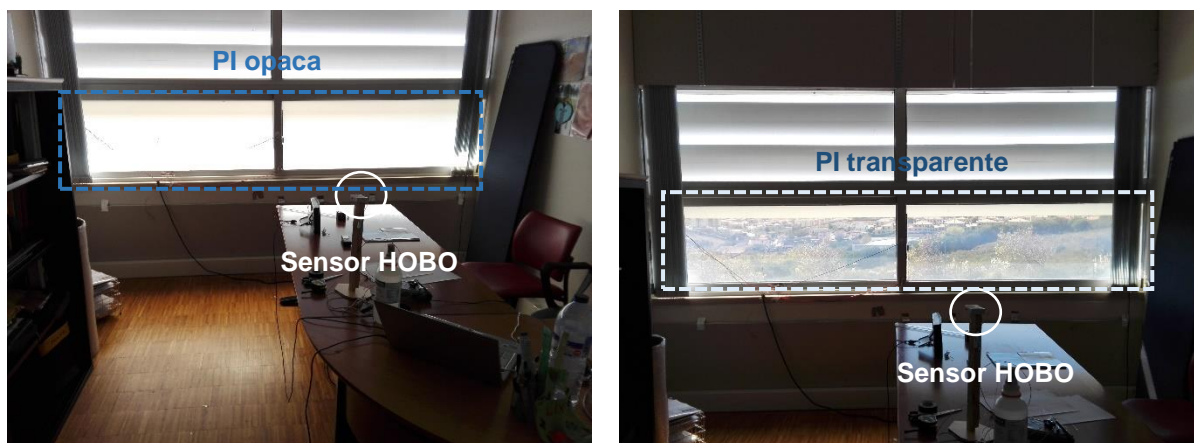


Figura 35- Gabinete com Película Inteligente opaca (à esquerda) e transparente (à direita) (2N.16.20)

3.9. Impacto das películas no conforto visual dos gabinetes

Para uma perceção de como iluminância se encontra distribuída nos gabinetes em análise e qual o impacto do uso das diferentes películas tem nesse esse valor, foi utilizado o luxímetro vici modelo LX-1332B para proceder a essa análise do conforto visual.

Inicialmente foi realizado um ensaio que permitia entender a distribuição da iluminância em vários pontos equidistantes ao longo do gabinete. Contudo constatou-se que este método poderia não ser o

mais adequado. O facto de os valores terem de ser retirados nos três gabinetes manualmente eram vários os fatores condicionantes do tempo de recolha, como a deslocação entre pontos, a posição horizontal constante do equipamento, a necessidade de estabilização dos valores e o facto do utilizador necessitar de manter uma distância considerável do equipamento para uma leitura mais correta, pelo que no final do ensaio, haveria comparação de valores retirados com 30/40 min de diferença.

Por sua vez, após a realização de alguns ensaios verificou-se que devido às várias disposições de mobiliário nos gabinetes, os valores retirados para zonas de trabalho, estariam a maioria das vezes comprometidos por sombreamentos ou reflexões devidas às várias e diferentes disposições.

Consequentemente, por fim a minimizar os erros devido ao fator tempo, e devido às várias disposições do mobiliário de escritório foram criadas duas zonas: uma zona junto à janela (ZJ), representada a azul, composta pelos pontos de medição 1,2,3,4,5 e uma zona de trabalho (ZT), representada a amarelo, composta pelos pontos de medição a, b, c presentes esquematicamente na figura 36, as quais foram utilizadas para a obtenção de dados a uma cota fixa de 73 cm, correspondente à altura de trabalho.

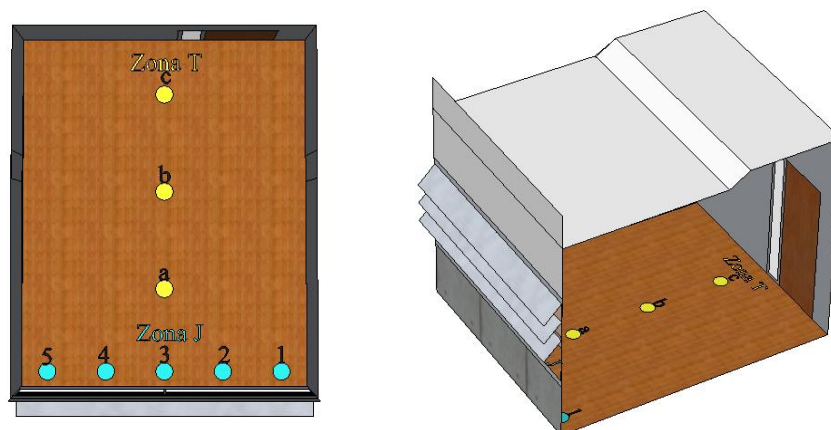


Figura 36- Zona J e Zona T para efeitos de análise de iluminância nos gabinetes

A distribuição da iluminância junto à periferia da janela torna-se importante para o presente estudo devido à utilização de dois tipos de película, pelo que a ZJ possibilita a análise da iluminância próximo da sua entrada no espaço interior a uma distância de 0,17 cm da janela. A zona de trabalho (ZT) tem como principal intuito entender o conforto visual do ocupante na zona de trabalho e a evolução da iluminância em termos de profundidade relativamente ao elemento responsável pela entrada de luz natural nos gabinetes.

Para a análise do impacto das películas no conforto visual foram estabelecidas duas situações (5ª Situação e 6ª Situação) de análise para os quatro casos de estudo, como apresentado na tabela 9.

Tabela 9- Casos de estudo para a 5ª e 6ª situação

Radiação essencialmente direta	Radiação essencialmente difusa
	-Gabinete de referência (sem qualquer película)
	-Gabinete com película inteligente –(PI) opaca
	-Gabinete com película inteligente (PI) transparente
	-Gabinete com película reflexiva (PR)

Os valores foram assim retirados para os quatro casos em análise, ou seja, gabinete de referência, gabinete com película inteligente no modo opaco e no modo transparente e no gabinete com película reflexiva por fim a analisar o conforto visual do utilizador e entender de que forma estão os gabinetes em análise, aptos, ou dependentes de luz artificial para que os valores estabelecidos pelas normas sejam atingidos, na presença de radiação essencialmente direta (céu limpo) e essencialmente difusa (céu coberto de nuvens).

Havendo necessidade de percorrer três gabinetes para obter valores de iluminância dos pontos correspondentes às duas zonas criadas para a obtenção das amostras, note-se que, em cada gabinete o tempo de levantamento de dados durou cerca de 5 min, de modo a que houvesse estabilização do equipamento.

5ª Situação- Influência de placas cinzentas na iluminância do gabinete 2N.16.20

De modo a entender a influência as placas cinzentas suspensas no teto do gabinete 2N.16.20, foram retirados valores de iluminância na zona J ao longo de 3 horas (10:00, 14:00, 16:00) cuja irradiância média total no plano horizontal era de 609, 962 e 801 [W/m²], respetivamente, do dia 14 de julho de 2017, criada para o estudo, antes de ser implementada qualquer tecnologia no envidraçado, for forma a minimizar esta influência nos valores de iluminância registados.

6ª Situação- Impacto da Película inteligente modo opaco e transparente e da película reflexiva no conforto visual comparativamente à utilização de Vidro duplo- Radiação essencialmente direta

Para que fosse possível analisar o impacto das diferentes películas na iluminância presente no interior dos gabinetes, com base nas condições meteorológicas foi selecionado o dia 2/10/2017, cuja radiação era essencialmente direta para as 13h40. Apesar de para o dia selecionado a esta hora não corresponder uma incidência de 90° com o vão envidraçado, mas sim de aproximadamente 60°, achou-se que, considerando que os gabinetes se encontram alinhados perfazendo entre as suas fachadas um ângulo de 180° os resultados permitiram quantificar o impacto das diferentes películas.

Para as zonas criadas para o estudo foram, dessa forma, retirados valores de iluminância nas zonas J e T para os 4 casos em análise.

7ª Situação- Impacto da Película inteligente modo opaco e modo transparente e da película reflexiva no conforto visual comparativamente à utilização de Vidro duplo- Radiação essencialmente difusa

Para a 7ª situação foi implementada a mesma metodologia mencionada na 6ª situação, contudo a amostragem foi retirada para o dia 12/10/2017 composto essencialmente por radiação difusa. Por se verificar a presença de nuvens, foi selecionada uma hora aleatória 11h30 para a referida análise.

4. Resultados e discussão

Em toda a análise dos resultados apresentados seguidamente, irá assumir-se que os gabinetes se encontram no mesmo plano e que a radiação solar atinge a superfície do envidraçado no mesmo instante. De notar, que derivado à sua orientação e a arquitetura do edifício, na realidade a radiação atinge primeiramente o envidraçado do gabinete de referência, posteriormente a do gabinete com a

película inteligente e por último o gabinete com a película reflexiva, contudo assumiu-se que a diferença não era significativa.

4.1. Impacto das películas no conforto térmico dos gabinetes

1ª Situação- Análise do perfil de temperatura da fachada em contacto com o exterior, sem qualquer película implementada

Pela análise da figura 37 que representam os vários perfis de temperatura para a parede, caixilho e vidro respetivamente, que a temperatura interior mais baixa foi registada na primeira medição, às 9h30m e a temperatura mais alta no último registo às 18h30.

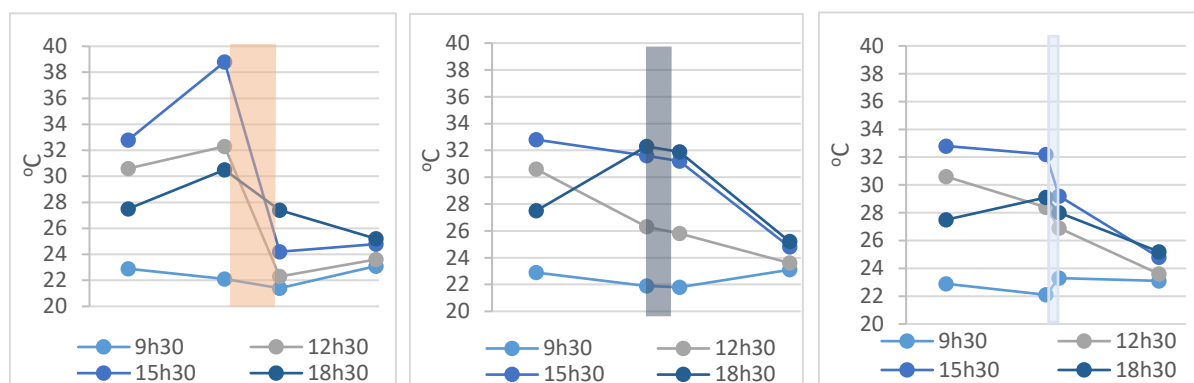


Figura 37- Perfil de Temperaturas: Parede, caixilho e vidro respetivamente

Analisando as temperaturas exteriores registadas, e tendo por base o perfil constante de temperaturas interiores obtidos no decorrer de toda a dissertação verifica-se que o aumento da temperatura interior está diretamente relacionado com os ganhos solares.

Além disso, como é possível constatar todos os declives das retas no interior dos elementos são negativos, à exceção do obtido às 9:30 no vidro, e variam consoante o elemento.

Esses declives, representam a diferença de temperaturas à superfície do elemento quando em contacto com o ambiente exterior ou interior, sendo que o perfil da parede apresenta o maior declive e o perfil do caixilho um menor declive. Este facto é justificado pela diferença dos coeficientes de transmissão de calor dos elementos, sendo que quanto maior o valor de U, mais suscetível está o elemento a variações de temperatura, pelo que pelos valores calculados a parede inferior ao envidraçado tem um $U= 0,590 \text{ W/m}^2$ e o caixilho devido à condutividade térmica do alumínio apresentar valores mais elevados apresenta uma resistência térmica mais baixa.

Comparativamente aos outros elementos, o vidro duplo (6mm+12mm+6mm) apresenta um declive intermédio, assim como de $U=2,42 \text{ W/m}^2$.

Apesar do elevado coeficiente de transmissão de calor do caixilho, devido à sua área ser bastante inferior à do vidro, o vidro será o elemento que mais contribui para os ganhos de calor para o ambiente interior.

2ª Situação- Amostras termográficas captadas nos três gabinetes

Pela análise teórica da fachada sudoeste verificou-se que, como espectável, o vidro tem uma baixa inércia térmica e um coeficiente de transmissão de calor superior às suas paredes superior e inferior, pelo que a temperatura durante o período diurno aumenta devido a ganhos solares.

Pelas imagens termográficas, é possível compreender essa influência, quando comparadas imagens captadas durante o período diurno. Verificou-se em todos os gabinetes que a variação de temperatura no vão envidraçado entre as 9h30 e as 17h30 é considerável. Como se verifica nas imagens captadas no gabinete de referência (figura 38) a) às 9h30 o envidraçado, apesar de a imagem não estar centrada, o gradiente de temperaturas é bastante diferente apresentando uma temperatura mais baixa, comparativamente à figura b), às 17h30, sendo que às 9h30 o envidraçado apresenta uma temperatura consideravelmente mais baixa quando comparada com a imagem captada às 17h30, pelo que permite constatar a influência dos ganhos solares no aumento da temperatura interior.

