



DIOGO JORGE RODRIGUES VIEIRA

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE ENVIDRAÇADOS NA OTIMIZAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil
Perfil de Construção

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2024

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE ENVIDRAÇADOS NA OTIMIZAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil
Perfil de Construção

DIOGO JORGE RODRIGUES VIEIRA
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Associado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa -
NOVA FCT

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves, Pro-
fessor Catedrático, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Prof. Doutor Guilherme Barreto Arez Coelho,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tec-
nologia da Universidade NOVA de Lisboa

Vogal: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar, Pro-
fessor Associado, Faculdade de Ciências e Tec-
nologia da Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
setembro. 2024

Análise técnico-económica de diferentes soluções de envidraçados na otimização térmica de edifícios

Copyright © Diogo Jorge Rodrigues Vieira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedico este trabalho aos meus pais e namorada, Fernanda, Paulo e Raluca.

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento vai para a minha namorada, Raluca Papan, por toda a ajuda dada neste percurso académico, por ter sido incansável, paciente e sobretudo um porto seguro quando as coisas corriam menos bem.

Ao Exmo. Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar, um agradecimento genuíno pela ajuda prestada para o desenvolvimento deste trabalho como também pelo excelente professor que demonstrou ser nas unidades curriculares.

Aos meus pais, amigos e família por terem sempre demonstrado carinho, orgulho e por darem sempre força e motivação.

Aos meus colegas de faculdade, em especial ao Grupo 1, pois sem eles a faculdade não seria a mesma coisa. Guardo na memória as festas, os estudos e todos os bons momentos.

Ao Duarte e Madalena, os melhores colegas de Erasmus. As melhores memórias foram feitas convosco e guardo-vos para sempre na memória e no coração.

Por fim, mas dos agradecimentos mais importantes, a ti Marta, por teres estado ao meu lado desde o primeiro dia deste percurso.

RESUMO

O parque edificado português tem uma baixa eficiência térmica e, por consequência, urge a necessidade de uma análise técnica e económica exaustiva da reabilitação de qualquer componente da envolvente do edifício de maneira a melhorar a sua eficiência térmica e energética. Dado que os vãos envidraçados nas paredes de fachada são um dos elementos mais penalizadores nas trocas térmicas, exigem uma análise detalhada e não uma generalização de soluções. Dito isto, a presente dissertação tem como principal objetivo apresentar e delinear uma metodologia a seguir para a escolha adequada das soluções na reabilitação dos vãos envidraçados. Pretende-se, assim, reduzir as necessidades de energia para climatização e os custos associados à melhoria dos vãos, optando pela opção mais rentável.

Desta forma, foi modelado um caso de estudo no programa *EnergyPlus*, onde foram simuladas e analisadas térmica e energeticamente diferentes combinações de envidraçados, nos quais se alterou o caixilho, as películas e o gás do espaço de ar entre vidros. A modelação dos envidraçados recorreu à base de dados do programa *Berkeley Lab WINDOW* que originou *outputs* para introduzir no *EnergyPlus*. As combinações que exigiram menores necessidades de energia para climatização foram posteriormente simuladas com um elemento de sombreamento e oclusão noturna e analisadas economicamente. A análise conjunta dos resultados, obtidos pela modelação numérica e da análise económica, permite concluir que para zonas climáticas I2 e I3, o argon é a melhor opção para preenchimento do espaço de ar entre vidros, assim como os vidros de baixa emissividade. Com efeito a solução de envidraçado de baixa emissividade e com controlo solar permite aumentar a eficiência térmica e energética na estação de aquecimento, mas pode ser prejudicial na estação de arrefecimento consoante a zona climática. Por sua vez, os vidros duplos simples apresentam maiores custos com energia para climatização, não obstante estes são vidros que podem conduzir a bons valores para o custo global quando comparados com outras soluções (vidros de controlo solar e/ou de baixa emissividade) com um investimento inicial substancialmente maior. Através desta metodologia, foi possível concluir que a análise térmica e energética necessita de ser complementada com uma análise económica. Da mesma forma, é fundamental considerar a relevância do uso de elementos de sombreamento e oclusão noturna e o diferente comportamento dos componentes dos envidraçados para os diversos climas.

Palavas chave: Janelas, Fator solar, Emissividade, Necessidades de energia para climatização, Reabilitação de envidraçados.

ABSTRACT

The Portuguese housing stock reflects the low thermal efficiency of the buildings and, as a result, it is necessary to carry out a thorough technical and economic analysis of the rehabilitation of any building component in order to improve efficiency. Given that the glazed openings are the most penalizing elements in thermal exchange, they require a detailed analysis and not just a generalization of solutions. Therefore, the main objective of this dissertation is to present and outline a methodology to be followed for the appropriate decision of solutions in the rehabilitation of glazed openings. The aim is to reduce the energy requirements for air conditioning and the costs associated with improvement of the openings, by choosing for the most cost-effective option.

