

## Analise Dinâmica do Desempenho Energético de um Envidraçado Termocrómico em Diferentes Zonas Climáticas de Portugal

### Dynamic Simulation of the Energy Performance of a Thermochromic Glazing Under Different Climate Zones of Portugal

H. Teixeira<sup>a†</sup>, M. Glória Gomes<sup>a</sup>, A. Moret Rodrigues<sup>a</sup>, D. Aelenei<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, DECivil, CERIS, Lisboa, Portugal

<sup>b</sup> NOVA School of Science and Technology, UNINOVA-CTS and LASI, Caparica, Portugal

<sup>†</sup> Autor para correspondência: [henriqueta.teixeira@tecnico.ulisboa.pt](mailto:henriqueta.teixeira@tecnico.ulisboa.pt)

#### RESUMO

Fachadas de edifícios com grandes áreas envidraçadas tendem a promover trocas térmicas significativas que resultam em necessidades energéticas para climatização elevadas. Os envidraçados termocrómicos podem alterar de forma autónoma e reversível as suas propriedades térmicas e óticas dependendo da sua temperatura, promovendo a mitigação de ganhos térmicos e a melhoria de condições de conforto interior e eficiência energética. Este estudo tem como objetivo analisar o desempenho energético de um envidraçado termocrómico instalado num gabinete orientado a sudeste. Para esse fim, foi utilizado um modelo de simulação dinâmica, anteriormente calibrado com dados experimentais, para avaliar o desempenho energético anual do vidro termocrómico comparativamente ao de um envidraçado convencional incolor com e sem uma película refletora de controlo solar. As necessidades energéticas (aquecimento e arrefecimento) e o consumo energético (aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial) foram obtidos para as diferentes soluções de envidraçados nas cidades de Bragança, Lisboa e Faro, representativas de diferentes zonas climáticas de Portugal. Com o envidraçado termocrómico obteve-se uma redução significativa, até 65%, das necessidades energéticas para arrefecimento. Apesar do comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico e da diminuição das condições de iluminação natural do gabinete, foi possível obter uma redução do consumo anual energético total até 50%.

#### ABSTRACT

Highly glazed facades are usually responsible for significant heat exchanges that increase climatization energy needs. Thermochromic glazing, an innovative glazing solution, can autonomously and reversibly alter its properties depending on the temperature of the thermochromic layer laminated between the external glass panes, promoting the reduction of thermal gains and the increase of indoor comfort and energy efficiency. This study aims at assessing the energy performance of a thermochromic glazing against a conventional static glazing with and without a reflective solar control film, considering an individual office room oriented southeast as case study. A dynamic simulation, previously calibrated with experimental data, was used to compute the monthly and yearly energy needs (heating and cooling) and energy use (climatization and artificial lighting) with the different glazing solutions installed in the cities of Braganza, Lisbon and Faro, representative of different climate zones of Portugal. A reduction up to 65% of the cooling energy needs was obtained with the thermochromic glazing. The dynamic behaviour of the thermochromic glazing reduced indoor daylight levels,

#### Palavras-chave:

Envidraçado termocrómico;  
Desempenho energético;  
Simulação dinâmica

#### Keywords:

Thermochromic glazing;  
Energy performance;  
Dynamic simulation

consequently increasing artificial lighting energy use. However, it was possible to achieve a reduction up to 50% of the total energy use (climatization and artificial lighting) with the dynamic glazing.

## 1. Introdução

Por motivos de estética e/ou de otimização de utilização de iluminação natural, as fachadas de edifícios com elevada área envidraçada têm-se tornado um elemento usual em edifícios novos nos últimos anos, particularmente em edifícios de comércio e serviços [1]. Os elementos envidraçados, comparativamente aos elementos opacos, são responsáveis por trocas de calor expressivas entre os ambientes interior e exterior devido à sua transmitância elevada, originando necessidades energéticas para climatização significativas [2].

A utilização, isolada ou simultânea, de diferentes soluções de controlo solar, tais como estores, portadas, palas e películas para vidros, melhora o desempenho dos envidraçados. As películas de controlo solar, compostas por múltiplas camadas de poliéster e adesivos com absorção de radiação ultravioleta, possibilitam o melhoramento do desempenho do vidro ao alterarem as propriedades óticas e térmicas do sistema vidro+película [3], [4]. Apesar destas películas estarem presente no mercado com uma grande variedade de propriedades e de tipos de instalação, estas têm como limitação o facto de apresentarem um comportamento estático que não lhes confere a possibilidade de se adaptarem às condições do ambiente onde se encontram.

Assim, tecnologias inovadoras têm vindo a surgir e a ser investigadas pela comunidade científica com o objetivo de melhorar o desempenho dos envidraçados sob diferentes condições ambientais e de contrabalançar diferentes requisitos de desempenho numa solução de envidraçado singular [5].