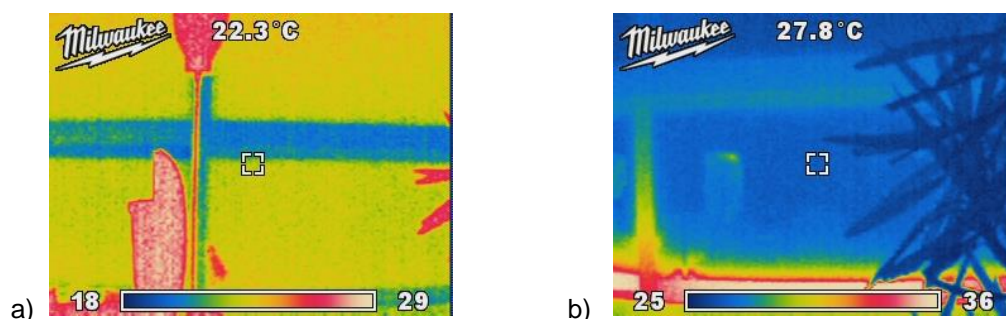


Figura 38 - a) Imagens termográficas envidraçado gabinete de referência: a) captada às 9h30 e b) às 17h30

Contrariamente ao que acontece no vão envidraçado, o chão devido à sua elevada inércia térmica não apresenta uma variação tão significativa de temperaturas entre as 9h30 e as 17h30 (figura 39 a) e b).

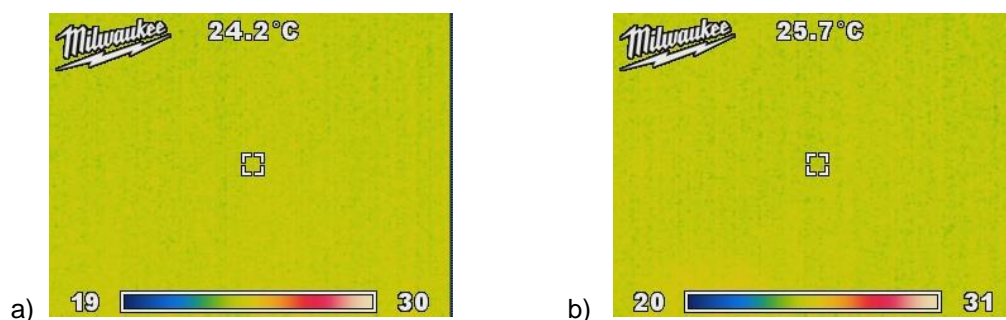
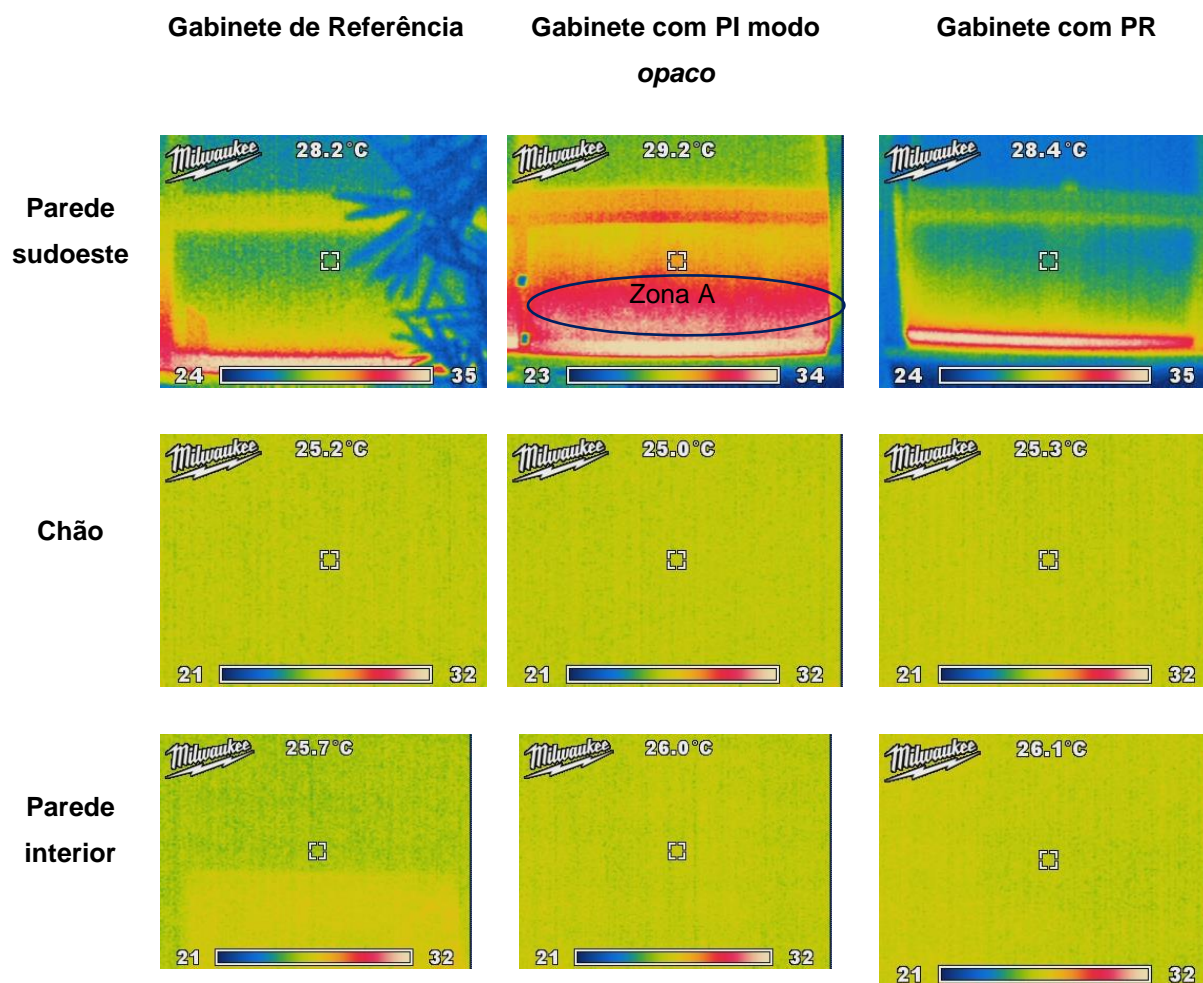


Figura 39- Imagens termográficas chão no gabinete de referência: a) captada às 9h30 e b) às 17h30

Para efeitos de discussão de resultados foram seleccionadas imagens termográficas retiradas às 15h30h pelo facto de os efeitos de transferência de calor e de inércia térmica estarem mais evidentes.

Na tabela 10 encontram-se presentes os resultados mais relevantes, nomeadamente os gradientes de temperatura da parede sudoeste, no chão e nas paredes interiores.

Tabela 10- Imagens Termográficas às 15h30m referentes à parede sudoeste, chão e paredes interiores



Pelas imagens apresentadas anteriormente referentes à parede sudoeste, verifica-se que a caixilharia do vão envidraçado apresenta uma temperatura mais alta comparativamente aos restantes elementos, de acordo com a escala de temperaturas. Essa diferença significativa deve-se essencialmente à alta condutibilidade térmica do alumínio, facto já evidenciado anteriormente no perfil de temperatura apresentado para o mesmo (figura 37).

Por outro lado, verifica-se que a mesma na parte superior apresenta uma temperatura mais baixa devido ao efeito da pala de sombreamento exterior.

Relativamente à temperatura captada no vidro, contata-se que comparativamente ao gabinete de referência apresentou um valor de $-0,2^{\circ}\text{C}$ abaixo da captada na película reflexiva e de mais 1°C na película inteligente no modo opaco, no entanto estas diferenças de leitura de temperaturas encontram-se dentro do intervalo de erro da câmara termográfica, pelo que não permite tirar conclusões.

Porém, note-se que o gradiente de temperaturas presente na imagem termográfica captada ao vão envidraçado no gabinete com película inteligente no modo opaco é bastante diferente das captadas no gabinete de referência e no gabinete com película reflexiva.

O gradiente de temperatura na zona A (ver figura tabela 10) da PI no modo opaco é consideravelmente mais elevada quando comparada com a mesma zona nos gabinete de referência e com a PR. Considera-se que este aumento de temperatura se deve ao seu alto coeficiente de opacidade pelo que a radiação que penetra o vidro e atinge a superfície da película é absorvida promovendo o seu aumento de temperatura.

Relativamente ao chão e às paredes interiores, verifica-se pelas imagens captadas e pela ausência de variações cromáticas que as temperaturas são uniformes contrariamente ao que acontece à parede com o vão envidraçado. Devido à sua elevada inércia térmica estas envolventes armazenam energia e devido ao baixo coeficiente de transmissão térmica, comparativamente ao vão envidraçado estas envolventes têm uma temperatura mais baixa.

3ª e 4ª Situações- Impacto da Película inteligente (modo opaco 3ª situação e modo transparente 4ª situação) e da Película reflexiva no conforto térmico comparativamente à utilização de Vidro duplo

No decorrer do trabalho experimental não foram calculadas as propriedades óticas finais da implementação das películas ao vidro duplo (6mm+12mm+6mm), pelo que os resultados apenas serão discutidos com base na informação disponibilizada pelos respetivos fabricantes.

As temperaturas interior e exterior variam de acordo com a irradiância, sendo por isso perceptíveis temperaturas interiores e exteriores elevadas quando ($G \neq 0 \text{ W/m}^2$). Contudo, verificou-se pelas temperaturas interiores registadas nos ensaios experimentais que ocorre um atraso no pico de temperatura interior, comparativamente ao pico de irradiância (G). Este atraso deve-se essencialmente à elevada inércia térmica dos gabinetes, mais concretamente pela influência do teto e do chão que permitem uma elevada capacidade de armazenamento de energia, sendo que durante o período noturno ($G=0 \text{ W/m}^2$) a temperatura interior não diminui tão significativamente como a temperatura exterior pela libertação de energia armazenada nas suas envolventes ao longo do dia para o espaço interior.

Na 3ª situação, presente na figura 40 seguidamente apresentada, na qual foram monitorizadas as temperaturas e humidades relativas interiores no gabinete de referência, no gabinete com a película inteligente no modo opaco e no gabinete com a película reflexiva durante dois dias, com uma irradiância média de 366 e 379 [W/m^2], onde a temperatura mínima e máxima exterior registadas no decorrer do ensaio foram 15,8°C e 30,1°C respetivamente e a temperatura média exterior 19,7°C constatou-se que o gabinete de referência apresentou uma temperatura ligeiramente superior aos restantes.

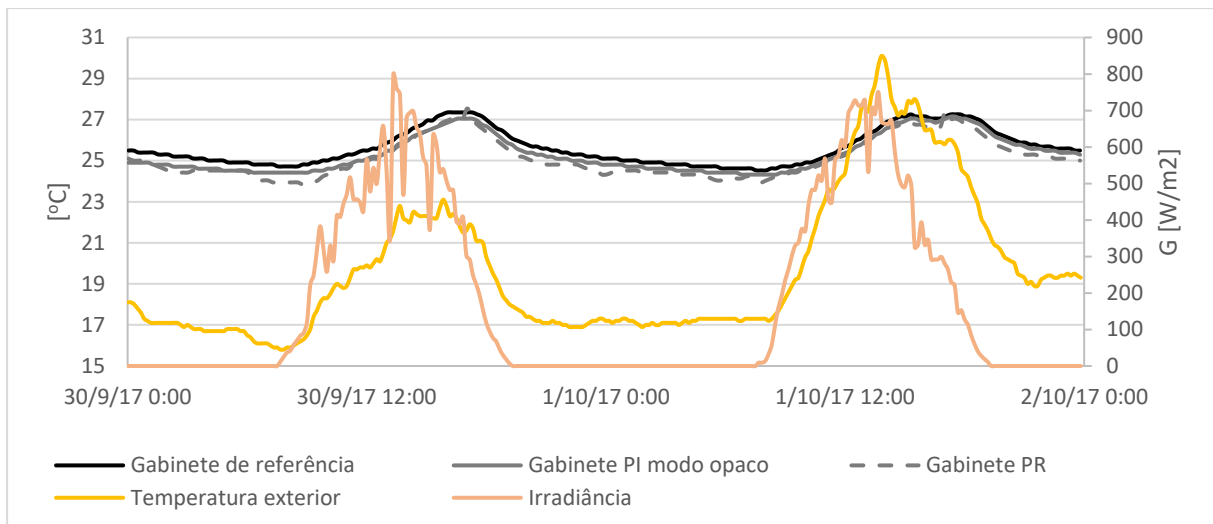


Figura 40- 3ª Situação- Temperaturas interiores nos gabinetes de referência, com PI modo opaco e PR; temperatura irradiância exteriores

Apesar de ser importante a diminuição de temperaturas face ao gabinete de referência por fim a diminuir a necessidade de arrefecimento de espaço, é igualmente importante entender de que forma as películas impactuam no conforto térmico.