A representative building was therefore modelled in the *EnergyPlus*, where different glazing combinations were simulated and thermally analysed by changing the frame, the films and the air space gas. The glazing was modelled using the Bergeley Lab WINDOW database, which produced outputs to introduce into *EnergyPlus*. The combinations that required the least energy for air conditioning were then simulated with a shading element and night-time closure. The joint analysis of the results obtained by numerical modelling and economic analysis seems to demonstrate that for climate zones I2 and I3, argon is the best option for filling the air space between the glasses, as well as low emissivity glazing. In fact, the low emissivity glazing solution with solar control allows to increase the thermal and energy efficiency in the heating season, but can be harmful in the cooling season, depending on the climate zone. On the other hand, simple double glazing has higher energy costs for air conditioning, even though these glasses can result in good total cost values compared to other solutions (solar control and/or low emissivity glazing) with a much higher initial investment.

Through this methodology, it was possible to conclude that the thermal and energy analysis needs to be combined with an economic analysis. Likewise, it is essential to consider the relevance of the use of shading and night-time closure elements and the different behaviour of glazing components for projects in different climate zones.

Keywords: Windows, Solar heat gain coefficient, Emissivity, Economic analysis, Energy requirements for air conditioning, Rehabilitation of glazing.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO.....	XI
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE.....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
SIGLAS E ACRÓNIMOS	XXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	4
2. CONCEITOS GERAIS DE VÃOS ENVIDRAÇADOS E TÉRMICA DE EDIFÍCIOS	5
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2. COMPONENTES DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS.....	5
2.2.1. <i>Tipos de vidro</i>	5
2.2.2. <i>Espaços de ar e gases</i>	7
2.2.3. <i>Caixilharia</i>	8
2.2.4. <i>Películas</i>	9
2.2.5. <i>Dispositivos de proteção solar e oclusão noturna</i>	9
2.3. PARÂMETROS FÍSICOS DOS ELEMENTOS TRANSPARENTES	10
2.3.1. <i>Fator solar ($g \perp$)</i>	10
2.3.2. <i>Coefficiente de transmissão térmica da envolvente envidraçada (U_g)</i>	11
2.3.3. <i>Emissividade (ϵ)</i>	13
2.4. ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS.....	13
2.5. INFLUÊNCIA DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS NO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS.....	16
3. CASO DE ESTUDO E METODOLOGIAS	21
3.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO.....	21
3.2. DEFINIÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS.....	22
3.2.1. <i>Elementos opacos</i>	22
3.2.2. <i>Vãos envidraçados</i>	25
3.3. DADOS CLIMÁTICOS DAS ZONAS DE ESTUDO.....	28