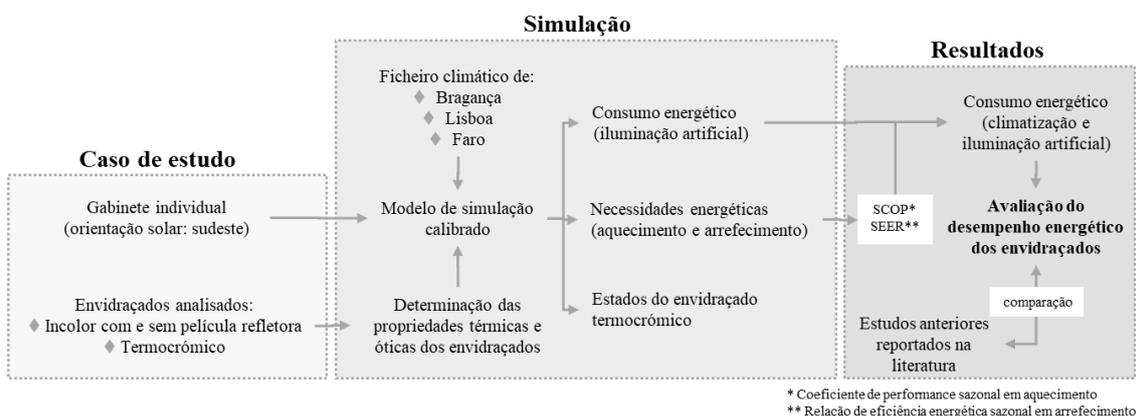
Os envidraçados termocrómicos [6], enquanto solução inovadora de envidraçados dinâmicos passivos, reagem a um estímulo térmico e alteram autonomamente as suas propriedades térmicas e óticas devido à presença de um material termocrómico (TC) laminado. A alteração das propriedades ocorre quando o material TC atinge temperaturas superiores ou inferiores a valores de transição específicos do material em questão, provocando uma reação química que de forma reversível aumenta ou diminui o escurecimento do vidro, respetivamente. O comportamento dinâmico desta solução de envidraçados permite regular os ganhos solares e de iluminação natural de forma autónoma, adaptando as propriedades do envidraçado às condições ambientais. No entanto, este tipo de envidraçado tem uma desvantagem: pode não atingir a temperatura necessária à transição cromática e, assim, não ser ativado o comportamento dinâmico, isto é, não transitar para o estado escurecido.

Estudos anteriores [7-15] que avaliam numericamente o desempenho energético de envidraçados termocrómicos concluem que este tipo de envidraçado promove a redução do consumo e pico energéticos comparativamente a um envidraçado incolor convencional. Esta redução é mais notória considerando climas quentes com níveis de radiação solar elevados, como é o caso do clima de Portugal. A maioria dos estudos anteriores [8-12] analisa envidraçados termocrómicos teóricos ou em fase de protótipo, avaliando o seu desempenho energético através de modelos numéricos de edifícios tipo. O presente estudo pretende complementar a investigação existente ao analisar o desempenho energético de um envidraçado termocrómico disponível no mercado através da simulação da sua instalação num gabinete sob diferentes zonas climáticas de Portugal.

## 2. Métodos

A metodologia adotada no presente estudo encontra-se esquematizada na Figura 1. Um gabinete individual, localizado em Lisboa, foi utilizado como caso de estudo para a avaliação numérica do desempenho energético de um envidraçado duplo TC comparativamente a duas soluções de envidraçados estáticos (envidraçado incolor com e sem película refletora de controlo solar).

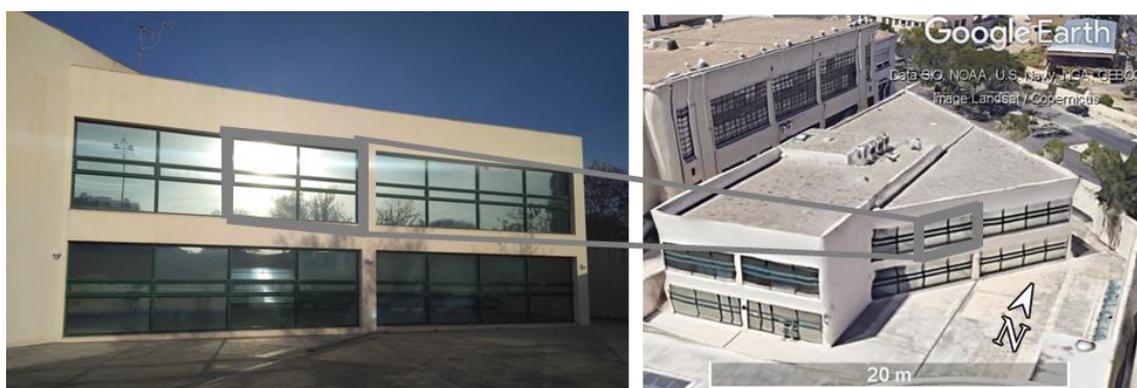
As propriedades térmicas e óticas dos envidraçados foram determinadas com recurso aos programas Optics [16] e Window [17]. Em paralelo, foi também desenvolvido um modelo de simulação energética do gabinete em EnergyPlus, anteriormente calibrado com dados experimentais [18], para estimar as necessidades energéticas anuais (aquecimento e arrefecimento) e o consumo energético anual (climatização e iluminação artificial), em kWh/m<sup>2</sup> (m<sup>2</sup> de área de pavimento), do gabinete na presença das várias soluções de envidraçados. Foram considerados os ficheiros climáticos representativos de diferentes zonas climáticas de Portugal (zona I3 e V2 – Bragança; zona I1 e V2 – Lisboa; zona I1 e V3 – Faro) para avaliar a influência do clima no comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico.