De acordo com a zona de conforto de verão (ASHRAE *STANDART 55-2017*) e por aproximação ao gráfico HR (%) e (T) presente na figura 1, é importante analisar os dados obtidos de humidade relativa e temperaturas interiores em cada um dos gabinetes em análise. Dessa forma, pela análise da figura 41 seguidamente apresentada, verifica-se que as humidades relativas interiores encontram-se entre os 35-55% e que, pelas temperaturas e humidades relativas interiores registadas nos três gabinetes para a situação descrita, o gabinete de referência encontra-se dentro da considerada zona de conforto térmico. O gabinete com a película reflexiva apresenta variações mais instáveis, assim como apresenta valores fora das delimitações da zona de conforto.

O gabinete com a película inteligente comparativamente ao gabinete de referência, apesar de os valores de temperatura e de humidade relativa serem ligeiramente diferentes, apenas se encontram fora da zona de conforto durante as primeiras horas da manhã do segundo dia de ensaio.

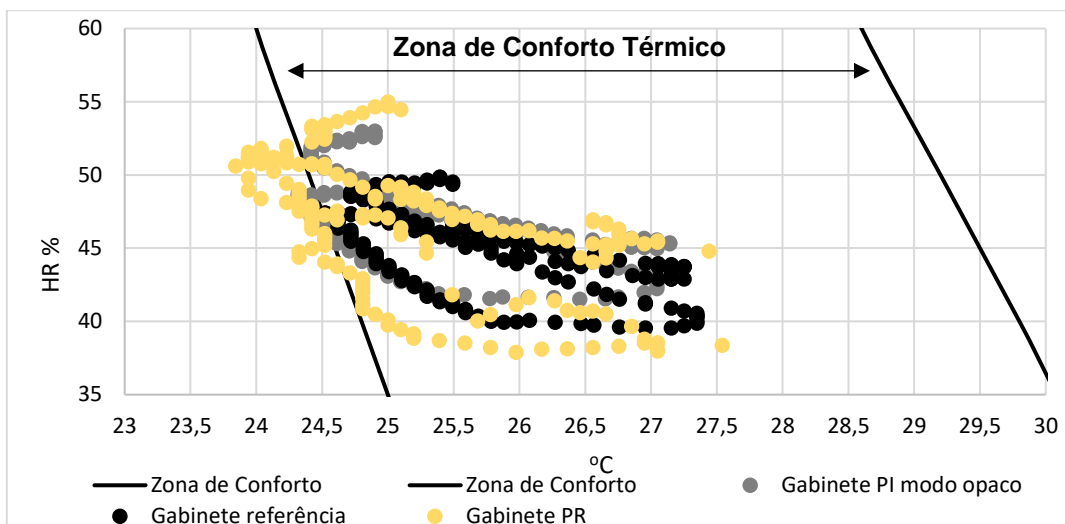


Figura 41- 3ª Situação- Zona de conforto dos gabinetes em estudo

Nesta 3ª situação, verifica-se que comparativamente ao gabinete de referência que a PR possibilitou um decréscimo máximo de $-0,972^{\circ}\text{C}$ às 8:47 do dia 30/09/2017 (I) e de $-0,585$ às 7:47 do dia 1/10/2017 (II), como mostra a figura 42. A PI modo opaco também apresenta, ainda que superior, um decréscimo em horas relativamente próximas (desfasagem de 1h) de $-0,493^{\circ}\text{C}$ no dia 30/09/2017 (I) e de $-0,3^{\circ}\text{C}$ no dia 01/10/2017 (II).

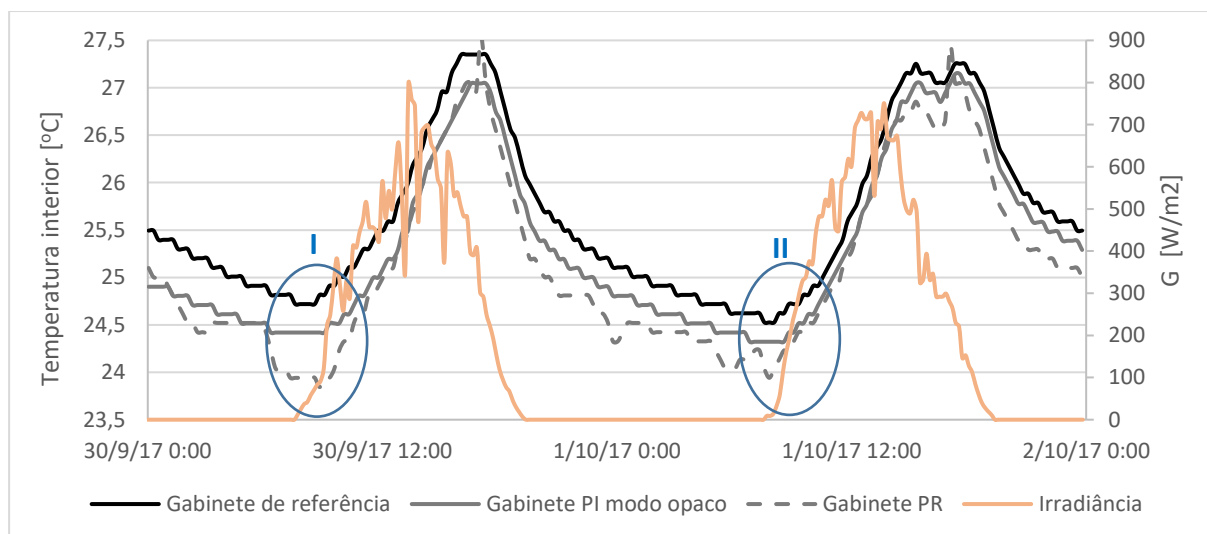


Figura 42- 3ª Situação: Variações de temperatura no interior dos gabinetes, temperatura exterior e irradiância

Por fim a entender a variação de temperaturas interiores que ocorre por influência das películas utilizadas (figura 42), verifica-se que a temperatura no interior do gabinete onde foi colocada a película inteligente no vidro duplo mantém mesma a evolução que o gabinete de referência, contudo no gabinete com a película reflexiva a evolução é ligeiramente mais instável essencialmente durante o período noturno.

A temperatura do gabinete de referência é sempre superior aos restantes, à exclusão de dois momentos onde é perceptível que a temperatura no gabinete com PR é mais elevada ($+0,2^{\circ}\text{C}$ e $+0,28^{\circ}\text{C}$ dia 30 e 1 respetivamente) sofrendo um decaimento seguidamente.

Para que seja possível relacionar os ganhos associados à entrada de radiação, os resultados obtidos serão diferenciados os períodos diurnos.

Analisando os períodos diurnos desta 3ª situação em análise verifica-se que, no dia 30/09 cuja irradiância média foi inferior ($G=366 \text{ W/m}^2$) e T_{ext} média de $19,9^\circ\text{C}$ a utilização das películas comparativamente ao gabinete de referência possibilitou no caso da PR uma redução média de $-2,2\%$ da temperatura interior e no caso de PI no modo opaco de $-1,5\%$ que corresponde respetivamente a $-0,56^\circ\text{C}$ e $-0,4^\circ\text{C}$ e no dia 01/10, cuja irradiação média foi ligeiramente superior ($G=379 \text{ W/m}^2$) e a T_{ext} média $24,03^\circ\text{C}$ verificou-se uma redução média no gabinete com PR de $-1,4\%$ que corresponde a $-0,37^\circ\text{C}$ e com a PI no modo opaco de $-0,9\%$ correspondente a $-0,23^\circ\text{C}$.

Na tabela 11 encontram-se presentes para a 3ª situação durante os períodos diurnos, comparativamente ao gabinete de referência a maior diferença, a menor diferença e a média de temperaturas interiores registadas nos gabinetes. Pela análise dos resultados obtidos verifica-se que o gabinete com a PR apresentou em média uma diferença de temperatura interior de $-0,46^\circ\text{C}$ e com PI no modo opaco uma temperatura média inferior de $-0,31^\circ\text{C}$.

Tabela 11- 3ª Situação Período Diurno-Valores máximo, mínimo e média

3ª Situação- Período Diurno				
	PR	T [$^\circ\text{C}$]	PI modo opaco	T [$^\circ\text{C}$]
Maior Diferença	-3,9%	-0,97	-2,0%	-0,50
Menor Diferença	1,1%	0,29	-0,4%	-0,11
Média	-1,8%	-0,46	-1,2%	-0,31

Apesar de o ensaio para a 3ª situação, ter sido realizado apenas durante dois dias o mesmo deveu-se ao facto de o registo de temperaturas interiores ter sido realizado durante o mês de agosto de 2017 (figura 42), sem ocupação, equipamento elétrico e AVAC desligado, assim como portas e janelas fechadas, se ter verificado que nestas condições o comportamento da curva de temperaturas interiores era sempre o mesmo.

Em primeira análise, pela apresentação de apenas 7 dias do referido ensaio na figura 43, verifica-se que ainda que a escala de temperaturas seja de $0,2^\circ\text{C}$ não se verifica diferença acentuadas de temperaturas entre os três gabinetes. Contudo pela análise, mais pormenorizada, constata-se que o gabinete com a PR, tem praticamente durante todo o decorrer do ensaio a sua temperatura interior superior ao gabinete de referência, embora num valor bastante reduzido $0,11^\circ\text{C}$.

Apesar da PR alterar a transmitância do vidro, o fator solar, assim como possibilitar a rejeição de comprimentos de onda da radiação UV e IV, segundo a literatura estas películas têm tendência a absorver e a refletir a radiação IV para o espaço interior, melhorando a retenção de calor (Lourenço, 2016).

No mesmo período o gabinete com a PI no modo opaco, apenas obteve uma temperatura média inferior ao gabinete de referência de $-0,09^\circ\text{C}$. Contudo, após uma análise mais detalhada verifica-se que o gabinete com PI regista uma diferença máxima de temperatura de $-0,405^\circ\text{C}$. Note-se que durante as horas de radiação solar a PI pelo bloqueio de entrada de radiação possibilita valores de temperatura

inferiores às registadas no gabinete de referência, embora durante o período noturno, apresente valores de temperatura extremamente próximo deste, assim como tem tendência a diminuir mais lentamente a temperatura devido ao facto da PI contribuir devido à sua espessura como isolante.

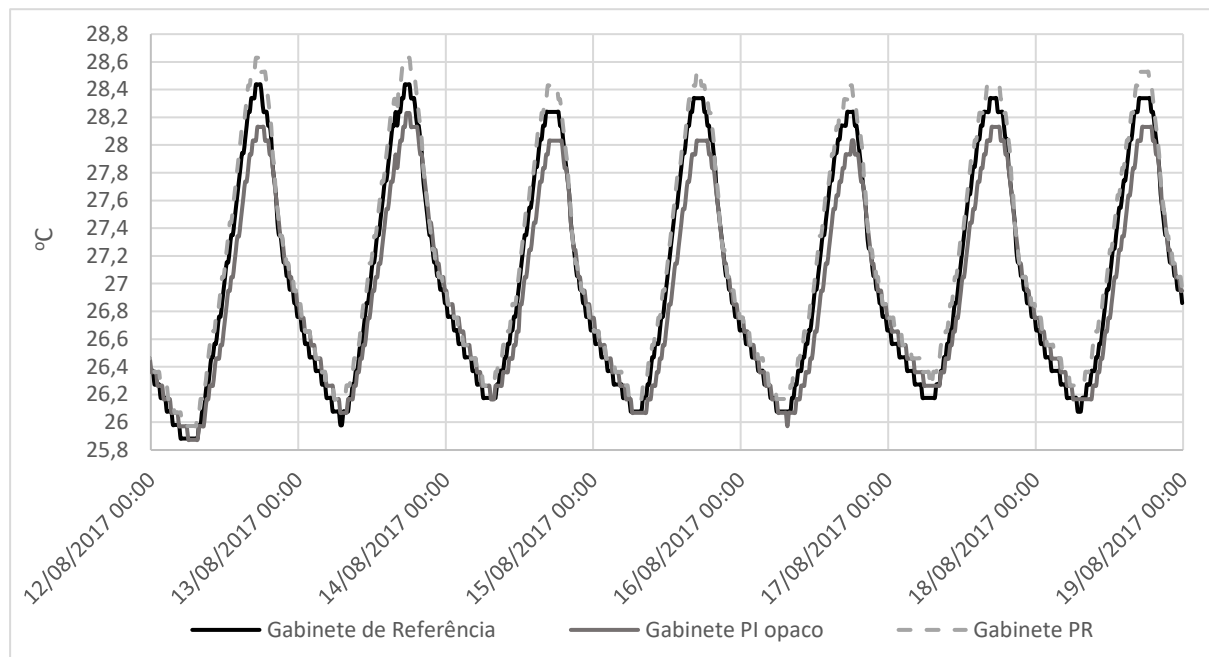


Figura 43- Temperaturas interiores mês de agosto 2017 no gabinete de referência, gabinete com PI opaca e gabinete com PR

Na 4ª situação foram novamente monitorizadas as mesmas variáveis no interior dos gabinetes (figura 44), assim como a G e T_{ext} , contudo nesta situação a película inteligente permaneceu no modo transparente.