**Figura 1** –Metodologia adotada no presente estudo.

### 2.1. Caso de estudo

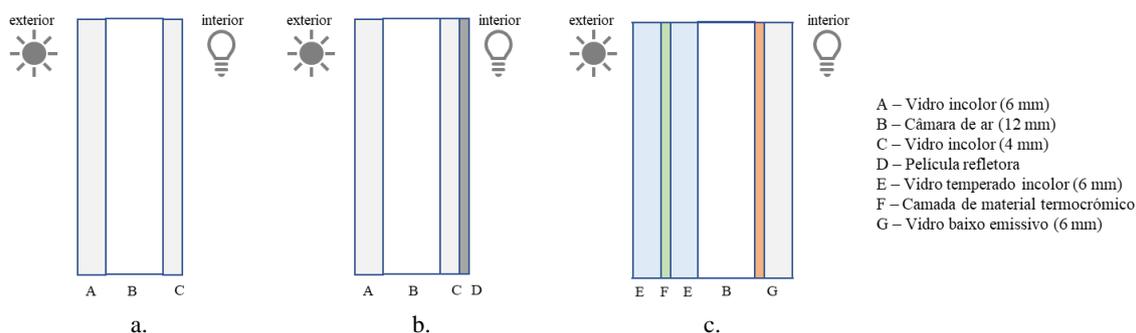
O gabinete do caso de estudo situa-se no último piso de um edifício universitário do Instituto Superior Técnico (Figura 2), Lisboa, e apresenta uma área de pavimento de, aproximadamente, 19m<sup>2</sup> e uma área de envidraçado orientada a sudeste de, aproximadamente, 10,38m<sup>2</sup> (rácio de envidraçado de 81%). Estores venezianos de lâminas metálicas horizontais instalados no interior do gabinete atuam como dispositivos de sombreamento. A climatização do gabinete é realizada por um sistema de ar-condicionado (relação de eficiência energética sazonal em arrefecimento: 7.98; coeficiente de performance sazonal em aquecimento: 4.43) controlado pelo ocupante e com um intervalo de temperatura pré-definido ( $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ). O gabinete é iluminado artificialmente por um candeeiro de teto (110 W).



**Figura 2** –Identificação do gabinete (contorno a cinzento) utilizado como caso de estudo.

As soluções de envidraçados analisadas no presente estudo encontram-se representadas na Figura 3. Os envidraçados estáticos são formados por dois panos de vidro incolor, sem e com uma película de controlo solar refletora, separados por uma câmara de ar (6+12+4 mm). O envidraçado dinâmico, correspondente ao envidraçado termocrómico, é constituído por um vidro TC laminado

e um vidro de baixa emissividade, separados por uma câmara de ar (12+12+6 mm). O envidraçado TC apresenta um comportamento dinâmico entre 5°C (estado transparente) e 95°C (estado escurecido).



**Figura 3** – Configuração dos envidraçados analisados no presente estudo: a. Envidraçado incolor; b. Envidraçado incolor com película refletora; c. Envidraçado termocrômico.

Os valores das principais propriedades térmicas e óticas das soluções de envidraçados analisadas no presente estudo mostram-se na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** O envidraçado termocrômico apresenta valores do coeficiente de transmissão térmica, do fator solar e da transmitância solar inferiores aos dos envidraçados incolores com e sem proteção solar, sendo, por isso, expectável uma redução dos ganhos solares excessivos. No entanto, esta redução pode traduzir-se numa penalização do conforto térmico durante os meses mais frios, em que os ganhos solares são benéficos na atenuação das necessidades de climatização para aquecimento. Contrariamente ao envidraçado incolor com película, que pode penalizar a iluminação natural do gabinete devido à sua transmitância visível reduzida, o envidraçado termocrômico apresenta um intervalo de valores desta propriedade (1% a 49%), tornando-se assim mais versátil. Refira-se ainda que o envidraçado incolor com película de controlo solar e o envidraçado TC bloqueiam 99% da radiação ultravioleta, beneficiando a saúde dos ocupantes e a durabilidade dos materiais no gabinete.

**Tabela 1** – Principais propriedades térmicas e óticas dos envidraçados analisados no presente estudo obtidas a partir do Optics [16] e do Window [17]: coeficiente de transmissão térmica, U; fator solar, g; transmitância solar,  $\tau_{sol}$ ; transmitância visível,  $\tau_{vis}$ ; transmitância ultravioleta,  $\tau_{UV}$ .

Envidraçado	Estado	Temperatura de transição [°C]	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	g [-]	$\tau_{sol}$ [%]	$\tau_{vis}$ [%]	$\tau_{UV}$ [%]
Incolor			2.7	0.75	70	81	51
Incolor com película refletora			2.6	0.39	17	27	1
Termocrômico			1.6				1
	Transparente	5		0.32	19	49	
	Intermédio 1	15		0.31	18	47	
	Intermédio 2	25		0.29	17	43	
	Intermédio 3	45		0.21	10	23	
	Intermédio 4	65		0.13	3	6	
	Intermédio 5	85		0.10	1	1	
	Escurecido	95		0.10	1	1	

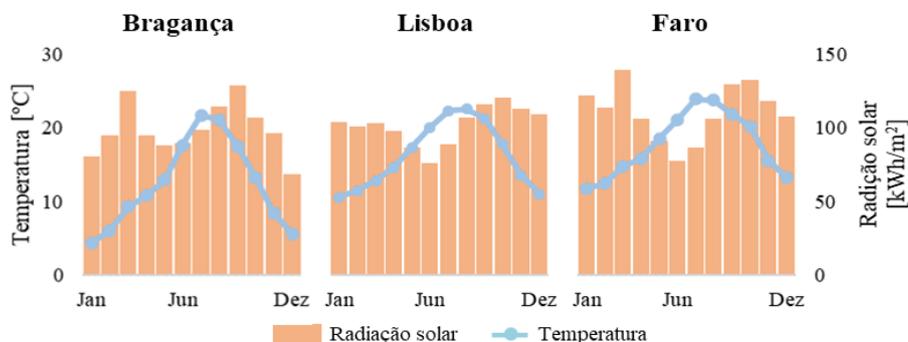
## 2.2. Simulação dinâmica

Para aferir o desempenho energético de diferentes soluções de envidraçados, foi desenvolvido um modelo de simulação do gabinete do caso de estudo, calibrado com dados experimentais [18], recorrendo aos programas SketchUp, OpenStudio e EnergyPlus. Todas as superfícies do gabinete foram consideradas adiabáticas com exceção da parede exterior ( $U = 2.6 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ) e da cobertura

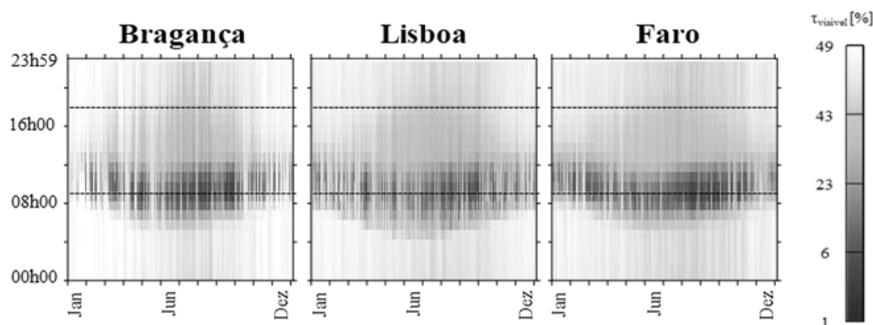
( $U = 0.77 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ). Os estores venezianos não foram considerados na simulação para se isolar o impacto das soluções de envidraçados do impacto do sistema de sombreamento no desempenho energético. O controlo da iluminação artificial na simulação foi realizado através da opção “continuous off”, que permitiu obter as necessidades de iluminação para alcançar as condições de conforto (500 lx na secretária). O sistema de ar condicionado foi considerado como estando em funcionamento durante o horário laboral com um intervalo de temperatura de conforto entre 20 °C e 24 °C. As seguintes variáveis foram selecionadas como output da simulação: estados do envidraçado termocrómico; necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento; consumo energético de iluminação artificial.

Considerou-se o ficheiro climático de três cidades portuguesas (Bragança, Lisboa e Faro) com o objetivo de melhor se compreender a influência do clima no comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico. As três cidades selecionadas são representativas de zonas climáticas de Portugal (zona I3 e V2 – Bragança; zona I1 e V2 – Lisboa; zona I1 e V3 – Faro). A temperatura mensal média exterior e a radiação solar mensal acumulada numa superfície vertical orientada a sul das diferentes cidades mostram-se na Figura 4. A temperatura mensal média exterior das cidades de Lisboa e Faro é semelhante, sendo significativamente superior à da cidade de Bragança nos meses mais frios e de meia-estação. A radiação solar acumulada é superior na cidade de Faro, particularmente durante os meses mais frios.