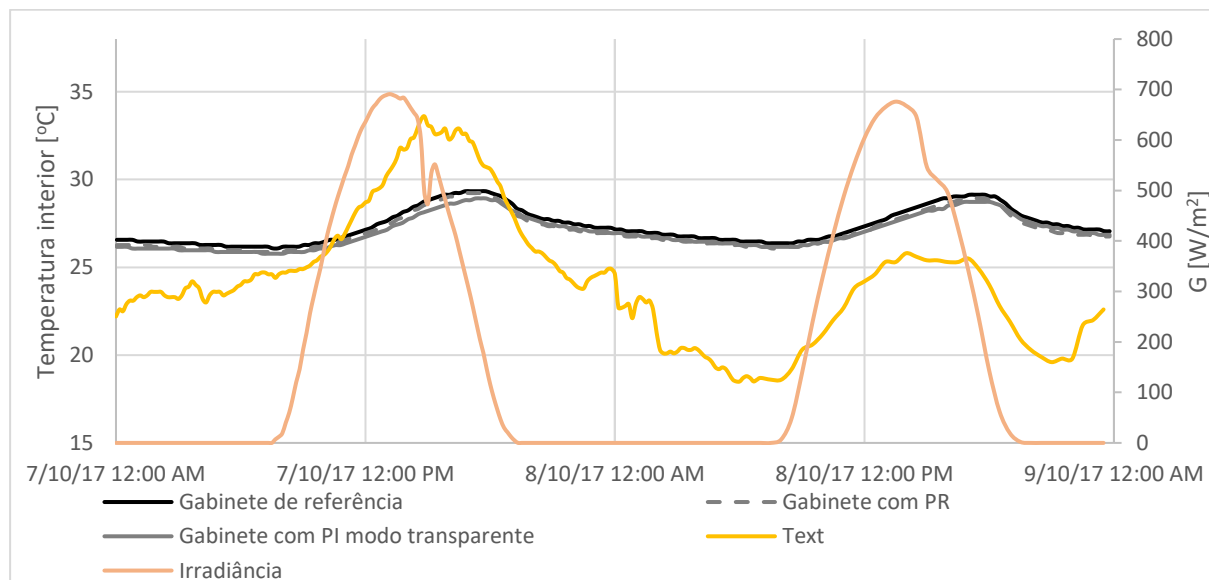


Figura 44- 4ª Situação-Temperaturas interiores nos gabinetes de referência, com PI modo transparente e PR; temperatura irradiância exteriores

Comparativamente à 3ª situação, verifica-se que na presente situação a irradiância apresentou uma maior estabilidade com valores médios de 391,81 e 371,71 [W/m²] para os dias 7/10 e 8/10, uma

temperatura exterior média de 24,08 °C, máxima de 33,6 °C e mínima de 18,5°C, o que favoreceu o aumento de temperatura no interior dos gabinetes. Note-se que igualmente à 3ª situação ocorre um atraso nos picos de temperatura interior dos gabinetes, face à irradiância, sendo justificado pela elevada inércia térmica dos mesmos como anteriormente mencionado e abordado.

O facto de as condições exteriores serem diferentes da 3ª situação é importante novamente entender se a humidade relativa e a temperatura interior dos gabinetes se encontram dentro da zona de conforto recomendada.

Como se verifica pela figura 45 seguidamente apresentada, os gabinetes encontram-se dentro da zona de conforto térmico. Apesar de terem sido registadas temperaturas elevadas, a humidade interior é baixa, compreendida entre 30-45% pelo que a sensação de conforto é maior.

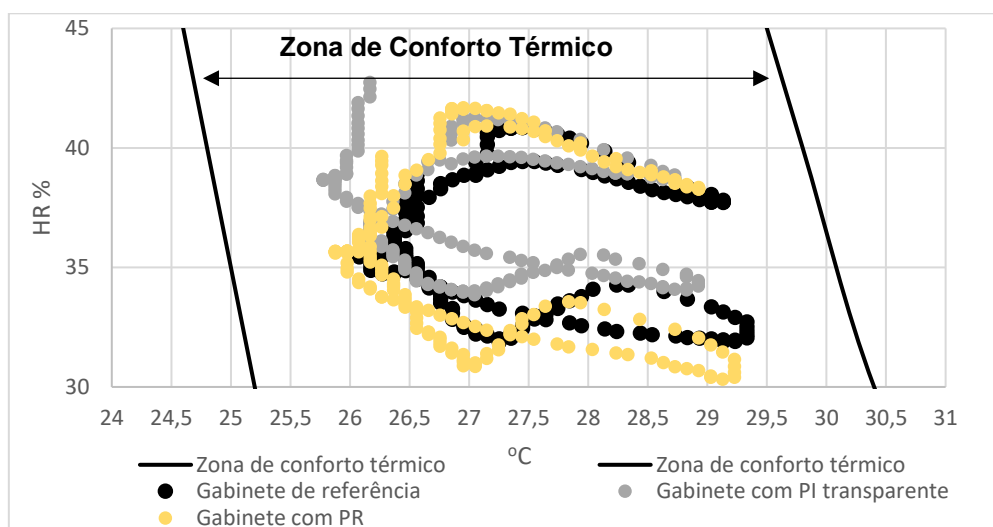


Figura 45- 4ª Situação- Zona de conforto dos gabinetes em estudo

Na presente situação o gabinete de referência também apresentou de um modo geral uma temperatura interior sempre superior às obtidas no gabinete com a PI no modo transparente e no gabinete com a PR.

Verificou-se que comparativamente ao gabinete de referência, o gabinete com a PI no modo transparente apresentou um decréscimo máximo de -0,61°C na sua temperatura interior, curiosamente à hora onde ocorre a máxima perpendicularidade dos raios solares com o envidraçado para os dois dias, momentos evidenciados na figura 46, próximo das 15h30 e o gabinete com a PR, um decréscimo máximo de -0,51°C.

Em termos de temperaturas interiores médias durante o período diurno obtido na 4ª situação, a temperatura do gabinete com PR apresentou valores em média de -0,21 °C e o gabinete com a PI no modo transparente -0,41 °C no dia 07/10 onde a temperatura média exterior 29,2 °C e no dia 8/10 de 23,4 °C obtiveram-se valores médios de -0,27°C no gabinete com PR e de -0,33°C no gabinete com PI no modo transparente comparativamente ao gabinete de referência.

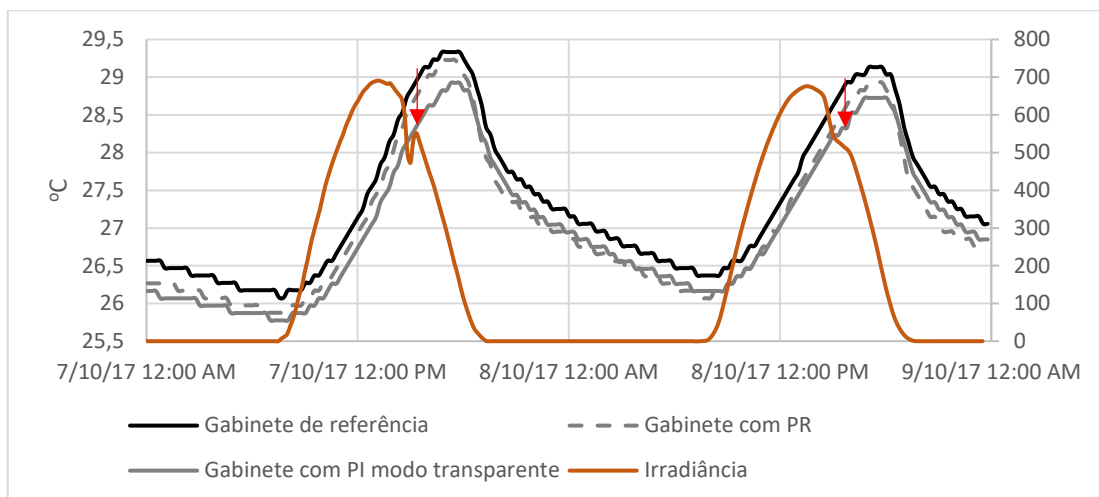


Figura 46- 4ª Situação- Variações de temperatura no interior dos gabinetes, temperatura exterior e irradiância

Na tabela 12 encontram-se presentes para a 4ª situação durante os períodos diurnos, comparativamente ao gabinete de referência a maior diferença, a menor diferença e a média de temperaturas interiores registadas nos gabinetes. Pela análise dos resultados obtidos verifica-se que o gabinete com a PR apresentou em média uma diferença de temperatura interior de $-0,24^{\circ}\text{C}$ e com PI no modo opaco uma temperatura média inferior de $-0,39^{\circ}\text{C}$.

Tabela 12- 4ª Situação Período Diurno-Valores máximo, mínimo e média

4ª Situação- Período Diurno				
	PR	T [°C]	PI modo transparente	T [°C]
Maior diferença	-1,8%	-0,50	-2,1%	-0,61
Menor Diferença	-0,4%	-0,11	-0,7%	-0,21
Média	-0,9%	-0,24	-1,4%	-0,39

Apesar de os efeitos das películas nas temperaturas interiores dos gabinetes terem sido bastante reduzidos é importante entender de que forma as mesmas possibilitam a diminuição da necessidade de arrefecimento do espaço interior.

Com base nas figuras 41 e 45, referentes às zonas de conforto térmico, no caso de ser estabelecido um valor de $T=27^{\circ}\text{C}$ como *set point* para a necessidade de arrefecimento do espaço durante os períodos de ocupação (8h-20h), verifica-se que na 3ª situação o gabinete de referência registou temperaturas acima deste valor durante mais 4,5 horas que os restantes gabinetes, assim como na 4ª situação durante 6,5 horas, pelo que se conclui que a utilização de PR e da PI promoveram uma menor necessidades de arrefecimento comparativamente ao gabinete de referência.

O facto de a composição química das películas ser bastante diferente não é possível a sua comparação, mas sim as temperaturas interiores de cada gabinete serem comparadas com as obtidas no gabinete de referência. No entanto, a espessura da película reflexiva é bastante reduzida ($75\ \mu\text{m}$), pelo que a alteração no coeficiente de transmissão térmica do vidro é praticamente desprezável, contudo a película inteligente com 0,5mm de espessura altera o coeficiente de transmissão térmica do vidro, conferindo-lhe uma maior resistência. Porém a não disponibilização da condutividade térmica do material e para a metodologia adotada o valor de U não pode ser medido.

Atendendo às propriedades óticas apresentadas pelos fabricantes das películas utilizadas esperava-se que pela utilização da película inteligente a temperatura no interior do gabinete fosse mais reduzida, isto porque, segundo o fabricante a película inteligente possui um fator solar (g_{\perp}) bastante inferior ($g_{\perp} = 0,1$) ao da película reflexiva ($g_{\perp} = 0,57$). Contudo o fabricante não faz distinção entre o (g_{\perp}) da película inteligente entre os dois modos de operação este que, devido à alteração de transmitância poderá na prática ter uma variação. Além disso o valor de g_{\perp} é dado para 950 nm, pelo que, além da sua implementação no vidro alterar este valor, a variação de comprimentos de onda irá igualmente modificá-lo.

Além do anteriormente mencionado e ainda segundo os dados do fabricante, a película inteligente permite >99% de bloqueio de radiação UV e 90% de IV, valores estes superiores aos da película reflexiva a qual apresenta um bloqueio de radiação UV de 92% e 35% para radiação IV. Note-se que a radiação IV é normalmente associada ao aumento de temperatura, pelo que também seria espectável que a temperatura no gabinete com a película inteligente fosse inferior, comparativamente quando utilizada a película reflexiva.

Apesar de pelos resultados obtidos se verificarem diferenças bastante reduzidas note-se que a análise experimental se centra em temperaturas obtidas nos gabinetes com uma área 13,14 m², cujas películas apenas cobrem 1,75m², correspondente a 37,76% da área envidraçada. Além disso, na realidade as películas não estão totalmente aplicadas sob a superfície do vidro, uma vez que isso iria comprometer o reaproveitamento das películas para estudos futuros. Embora embora bastante reduzida, existe uma camada de ar entre as películas e o vidro que poderá resultar num aumento de temperatura.

Conclui-se, portanto, que de facto a sua utilização pode possibilitar uma melhoria na temperatura interior, assim como reduzir a necessidade de arrefecimento do espaço, contudo seria importante remeter a mesma análise para uma maior área de implementação das películas, assim como para períodos correspondentes à estação de inverno.

4.2. Influência das películas no conforto visual dos gabinetes

5ª Situação- Influência de placas de cor cinzenta na iluminância de gabinete

Pela análise da figura 47 verifica-se que, para as 14:00h, onde existe uma maior perpendicularidade entre a entrada de luz solar e o vão envidraçado do gabinete, os valores de iluminância obtidos no gabinete 2N.16.20, apesar de serem da mesma ordem de grandeza são relativamente inferiores quando comparados com os obtidos no gabinete de referência.