A Figura 5 apresenta a simulação anual da transmitância visível, em %, representativa do comportamento dinâmico do envidraçado TC para as três zonas climáticas. No período da manhã o envidraçado fica mais escurecido devido ao aumento da temperatura causado pela radiação solar incidente, nunca atingindo o estado totalmente escurecido. Durante o horário laboral, o envidraçado encontra-se normalmente nos estados intermédios de escurecimento 1 a 3. O envidraçado termocrómico encontra-se no estado intermédio 3, correspondente a uma temperatura do material termocrómico entre 25°C e 45°C, durante 33% das horas laborais simulando a sua instalação sob o clima mais fresco da cidade de Bragança. Em contrapartida, o envidraçado dinâmico encontra-se no seu estado transparente durante 43% das horas laborais quando simulado sob o clima quente da cidade de Faro.



**Figura 4** – Temperatura mensal média exterior, em °C, e radiação solar mensal acumulada numa superfície vertical orientada a sul, em kWh/m<sup>2</sup>, das diferentes cidades.



**Figura 5** – Comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico no modelo de simulação ao longo do ano para as diferentes zonas climáticas (linhas a picotado – delimitação do horário

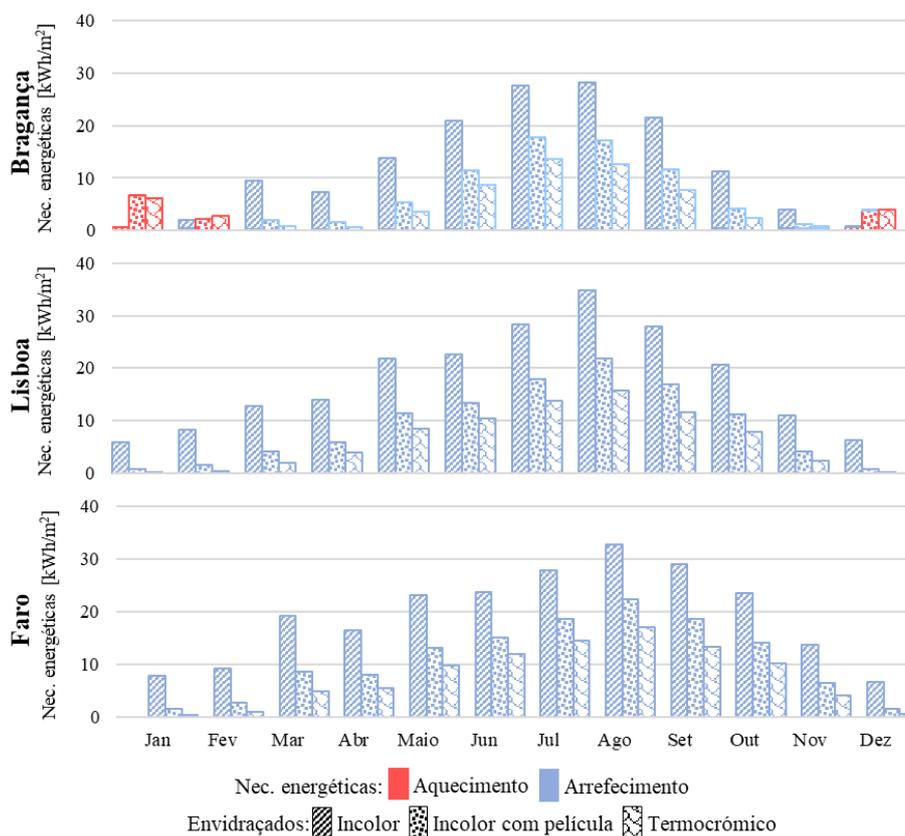
laboral).

### 3. Resultados do desempenho energético do envidraçado termocrómico

As necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento do gabinete foram estimadas pelo modelo de simulação considerando um sistema de ar condicionado ideal.

A Figura 6 apresenta as necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento do gabinete, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, na presença dos vários envidraçados e considerando as diferentes zonas climáticas.

Para cada zona, as necessidades energéticas para aquecimento são inferiores na presença do envidraçado incolor sem película devido ao seu fator solar elevado. Para as cidades de Lisboa e Faro, todos os envidraçados são responsáveis por ganhos solares excessivos todo o ano, que se traduzem em necessidades energéticas para arrefecimento elevadas e necessidades para aquecimento nulas. Apesar do envidraçado dinâmico ter permitido reduzir de modo geral as necessidades energéticas ao longo do ano, considerando as diferentes zonas, a sua transmitância solar e fator solar reduzidos originaram um ligeiro aumento das necessidades para aquecimento nos meses mais frios na cidade de Bragança. As necessidades energéticas para climatização durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro são nulas considerando a instalação do envidraçado TC nas cidades de Lisboa e Faro.