No gabinete de referência para os pontos 2,3 e 4 como esperado os valores de iluminância são bastante idênticos devido a essa perpendicularidade, não se afastando os valores obtidos da sua média, contrariamente ao que acontece no gabinete em análise, podendo dever-se às placas de cor cinzenta que se encontram suspensas no teto do gabinete. A coloração cinzenta tem uma emissividade mais baixa que a cor branca levando a que haja um ligeiro decréscimo na quantidade de luz captada pelo luxímetro.

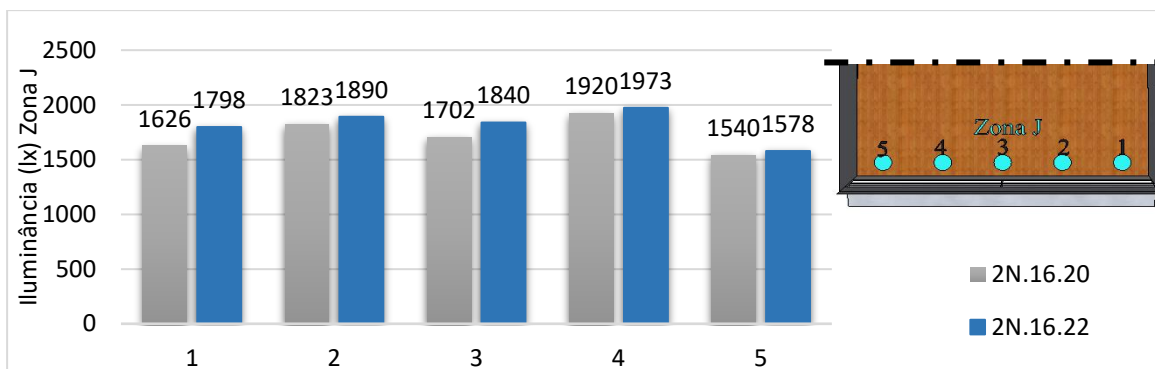


Figura 47- Influência da diferença de mobiliário nos valores de iluminância obtidos no dia 14 de julho às 14:00

Como anteriormente referido, existe influência das placas suspensas verificada durante todo o ensaio, sendo importante quantificá-la, para que seja perceptível o impacto da película inteligente nos valores de iluminância.

Assim foi analisada a redução e/ou aumento dos valores de iluminância no caso de presença das mesmas. Como tal, na figura 48, é possível observar que ao longo de todo o ensaio a presença de placas contribuí para uma redução dos valores de iluminância, à exceção do valor obtido durante a hora da tarde para o ponto 1.

Em média verificou-se uma redução nos valores de iluminância de 11,54% para as 10:00h, de 5,15% para as 14:00h e de 3,15% para as 16:00h, sendo dessa forma considerado para efeitos de cálculo que a presenças de placas contribui em 6,61% na redução dos valores de iluminância obtidos, valor este, utilizado para corrigir futuros valores de iluminância adquiridos para o gabinete.

Apesar desta análise ter sido apenas realizada para a zona J, considerou-se que os valores também poderiam ser corrigidos igualmente na zona de trabalho.

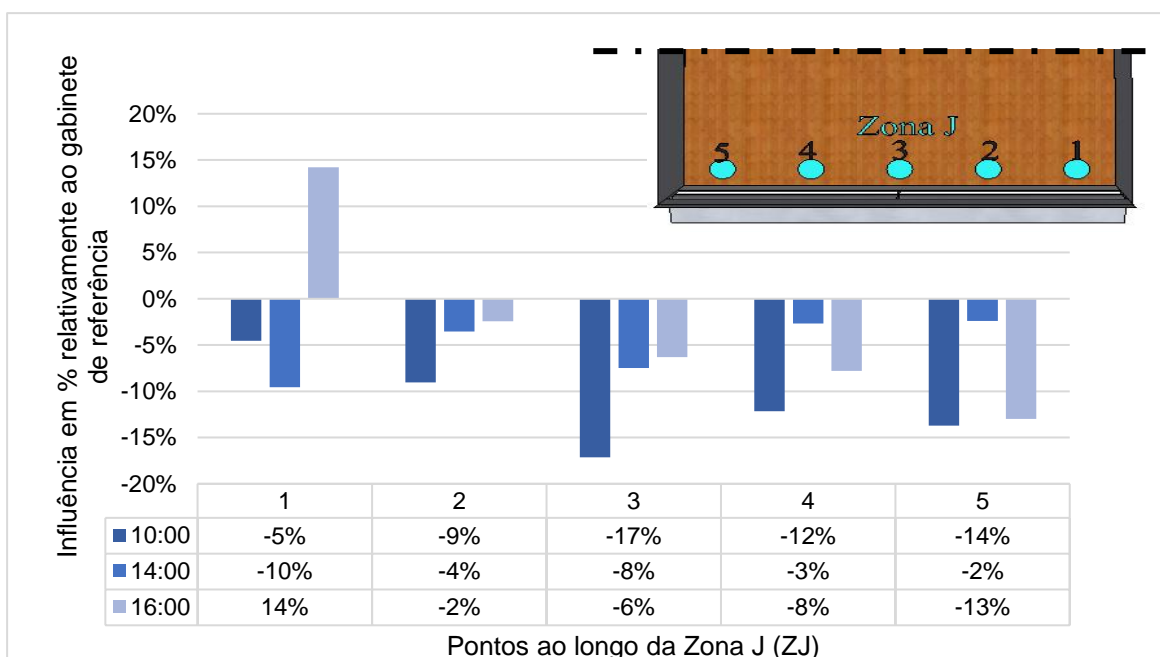


Figura 48- Influência de placas cinzentas no gabinete 2N.16.20 para 3 horas diferentes ao longo do dia

6º Situação e 7º Situação- Impacto da Película inteligente no modo opaco e no modo transparente e da película reflexiva no conforto visual comparativamente à utilização de Vidro duplo (Gabinete de referência- Radiação essencialmente direta e Radiação essencialmente difusa

Para que fosse diminuído o erro referente à presença de placas cinzentas, foi adicionado o erro de 6,61% estimado na 5ª situação à iluminância obtida no gabinete com película inteligente nos valores registados.

Atendendo aos resultados obtidos na 6ª situação para o gabinete de referência (figura 49) constata-se o problema evidenciado na motivação desta dissertação, visto que existe excesso de radiação junto à janela cujos valores são bastante elevados na ordem dos 3000 lx e na zona de trabalho causando desconforto visual ao utilizador.

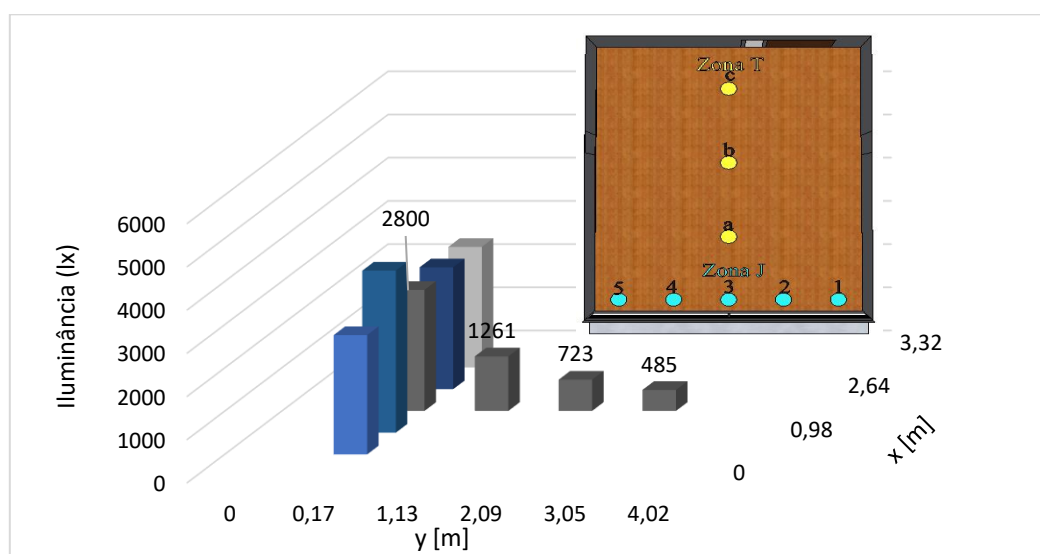


Figura 49- Iluminância no gabinete de referência na ZJ e ZT- Radiação essencialmente direta

Note-se que, como espectável, à medida que se distancia perpendicularmente ao vão envidraçado (ZT) ocorre redução de iluminância perceptível nos resultados obtidos.

Segundo a norma ISO 8995 (2002) o valor de iluminância em escritório deve ser de 500 lx. Em termos de valores médios de iluminância (E_m) para a zona de trabalho (ZT) dos gabinetes em questão, no gabinete de referência, o valor obtido foi de 823 lx na presença de radiação direta, o que corresponde a um valor 65% superior ao recomendado (500 lx).

Por forma a simplificar a análise de resultados na figura 50 seguidamente apresentada, encontram-se apresentadas as variações de iluminância registadas nos gabinetes com películas comparativamente às registadas no gabinete de referência. Os valores de iluminância registados nos gabinetes com películas, na presença de radiação essencialmente direta, podem ser consultados com mais detalhe no anexo II.

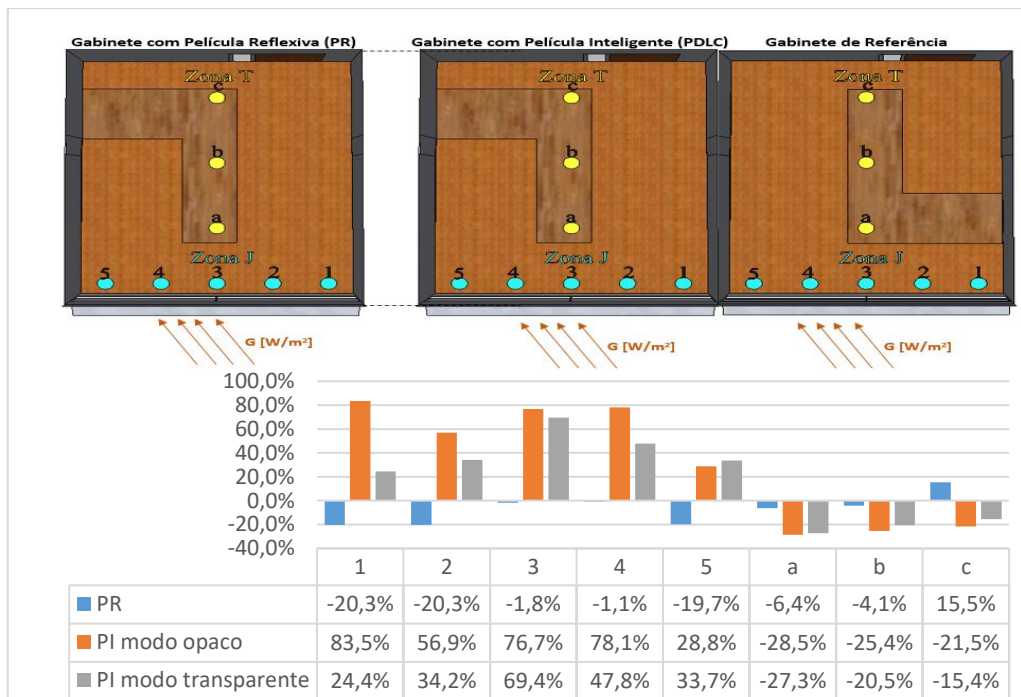


Figura 50- Variações de iluminância nos gabinetes com películas comparativamente ao gabinete de referência- Radiação Direta

Em primeira análise verifica-se que pela utilização da PR a iluminância reduz na ZJ e na ZT, contudo verifica-se um aumento, que poderá estar associada a reflexões do local. Por sua vez, a película inteligente (PI) opaca ou transparente na ZJ aumenta significativamente os valores de iluminância e na ZT possibilita uma redução. Salienta-se ainda pela sua análise que quando a PI se encontra opaca os valores registados são bastante superiores aos registados em modo transparente.

Na 7ª Situação, verifica-se no gabinete de referência valores de iluminância na ZJ bastante elevados, causando desconforto, contudo na ZT verificam-se valores significativamente mais reduzidos que os verificados na presença de radiação essencialmente direta sendo a média de iluminância na zona de trabalho bastante próximo do recomendável 547 lx, como se verifica na figura 51.

Os valores de iluminância registados na ZJ e ZT nos gabinetes com películas, na presença de radiação essencialmente difusa, podem ser consultados com mais detalhe no anexo III.

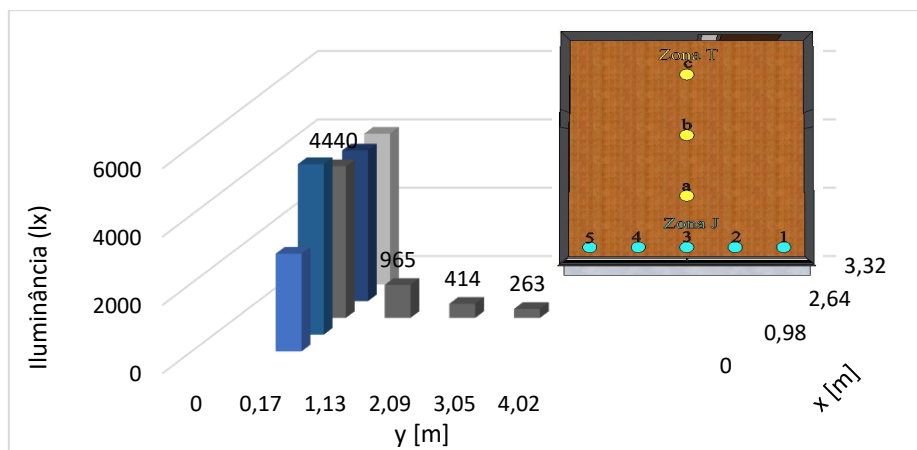


Figura 51- Iluminância no gabinete de referência na ZJ e ZT- Radiação essencialmente difusa

Em primeira análise verifica-se que contrariamente ao registado na situação de radiação direta, quando na presença de radiação difusa, a película inteligente possibilita uma redução de iluminância quer em modo opaco ou transparente (figura 52). Assim como a película reflexiva possibilita um aumento de iluminância.

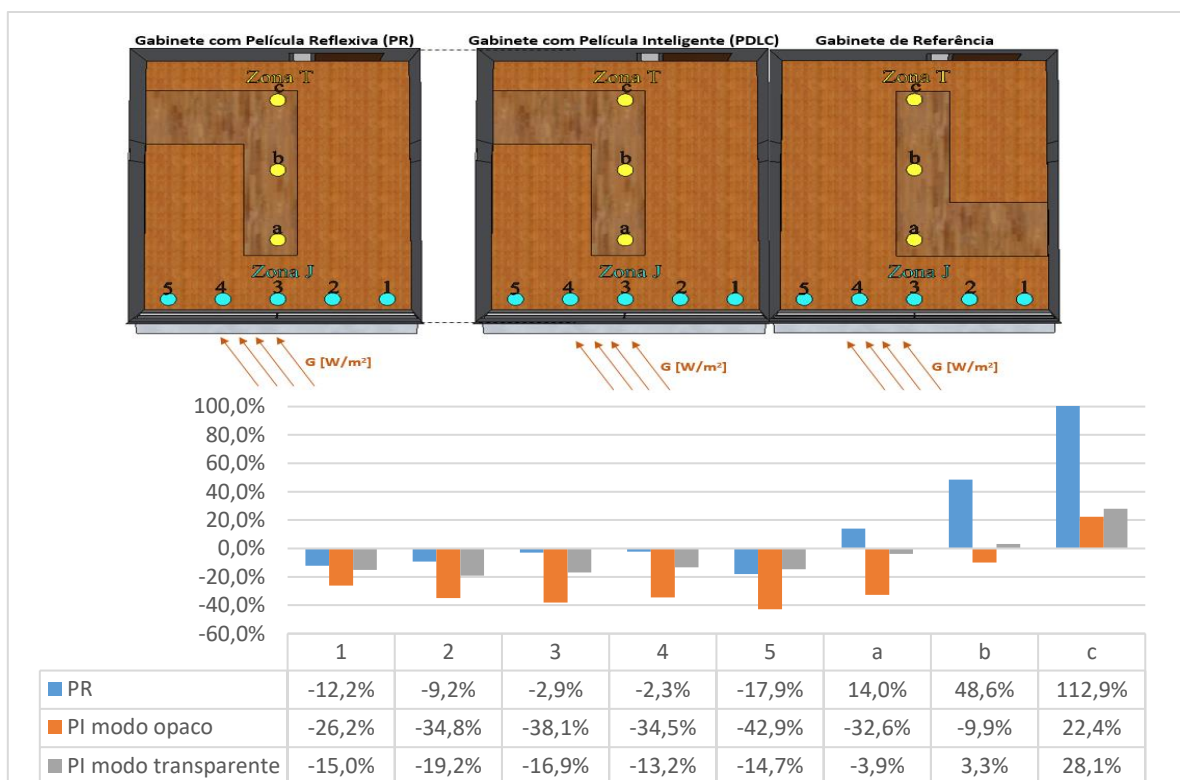


Figura 52- Variações de iluminância nos gabinetes com películas comparativamente ao gabinete de referência- Radiação Difusa

Para uma melhor interpretação dos registos obtidos para as duas situações (radiação direta e radiação difusa) na figura 53 é possível verificar o impacto de cada película na iluminância média registada para cada zona de análise (ZJ e ZT), comparativamente ao gabinete de referência.

Note-se mais uma vez que as situações foram registadas em dias diferentes para que estivessem presentes as condições meteorológicas pretendidas, assim como a diferentes horas. No entanto,

considerou-se pertinente a apresentação conjunta dos resultados por se tratarem de comparações face ao gabinete de referência.

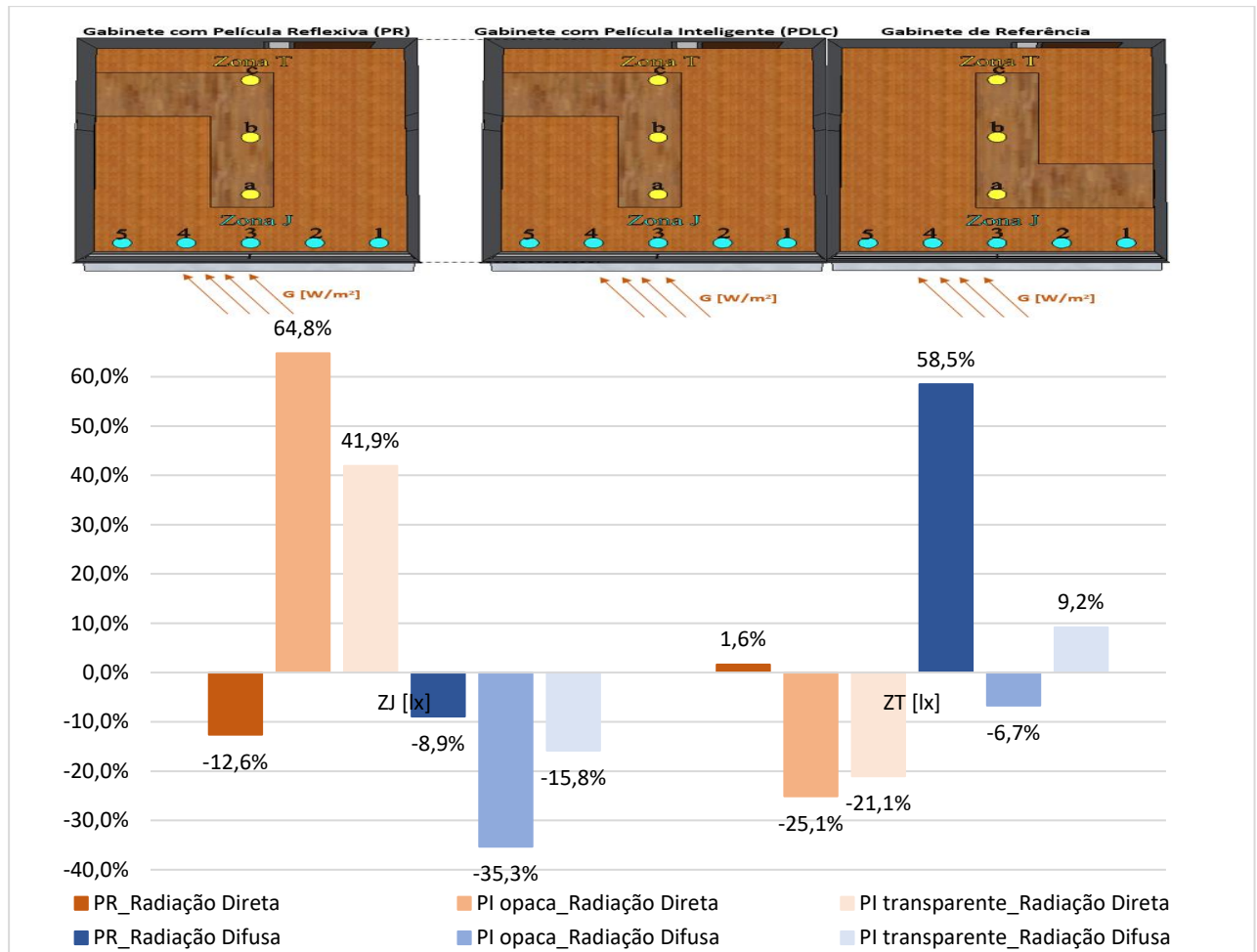


Figura 53- Radiação Direta Vs Radiação Difusa na ZJ e ZT

Pela análise da figura 53, anteriormente apresentada, no dia de radiação essencialmente direta, como esperado a PR apesar de ser transparente possibilita na ZJ uma redução média de -12,6% de iluminância e na ZT uma redução de -1,6%

Comparativamente à PR, a película inteligente na ZJ, tem um impacto bastante diferente, já que ao invés de uma redução possibilita um aumento de iluminância nos dois modos de operação. Quando opera a PI se encontra transparente, verificou-se um aumento de iluminância de 41,9% e quando PI opaca de 64,8%. A PI tem um impacto bastante perceptível visualmente na iluminância verificada na ZJ. Ainda que, não fosse este o efeito desejável, pois o excesso de brilho acaba por criar desconforto visual, este deve-se à dispersão da radiação. Note-se que o efeito opaco é causado pelo desalinhamento dos cristais existentes provocando a dispersão da luz, verificando-se na prática esse efeito teórico, sendo que ocorre um espalhamento na luz no gabinete diminuindo sombreamentos. Para que a película inteligente fique transparente ocorre alinhamento dos cristais, pela aplicação de tensão que, pelos resultados obtidos, ainda que não seja tão acentuado causa dispersão da luz levando ao aumento da iluminância nesta zona de estudo.

Relativamente à zona de trabalho, este tipo de película, apesar de ser principalmente destinada para privacidade, possibilita a redução de luz. Quando a PI está opaca, onde $\tau = 9\%$ permite uma redução de -25,1% e quando transparente $\tau = 81\%$ permite um decréscimo de -21,1% dos valores de iluminância.

Contrariamente ao apresentado anteriormente, quando na presença de radiação difusa, na ZJ a implementação das películas contribuiu para uma redução média de -8,9% (PR), -35,3% (PI opaca) e -15,8% (PI transparente). Note-se que na ausência de radiação direta a PI não apresenta o fenómeno de espalhamento da luz para o interior do gabinete.

Na ZT a PR apresentou um aumento bastante considerável na iluminância presente no gabinete comparativamente ao gabinete de referência, podendo dever-se a reflexões, ou à instabilidade da radiação difusa no momento da amostra.

Para este tipo de radiação a PI opaca promove igualmente a diminuição de iluminância sentida na zona de trabalho (ZT) comparativamente à ausência de qualquer película aplicada no vidro. Embora não tenha sido verificada uma diferença tão significativa quando na presença de radiação essencialmente difusa, foi obtida igualmente uma redução de -6,7% para PI opaca, contudo quando ocorre alinhamento dos cristais líquidos apenas ocorre um aumento de 9,2% da iluminância na ZT.

Devido à sua transparência películas (PR e PI transparente) achou-se pertinente a comparação dos valores de iluminância obtidos visto que, apesar desse facto, têm materiais com propriedades óticas diferentes. Verifica-se que na presença de radiação direta a PI contribui para um aumento de 62,8% na ZJ e um decréscimo de -21,8% na ZT. Quando na presença de radiação difusa, a PI torna-se mais eficaz e permite reduções de iluminância na ZJ de -8% e -25,6% na ZT.

Por fim a entender o impacto das películas comparativamente ao gabinete de referência é importante ter em consideração a análise anteriormente realizada. Contudo, a obtenção de valores mais altos ou mais baixos não possibilita uma resposta direta quanto ao conforto visual do ocupante do espaço.

Dessa forma é importante, com base nos registos da zona de trabalho (ZT) e segundo a norma ISO 8995 (2002) analisar a uniformidade, assim como determinar a iluminância média registada.

Relativamente à uniformidade da iluminância apurou-se que pelos valores obtidos na zona de trabalho, não é atingido o valor mínimo presente na norma (0,70), correspondente à relação entre a iluminância mínima na zona de trabalho e a média neste local. Quando na presença de radiação direta. Contudo, pela utilização da PR o valor é ligeiramente abaixo (0,69), pelo que dos 4 casos de estudo é o valor mais próximo do estabelecido, sendo a uniformidade de iluminância comprometida no gabinete de referência com um valor de 0,59. Salieta-se assim, o facto de, apesar de a uniformidade não estar presente nos gabinetes para a presente situação, as películas permitem um valor mais próximo do recomendado.

Por sua vez, quando na presença de radiação difusa a uniformidade na zona de trabalho é atingida pela utilização da PR e PI opaca, dado que apresentam valores ligeiramente acima do estabelecido, 0,74 e 0,72 respetivamente.