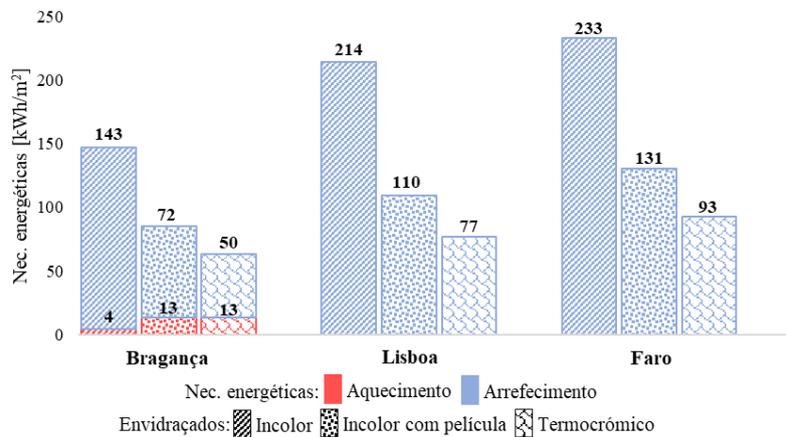


**Figura 6** – Necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

A Figura 7 apresenta as necessidades energéticas anuais, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, para os vários envidraçados considerando as diferentes zonas climáticas.

Apesar de originarem um aumento das necessidades para aquecimento, já referido anteriormente, os envidraçados com proteção solar permitiram reduzir as necessidades para arrefecimento em todas as zonas climáticas, particularmente o envidraçado TC. Uma redução significativa das necessidades energéticas anuais para arrefecimento foi obtida com o envidraçado

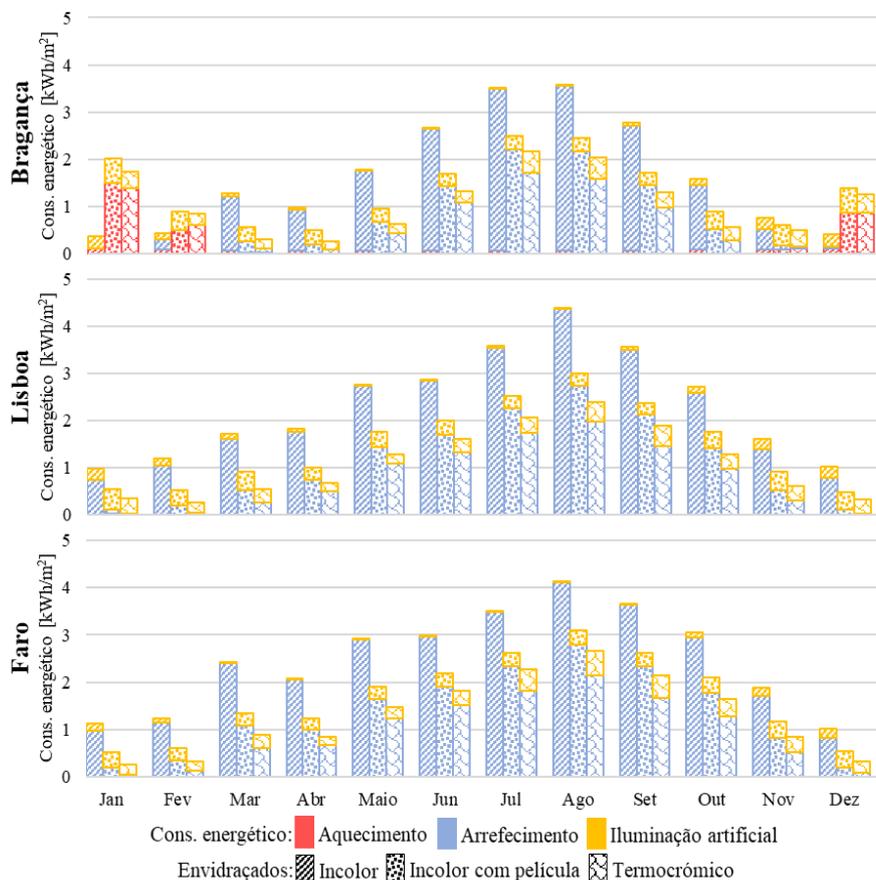
termocrómico em todas as cidades (Bragança – 65%; Lisboa – 64%, Faro – 60%), comparando com o envidraçado incolor sem película.



**Figura 7** – Necessidades energéticas anuais para aquecimento e arrefecimento, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

O consumo energético para climatização foi estimado a partir das necessidades energéticas apresentadas anteriormente e da eficiência do sistema de ar condicionado do gabinete. O consumo energético para iluminação artificial foi estimado pelo modelo de simulação considerando um ponto de referência no centro da secretária e um valor mínimo de iluminância durante o horário laboral de 500 lx.

A Figura 8 apresenta o consumo energético mensal para aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial do gabinete, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, estimado na presença dos vários envidraçados instalados nas diferentes zonas climáticas.