Relativamente à iluminância média na zona de trabalho o valor recomendado pela ISO 8995 (2002) é 500 lx, por se tratar de um escritório onde as principais tarefas são escrever, ler e processamento de dados.

Pelos registos obtidos na figura 54, verifica-se que na presença de radiação direta, embora não haja muita discrepância pela utilização da película reflexiva, uma vez que diminui apenas -1,5% do valor obtido no gabinete de referência, a utilização da película inteligente possibilitou uma redução significativa de -26,2% e -23% nos valores de iluminância. Ainda que a média dos valores obtidos para a zona considerada, como zona de trabalho, serem acima do valor de recomendado (500 lx), possibilitam valores de 607 lx e 634 lx para o modo opaco e transparente respetivamente.

Apesar de, pelos valores obtidos na 6ª situação a PI permitir uma redução bastante significativa nos valores de iluminância para a ZT, quando na presença de radiação difusa permite uma redução de 10% para a PI no modo opaco, sendo o valor, ligeiramente abaixo do recomendado, contudo aceitável 449 lx. Nesta situação em análise, a PR aumenta significativamente o valor de iluminância em 38,6% face ao gabinete de referência e a PI no modo transparente, ainda que bastante reduzido permite um aumento de 3%. Note-se pelos resultados obtidos que, neste tipo de situação o gabinete de referência não apresenta valores excessivos de iluminância como na situação anterior. Neste caso, pelos resultados obtidos considera-se que o gabinete está próximo do conforto visual.

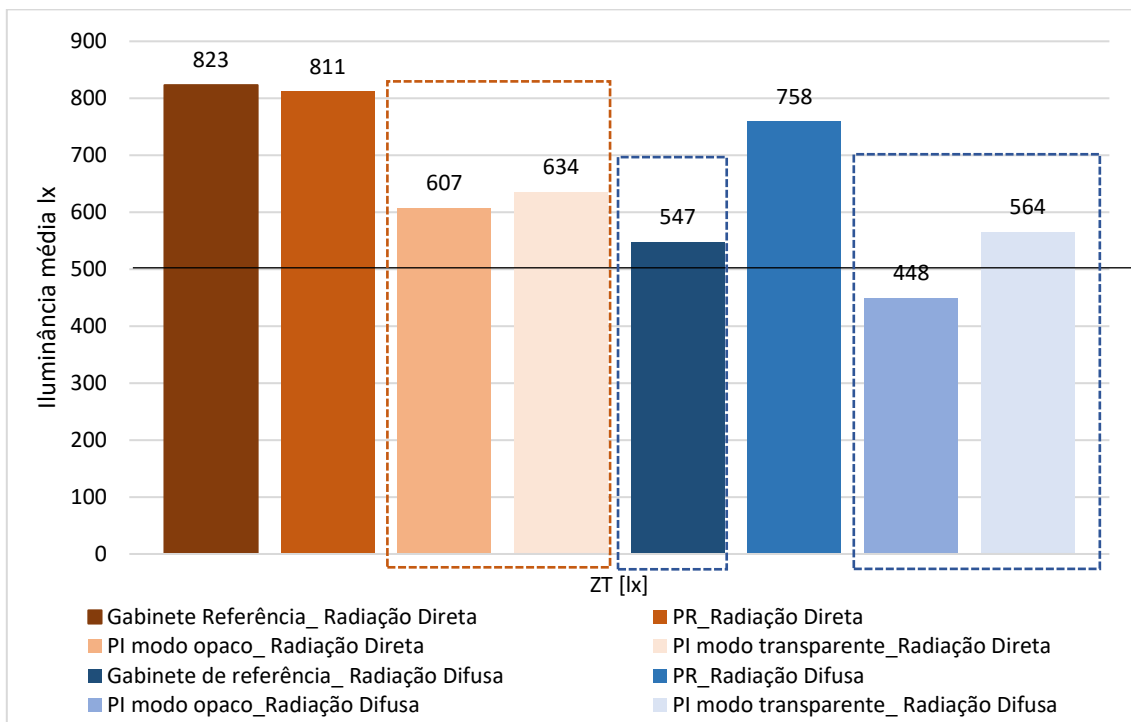


Figura 54- Iluminâncias médias nas zonas J e T -Radiação essencialmente direta (cor laranja) e Radiação difusa (cor azul)

Verifica-se assim que em termos de conforto visual na ZT a película inteligente é bastante vantajosa para o utilizador uma vez que permite o controlo de entrada de radiação pela alteração da sua transmitância, mas também pelo facto de possibilitar um espalhamento da luz no interior essencialmente no modo opaco pela difusão da luz incidente.

Pelos resultados obtidos e pelo anteriormente referido, conclui-se que quando na presença de radiação direta nesta zona de estudo são obtidos valores de iluminância média mais próximos do recomendado quando utilizada a película inteligente, os quais não são atingidos no gabinete de referência ou pela utilização da película reflexiva, sendo que nestes casos haveria necessidade de recorrer a acessórios de sombreamento que acabariam por bloquear a vista para o exterior.

Quando na presença de radiação difusa o gabinete de referência permite condições de conforto visual na ZT próximo do valor recomendado. Pela utilização da película inteligente no modo transparente, a iluminância média na ZT é próxima do recomendado e ligeiramente acima do valor obtido no gabinete de referência. Apesar de no modo opaco da PI a iluminância média ser ligeiramente abaixo, o utilizador terá mais facilidade de se adaptar por se tratar de luz natural.

Por fim, conclui-se que a película reflexiva não permite melhoria significativa, pelo que para garantir o conforto visual do utilizador não é a melhor opção.

5. Conclusão

As películas inteligentes têm propriedades óticas capazes de reduzir custos associado ao arrefecimento e aquecimento, possibilitam alterar a sua transmitância e, portanto, controlar a entrada de ganhos solares.

No presente estudo foram utilizadas dois tipos de películas de forma a alterar as propriedades óticas do vidro duplo existente. A película inteligente aplicada possibilita a variação de transmitância pela aplicação de campo elétrico e a película reflexiva permite apenas a alteração de transmitância fixa.

Embora não tenham sido calculadas as propriedades óticas finais das duas combinações, o que dificulta a justificação dos resultados obtidos e as películas não possam ser diretamente comparáveis dado a sua composição ser bastante diferente, verifica-se pelos resultados experimentais obtidos, que:

Em termos de conforto térmico, as películas permitem, ainda que bastante reduzida ($\Delta T > -1^\circ\text{C}$), a diminuição de temperatura no interior dos gabinetes, assim como diminuir a necessidade de arrefecimento.

Durante o período diurno, constataram-se reduções de temperatura média, comparativamente ao gabinete de referência pela utilização da película reflexiva de $-0,24^\circ\text{C}$ e de $-0,46^\circ\text{C}$ para as duas situações (3ª e 4ª Situação) e pela utilização de película inteligente de $-0,31^\circ\text{C}$ quando no modo opaco e $-0,39^\circ\text{C}$ no modo transparente. Note-se que de um modo geral a maioria das diferenças de temperatura entre os gabinetes correspondem ao erro dos sensores, pelo que, apesar de os sensores terem sido calibrados não há garantias de que durante todos os ensaios realizados não tenham descalibrado, assim como o facto de as películas não estarem na sua totalidade em contacto com o vidro, havendo entre estes, embora bastante reduzida, uma camada de ar que poderá ter promovido o aumento de temperatura.

Contudo, ressalve-se que dada a diferente composição das películas estas não podem ser comparadas entre si, assim como as situações concebidas para a análise têm diferentes condições ambientais exteriores. Apesar das diferenças de temperaturas não serem significativas estamos perante uma área de $1,75 \text{ m}^2$ de películas, correspondente a 37,76% da área envidraçada.

Contudo, em termos de conforto visual é mais evidente o impacto da película inteligente e da película reflexiva com proteção solar. A película inteligente pela sua alteração de transmitância permite uma melhoria no conforto visual interior, já que, apesar do aumento significativo de iluminância na ZJ, quando na presença de radiação direta devido a efeitos de dispersão da luz apresenta melhorias de iluminância significativas na zona de trabalho do utilizador de $-26,2\%$ no modo opaco e -23% no modo transparente permitindo uma aproximação do valor recomendável para o tipo de espaço e atividade (500 lx), assim como proporciona uma melhor distribuição da luz no espaço interior e uma diminuição de sombreamentos.

Quando na presença de radiação essencialmente difusa, a película inteligente possibilita uma redução significativa na ZJ considerada, comparativamente ao gabinete de referência quer no modo opaco ou transparente. Embora o gabinete sem qualquer película aplicada no envidraçado não apresente

problemas significativos de iluminância na zona de trabalho, uma vez que é ligeiramente acima do recomendado (+9,4%), a PI possibilita ajustar esse valor pela variação de transmitância.

Apesar de a PR, não permitir melhorias significativas de conforto visual, igualmente à película inteligente proporciona uma melhor uniformidade de iluminância comparativamente ao gabinete de referência.

Apesar de em toda a literatura se verificar que a película inteligente é mais direcionada para privacidade, pela análise experimental conclui-se que apresenta vantagens principalmente em termos de conforto visual do ocupante.

6. Trabalhos futuros

- Entender as propriedades óticas finais da junção das películas com o vidro, dado que apenas foram analisados os impactos do seu uso no conforto térmico e visual do utilizador, assim como realizar o mesmo tipo de análise para um maior período de tempo.
- Criação de um sistema que permita a modulação da transmitância da película inteligente através de um *dimmer*;
- Trabalho experimental com utilização de outro tipo de película inteligente, uma vez que se verificou que no local de estudo a película inteligente do tipo PDLC apenas tem benefícios mais evidentes no conforto visual. Verificando as várias características no estado de arte recomenda-se material electrocrómico.
- Comparação de resultados pela utilização da película reflexiva, porém colocada do lado exterior, assim como a utilização de uma película com menor transmitância visível, um menor fator solar e maior capacidade de reflexão.
- Analisar consumos energéticos a longo prazo pela utilização das películas, para diferentes locais e para uma área envidraçada superior.

7. Referência bibliográficas

- Allen, K., Connelly, K., Rutherford, P., & Wu, Y. (2017). Smart Windows—Dynamic Control of Building Energy Performance. *Energy and Buildings*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.093>
- Baetens, R., Jelle, B., & Gustavsen, A. (2010). Solar Energy Materials & Solar Cells Properties , requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings : A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>
- Casini, M. (2015). Smart Windows: Enhancing the energy efficiency of buildings. *International Journal of Civil and Structural Engineering- IJCSE*, 2, 230–238. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-030-9-56>
- CBE Thermal Comfort Tool. (22 de 09 de 2018). Obtido de CBE Thermal Comfort Tool: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- chauvin-arnoux. (2018). Obtido de <http://www.chauvin-arnoux.com/en/actualites/ca-1510-ambient-air-tester>
- Cui, S., Cohen, M., Stabat, P., & Marchio, D. (2015). CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. *Building and Environment*, 84, 162–169. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.11.007>
- Cupelli, D., Nicoletta, F. P., Manfredi, S., Vivacqua, M., Formoso, P., De Filipo, G., & Chidichimo, G. (2009). Self-adjusting smart windows based on polymer-dispersed liquid crystals. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(11), 2008–2012. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.002>
- DeForest, N., Shehabi, A., O'Donnell, J., Garcia, G., Greenblatt, J., Lee, E. S., ... Milliron, D. J. (2015). United States energy and CO2 savings potential from deployment of near-infrared electrochromic window glazings. *Building and Environment*, 89, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.021>
- Faustino, C. (2012). Influência dos Vãos Envidraçados no Desempenho Energético de Edifícios Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico.
- Feng, W., Zou, L., Gao, G., Wu, G., Shen, J., & Li, W. (2016). Gasochromic smart window: Optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.029>
- Figueiredo, R. M. (2014). Estudo da melhoria do desempenho térmico de um edifício pela utilização de envidraçados dinâmicos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Gao, Y., Luo, H., Zhang, Z., Kang, L., Chen, Z., Du, J., ... Cao, C. (2012). Nanoceramic VO 2 thermochromic smart glass: A review on progress in solution processing. *Nano Energy*, 1, 221–246. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2011.12.002>
- Ghosh, A., & Mallick, T. K. (2018). Evaluation of optical properties and protection factors of a PDLC