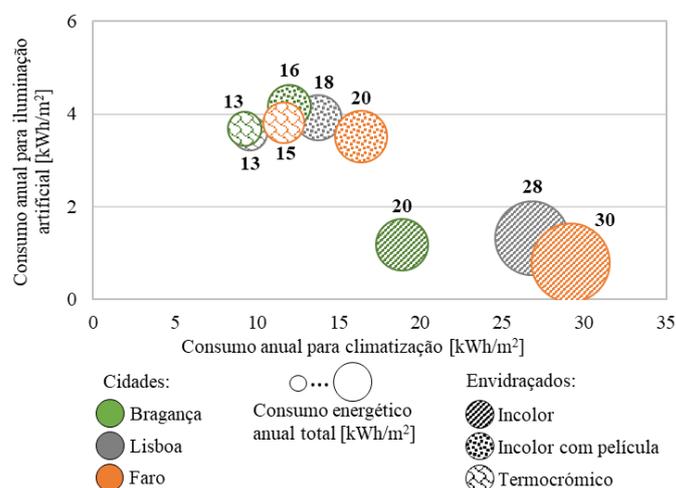


**Figura 8** – Consumo energético mensal para climatização e iluminação artificial, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

O comportamento dinâmico do envidraçado TC permitiu reduzir o consumo energético para arrefecimento ao longo do ano, nas várias zonas climáticas. Devido à sua elevada transmitância, o envidraçado incolor possibilitou a iluminação natural do gabinete nas três cidades, sem ser necessário recorrer-se à iluminação artificial nos meses com níveis de radiação mais elevados (abril a agosto). Por outro lado, os envidraçados com proteção solar originaram um aumento do consumo de iluminação artificial, maioritariamente nos meses com níveis de radiação mais elevados.

A Figura 9 apresenta o consumo energético anual, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, estimado para os vários envidraçados considerando as diferentes zonas climáticas.

Para as várias zonas climáticas, o consumo energético anual para iluminação artificial é inferior ao consumo energético para climatização na presença de qualquer um dos envidraçados. Apesar da radiação incidente variar entre cidades, o consumo energético anual de iluminação artificial é semelhante para um determinado envidraçado sob os diferentes climas. O envidraçado dinâmico originou uma redução do consumo energético total (climatização e iluminação) de 35%, 50% e 47% quando simulado sob os climas de Bragança, Lisboa e Faro, respetivamente, comparando com o envidraçado incolor sem película.



**Figura 9** – Consumo energético anual para climatização e iluminação artificial, em kWh/m<sup>2</sup> de pavimento, para cada envidraçado nas diferentes zonas climáticas.

#### 4. Discussão

O presente estudo complementa a investigação existente ao avaliar o desempenho energético de um envidraçado termocrômico (TC) existente no mercado através de uma simulação dinâmica representativa de um caso de estudo real e calibrada anteriormente com dados experimentais. A análise do desempenho do envidraçado TC considerando diferentes zonas climáticas de Portugal é importante para se compreender o impacto do clima no comportamento dinâmico.

A redução das necessidades energéticas para arrefecimento, particularmente para o clima quente da cidade de Lisboa, foi possível graças à redução dos ganhos solares pelo comportamento dinâmico do envidraçado termocrômico. Contrariamente ao esperado, apesar do clima da cidade de Faro apresentar níveis de temperatura e radiação superiores, a instalação do envidraçado TC nesta zona resultou nas poupanças energéticas para arrefecimento mais baixas.

Ainda que ambos os envidraçados com proteção solar tenham promovido o aumento do consumo energético para iluminação artificial, foi possível alcançar poupanças energéticas totais (climatização e iluminação artificial) significativas com a instalação destes envidraçados nas três zonas climáticas (entre 35% e 50%).

Os resultados obtidos para o desempenho energético do envidraçado TC vão de encontro

aos de estudos anteriores [7-15], chegando a ultrapassar no caso da instalação no clima de Lisboa. Esta tecnologia inovadora tem potencial de aplicação sob o clima de Portugal e, por isso, deverão ser realizados estudos futuros para melhor compreender o seu desempenho, incluindo a nível económico e ambiental.

## 5. Conclusões

Os resultados obtidos através da simulação dinâmica do desempenho energético do envidraçado termocrómico (TC) instalado num gabinete sob diferentes zonas climáticas de Portugal, possibilitaram retirar as seguintes conclusões:

- o envidraçado TC apresentou um maior escurecimento no período da manhã devido à elevada radiação solar incidente na fachada, nunca atingindo o estado totalmente escurecido;
- o envidraçado TC apresentou um melhor desempenho energético do que os envidraçados incolor com e sem proteção solar, considerando as diferentes zonas climáticas;
- o comportamento dinâmico do envidraçado TC permitiu reduzir as necessidades energéticas de arrefecimento, mas originou um aumento das necessidades energéticas de aquecimento e do consumo energético de iluminação natural;
- o envidraçado TC permitiu uma redução do consumo energético anual total (climatização e iluminação artificial) de 35%, 50% e 47% quando instalado sob o clima das cidades de Bragança, Lisboa e Faro, respetivamente, demonstrando que é uma solução eficiente para as várias zonas climáticas de Portugal analisadas no presente estudo.

## Agradecimentos

Os autores desejam expressar o seu agradecimento à unidade de investigação CERIS do IST-ID, Associação do Instituto Superior Técnico para a Investigação e Desenvolvimento e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento da unidade de investigação CERIS (UIDB/04625/2020). Os autores desejam estender o seu agradecimento à empresa IMPERSOL e à European Window Film Association pelo apoio técnico. O primeiro autor deseja expressar o seu agradecimento à FCT pelo financiamento da sua bolsa de doutoramento (PD/BD/150576/2020).