- switchable glazing for low energy building integration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 176(November 2017), 391–396. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.026>
- Granqvist, C. G. (2015). Recent progress in thermochromics and electrochromics: A brief survey. *Thin Solid Films*. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.02.029>
- Granqvist, C. G. (2016). Electrochromics and thermochromics : towards a new paradigm for energy efficient buildings, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.01.002>
- home.howstuffworks. (s.d.). Obtido de 2017: <http://home.howstuffworks.com/home-improvement/construction/green/smart-window2.htm>
- International Energy Agency (IEA). (2013). Technology Roadmap. Energy efficient building envelopes. Oecd, 68. https://doi.org/10.1007/SpringerReference_7300
- ISO 8995, C. (2002). International Standard Iso 8995, 2002.
- Lampert, C. M. (1998). Smart switchable glazing for solar energy and daylight control. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 52, 207–221. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00279-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00279-1)
- Lampert, C. M. (2003). Large-area smart glass and integrated photovoltaics, 76, 489–499. [https://doi.org/10.1016/s0927-0248\(02\)00259-3](https://doi.org/10.1016/s0927-0248(02)00259-3)
- Laussmann, D., & Helm, D. (2011). Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of air change for indoor air quality, Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality. <https://doi.org/10.5772/1030>
- Lee, S. G., Lee, D. Y., Lim, H. S., Lee, D. H., & Lee, S. (2010). Switchable Transparency and Wetting of Elastomeric Smart Windows. Pohang. <https://doi.org/10.1002/adma.201002320>
- Lemarchand, P., Doran, J., & Norton, B. Smart switchable technologies for glazing and photovoltaic applications, 57 *Energy Procedia* 1878–1887 (2014). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.052>
- Lourenço, D. L. (2016). Estudo Experimental do Desempenho de Envidraçados com Películas. Estudo experimental do desempenho térmico e óptico de envidraçados com películas de controlo solar. Instituto Superior Técnico.
- Milwaukee.(23 de 9 de 2018).Obtido de <https://www.milwaukeeetool.com/Products/Instruments/Thermal-Imaging/2260-21>
- Morin, F. J. (1959). Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature. *Physical Review Letters*, 3(1), 34–36. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.3.34>
- Murray, J., Ma, D., & Munday, J. N. (2016). Electrically Controllable Light Trapping for Self-Powered Switchable Solar Windows. *ACS Photonics*. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.6b00518>
- n-Tech Research. (2017). Obtido de <http://ntechresearch.com/>

- New, M.-B., Sky, M., & Roof, C. S. (2011). RESEARCH FRONTIERS PROVIDES TECHNOLOGY FOR MERCEDES-BENZ' NEW MAGIC SKY CONTROL SPD-SMARTGLASS ROOF Mercedes-Benz.
- Pais, A. (2011). Condições de iluminação em ambiente de escritório : influência no conforto visual. Universidade Técnica de Lisboa, Faculdade de Motricidade Humana.
- Raposo, C. V. (2015). Modelação dos Consumos Energéticos no Pavilhão de Civil do IST e Definição de Medidas de Racionalização dos Consumos Energéticos. Instituto Superior Técnico.
- Rezaei, S. D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26–51. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026>
- Sahraoui, A. H., Delenclos, S., Longuemart, S., & Dadarlat, D. (2011). Heat transport in polymer-dispersed liquid crystals under electric field. *Journal of Applied Physics*, 110(3). <https://doi.org/10.1063/1.3610445>
- Smart Tint. (2018). Obtido de Smart Tint: <http://www.smarttint.com/>
- U.S Department of Energy: Energy Efficiency Renewable Energy. (2017). Obtido de <https://energy.gov/eere/about-office-energy-efficiency-and-renewable-energy>
- Wang, Y., Runnerstrom, E. L., & Milliron, D. J. (2016). Switchable Materials for Smart Windows. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-080615-034647>
- Wen, R. T., Arvizu, M. A., Niklasson, G. A., & Granqvist, C. G. (2015). Electrochromics for energy efficient buildings: Towards long-term durability and materials rejuvenation. *Surface and Coatings Technology*, 278(2015), 121–125. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.047>
- Zawidzki, M. (2015). 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). *Advanced Engineering Informatics*, 29(1), 87–100. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.09.008>

Anexo I- Especificações de janelas inteligentes comercializadas para aplicação em edifícios

Fonte:(Baetens et al., 2010)

Manufacturer	Size (cm ²)	U	T _{sol} (-)	T _{vis} (-)	SF	Cycles
SAGE Electrochromics, Inc. (WO ₃)	108 × 150	1.65	0.40–0.015	0.62–0.035	0.48–0.09	10 ⁵
EControl-Glas GmbH and Co. KG (WO ₃)	120 × 220	1.1	0.50–0.15	–	0.36–0.12	10-year guarantee
		0.5	0.45–0.14	–	0.30–0.10	–
Gesimat GmbH (WO ₃ and CE)	80 × 120	–	0.52–0.06	0.75–0.08	–	10-year guarantee

Figura 55- Dados de janelas electrocrómicas comercializadas para aplicação em edifícios

Manufacturer	Size (cm ²)	U	T _{sol} (-)	T _{vis} (-)	SF	Cycles
Typical values, e.g. <i>SmartGlass</i> , <i>DreamGlass</i> and <i>SGG</i> .	100 × 280	–	ΔT 0.02	ΔT 0.02	–	10 ⁶
Nippon Sheet Glass Co., Ltd.	180 × 275	–	–	0.69–0.12	–	–
Innovative Glass Corporation	260 × 488	1.6	–	0.77–0.56	–	–

Figura 56- Dados de janelas baseadas em cristais líquidos comercializadas aplicadas para aplicação em edifícios

Manufacturer	Size (cm ²)	U	T _{sol} (-)	T _{vis} (-)	SF	Cycles
Typical values, e.g. <i>SmartGlass</i> , <i>American glass products</i> , <i>pletint</i> and <i>innovative glass corporation</i> .	100 × 280	–	0.50–0.04	0.35–0.18	0.50–0.30	10 ⁶
American glass products company	110 × (-)	–	–	0.79–0.49	–	10 ⁵

Figura 57- Dados de janelas baseadas em partículas suspensas comercializadas para aplicação em edifícios

Legenda: Máximo tamanho; U: coeficiente de transmissão de calor W/m²; Modulação da transmissão; SF: fator solar; nº de ciclos (coloração/transparente)

Anexo II- 6ª Situação- Iluminância nos gabinetes- Radiação essencialmente direta

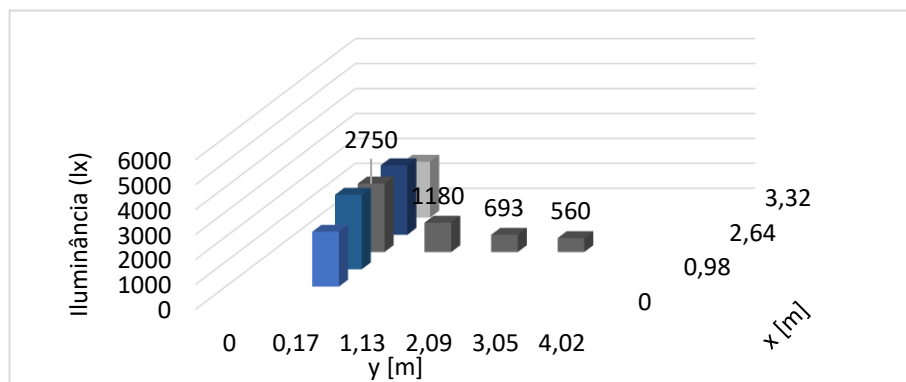


Figura 58- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente direta- Gabinete com película reflexiva com proteção solar (PR)

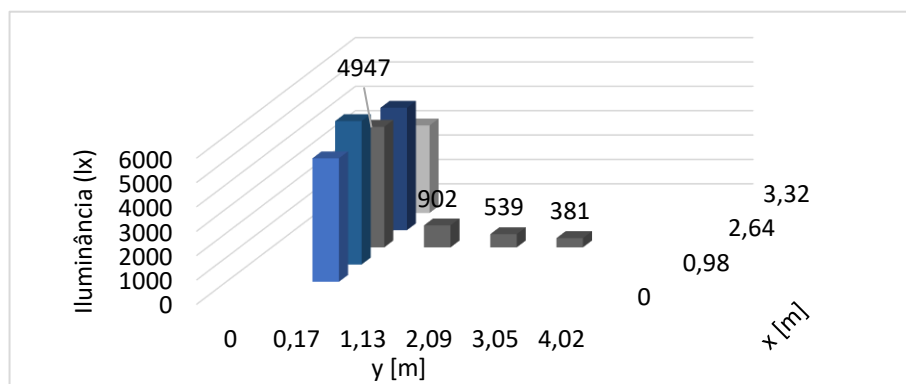


Figura 59- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente direta- Gabinete com película inteligente modo opaco

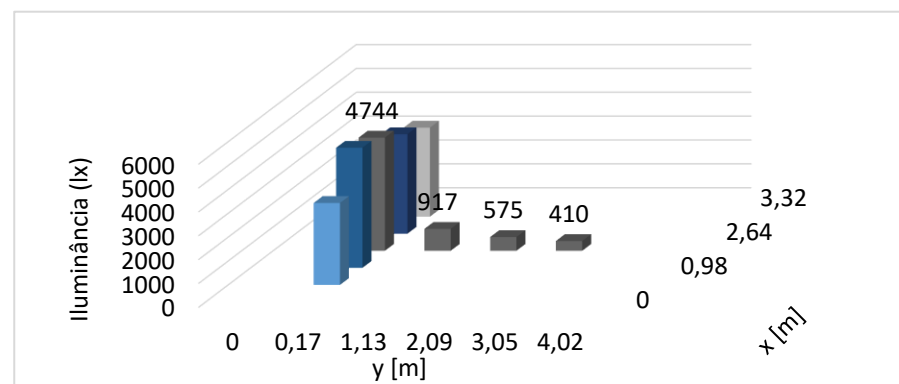


Figura 60- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente direta- Gabinete com película inteligente modo transparente

Anexo III- 7ª Situação - Iluminância nos gabinetes- Radiação Difusa

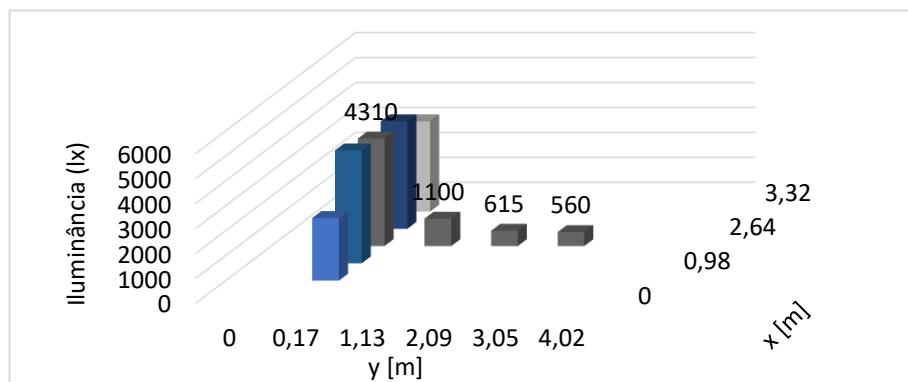


Figura 61- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente difusa- Gabinete com película reflexiva com proteção solar (PR)

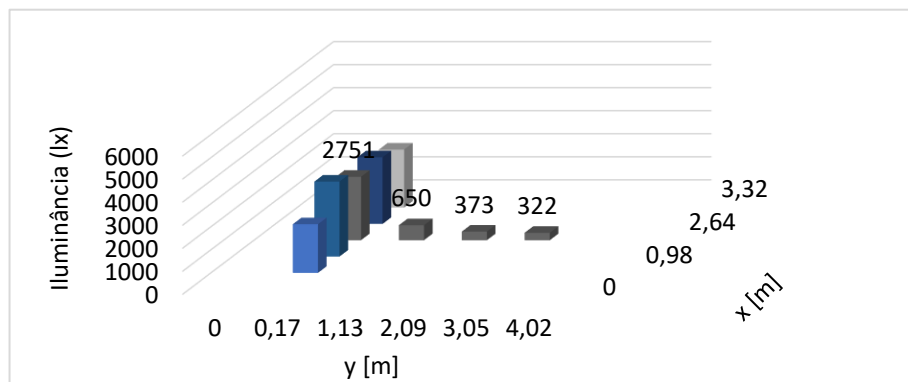


Figura 62- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente difusa- Gabinete com película inteligente modo opaco

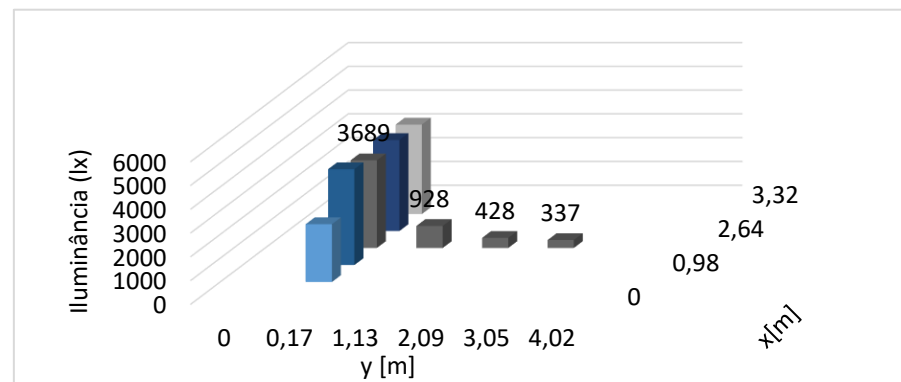


Figura 63- Iluminância ZJ e ZT com radiação essencialmente difusa- Gabinete com película inteligente modo transparente