## Referências

- [1] R. Romano, L. Aelenei, D. Aelenei, E.S. Mazzucchelli, What is an adaptive façade? Analysis of recent terms and definitions from an international perspective, *J. Facade Des. Eng.*, vol. 6 (2018) 065-076. <https://doi.org/10.7480/jfde.2018.3.2478>.
- [2] M. Boubekri, N. Boubekri, A Review of the Current State-of-the-Art Smart Glazing and Building Skin Materials Designed to Enhance Daylighting Design and Reduce Energy Consumption in Office Buildings, *The Journal of Macro Trends in Energy and Sustainability*, 4 (2016) 47-58.
- [3] H. Teixeira, M.G. Gomes, A. Moret Rodrigues, J. Pereira, Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films, *Build. Environ.*, vol. 168 (2020) 106474. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106474>.
- [4] J. Pereira, M.G. Gomes, A.M. Rodrigues, M. Almeida, Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making, *Energy Build.*, 198 (2019) 431-443. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.003>.
- [5] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94 (2010) 87-105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>.
- [6] M. Aburas, V. Soebarto, T. Williamson, R. Liang, H. Ebendorff-Heidepriem, Y. Wu, Thermochromic smart window technologies for building application: A review, *Appl. Energy*, 255 (2019) 113522. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522>.
- [7] R. Tällberg, B.P. Jelle, R. Loonen, T. Gao, M. Hamdy, Comparison of the energy saving

- potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 200 (2019) 109828. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.041>.
- [8] S. Hoffmann, E.S. Lee, C. Clavero, Examination of the technical potential of near-infrared switching thermochromic windows for commercial building applications, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 123 (2014) 65-80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.12.017>.
- [9] G.E. Arnaoutakis, D.A. Katsaprakakis, Energy Performance of Buildings with Thermochromic Windows in Mediterranean Climates, *Energies (Basel)*, 14 (2021) 6977. <https://doi.org/10.3390/en14216977>.
- [10] V. Costanzo, G. Evola, L. Marletta, Thermal and visual performance of real and theoretical thermochromic glazing solutions for office buildings, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 149 (2016) 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.01.008>.
- [11] R. Liang, Y. Sun, M. Aburas, R. Wilson, Y. Wu, Evaluation of the thermal and optical performance of thermochromic windows for office buildings in China, *Energy Build.*, 176 (2018) 216-231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.009>.
- [12] M. Arnesano, G. Pandarese, M. Martarelli, F. Naspi, K.L. Gurunatha, C. Sol, M. Portnoi, F.V. Ramirez, I.P. Parkin, I. Papakonstantinou, G.M. Revel, Optimization of the thermochromic glazing design for curtain wall buildings based on experimental measurements and dynamic simulation, *Solar Energy*, 216 (2021) 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.013>.
- [13] F. Favoino, L. Giovannini, A. Pellegrino, V. Serra, Building performance of thermochromic glazing, in *Eco-efficient Materials for Reducing Cooling Needs in Buildings and Construction*, Elsevier Ltd., (2021) 401-437. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820791-8.00017-1>.
- [14] E. S. Lee, X. Pang, S. Hoffmann, H. Goudey, A. Thanachareonkit, An empirical study of a full-scale polymer thermochromic window and its implications on material science development objectives, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 116 (2013) 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.043>.
- [15] H. Teixeira, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, D. Aelenei, Assessment of the visual, thermal and energy performance of static vs thermochromic double-glazing under different European climates, *Build Environ*, 217 (2022) 109115. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109115>.
- [16] Optics | Windows and Daylighting, <https://windows.lbl.gov/software/optics>, (acesso em 24 fevereiro 2020).
- [17] C. Curcija, S. Vidanovic, R. Hart, J. Jonsson, R. Mitchell, WINDOW Technical Documentation. Lawrence Berkeley Natl. Lab., 2018.
- [18] H. Teixeira, M. da Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, J. Pereira, In-Service Thermal and Luminous Performance Monitoring of a Refurbished Building with Solar Control Films on the Glazing System, *Energies (Basel)*, 14 (2021) 1388. <https://doi.org/10.3390/en14051388>.

## ORCID

H. Teixeira	0000-0003-3391-1495	<a href="https://orcid.org/0000-0003-3391-1495">https://orcid.org/0000-0003-3391-1495</a>
M. Glória Gomes	0000-0003-1499-1370	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1499-1370">https://orcid.org/0000-0003-1499-1370</a>
A. Moret Rodrigues	0000-0002-6501-9189	<a href="https://orcid.org/0000-0002-6501-9189">https://orcid.org/0000-0002-6501-9189</a>
D. Aelenei	0000-0002-1007-1756	<a href="https://orcid.org/0000-0002-1007-1756">https://orcid.org/0000-0002-1007-1756</a>