3.4.	DESCRIÇÃO DO BERKELEY LAB WINDOW.....	28
3.5.	DESCRIÇÃO DO <i>ENERGYPLUS</i>	29
3.6.	DESCRIÇÃO DAS COMBINAÇÕES SIMULADAS.....	30
3.7.	PRESSUPOSTOS DA ANÁLISE ECONÓMICA.....	30
4.	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS ENVIDRAÇADOS APLICADOS AO CASO DE ESTUDO	33
4.1.	ANÁLISE TÉCNICA	33
4.1.1.	<i>Análise das simulações sem elemento de sombreamento.....</i>	<i>33</i>
4.1.2.	<i>Análise das simulações com persiana</i>	<i>40</i>
4.2.	ANÁLISE ECONÓMICA	44
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	53
5.1.	CONCLUSÕES.....	53
5.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
6.	ANEXOS.....	61
6.1.	CARACTERÍSTICAS DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS PROVENIENTE DO <i>WINDOW</i>	62
6.2.	DADOS DOS ENVIDRAÇADOS SEM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO	65
6.3.	DADOS DOS ENVIDRAÇADOS COM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO	69
6.4.	DADOS TÉCNICOS DO <i>SPLIT</i>	71
6.5.	RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÓMICA.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 - CERTIFICADOS EMITIDOS POR DESEMPENHO ENERGÉTICO	2
FIGURA 2-1 - CORTE ESQUEMÁTICO DE UM VIDRO SIMPLES, DUPLO E TRIPLO (RESPECTIVAMENTE DA ESQUERDA PARA A DIREITA).....	6
FIGURA 2-2- EXEMPLO DE ESTORES VENEZIANOS	10
FIGURA 2-3 - EXEMPLO DE PERSIANA	10
FIGURA 2-4 - DECOMPOSIÇÃO DA RADIAÇÃO INCIDENTE NUM ENVIDRAÇADO	11
FIGURA 2-5 - ESPETRO DE RADIAÇÃO TÉRMICA	13
FIGURA 2-7 - MAPA DAS ZONAS CLIMÁTICAS DE VERÃO (V1, V2 e V3) E DE INVERNO (I1, I2 e I3).....	15
FIGURA 3-1 - FACHADA NORTE E ESTE DO CASO DE ESTUDO.....	21
FIGURA 3-2 - FACHADA SUL E OESTE DO CASO DE ESTUDO	22
FIGURA 3-3 - PORMENOR CONSTRUTIVO DOS ELEMENTOS VERTICAIS OPACOS	23
FIGURA 3-4 - PORMENOR CONSTRUTIVO DA LAJE TÉRREA DO CASO DE ESTUDO	23
FIGURA 3-5 - PORMENOR CONSTRUTIVO DA COBERTURA DO CASO DE ESTUDO	24
FIGURA 4-1 - NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA SOMBREAMENTO - BRAGANÇA	34
FIGURA 4-2 - BALANÇO DAS TROCAS DE CALOR PELOS ENVIDRAÇADOS - BRAGANÇA	35
FIGURA 4-3 - NECESSIDADE NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL SEM SOMBREAMENTO - LISBOA.....	36
FIGURA 4-4 - BALANÇO DAS TROCAS DE CALOR PELOS ENVIDRAÇADOS - LISBOA	37
FIGURA 4-5 - NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL SEM SOMBREAMENTO - ÉVORA	37
FIGURA 4-6 - BALANÇO DAS TROCAS DE CALOR PELOS ENVIDRAÇADOS - ÉVORA.....	38
FIGURA 4-7 - NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL SEM SOMBREAMENTO - FARO.....	39
FIGURA 4-8 - BALANÇO DAS TROCAS DE CALOR PELOS ENVIDRAÇADOS - FARO	39
FIGURA 4-9 - CARACTERÍSTICAS DA PERSIANA USADA NAS SIMULAÇÕES	41
FIGURA 4-10 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM PERSIANA - BRAGANÇA.....	41
FIGURA 4-11 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM PERSIANA - LISBOA.....	42
FIGURA 4-12 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM PERSIANAS - ÉVORA	43
FIGURA 4-13 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM PERSIANAS - FARO.....	44
FIGURA 4-14 - RESULTADOS DO ESTUDO ECONÓMICO DE LISBOA.....	45
FIGURA 4-15 - RETORNO DO INVESTIMENTO DA COMBINAÇÃO VD_A_Air - LISBOA	46
FIGURA 4-16 - RETORNO DO INVESTIMENTO DA SOLUÇÃO VC_A_Air - LISBOA.....	46
FIGURA 4-17 - RESULTADOS DO ESTUDO ECONÓMICO DE FARO	47
FIGURA 4-18 - RETORNO DO INVESTIMENTO DA COMBINAÇÃO VD_A_Air - FARO.....	47
FIGURA 4-19 - RETORNO DO INVESTIMENTO DA COMBINAÇÃO VC_A_Air - FARO	48
FIGURA 4-20 - RESULTADOS DO ESTUDO ECONÓMICO DE ÉVORA.....	48
FIGURA 4-21 - RETORNO DO INVESTIMENTO DA COMBINAÇÃO VD_A_Air - ÉVORA	49
FIGURA 4-22 - RETORNO DO INVESTIMENTO DA COMBINAÇÃO VC_A_Air - ÉVORA.....	49
FIGURA 4-23 - RESULTADOS DO ESTUDO ECONÓMICO DE BRAGANÇA	50

FIGURA 4-24 - RETORNO DO INVESTIMENTO PARA BRAGANÇA	50
FIGURA 6-1 - CÁLCULOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS (1).....	62
FIGURA 6-2 - CÁLCULOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS (2).....	63
FIGURA 6-3 - CÁLCULOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS (3).....	64
FIGURA 6-4 - CARACTERÍSTICAS DO <i>SPLIT</i>	71

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GASES.....	7
TABELA 2-2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAIS USADOS NAS CAIXILHARIAS.....	8
TABELA 2-3 - CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS PARA A ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO.....	14
TABELA 2-4 - CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS PARA A ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO.....	15
TABELA 2-5 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA SUPERFICIAIS MÁXIMOS DOS ELEMENTOS DA ENVOLVENTE ENVIDRAÇADA PARA EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO.....	16
TABELA 2-6 - FATORES SOLARES MÁXIMOS ADMISSÍVEIS DE VÃOS ENVIDRAÇADOS, <i>gtot</i> , <i>máx</i>	16
TABELA 2-7 - TABELA RESUMO DE LITERATURA COM CONCLUSÕES ACERCA DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS.....	17
TABELA 3-1 - ÁREAS DOS ELEMENTOS OPACOS E TRANSPARENTES DO CASO DE ESTUDO.....	22
TABELA 3-2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DAS PAREDES EXTERIORES.....	23
TABELA 3-3 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DA LAJE.....	23
TABELA 3-4 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DA COBERTURA.....	24
TABELA 3-5 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DAS PTP COM VIGAS E PILARES.....	25
TABELA 3-6 - CARACTERÍSTICAS DOS VIDROS ESCOLHIDOS DA BASE DE DADOS.....	25
TABELA 3-7 - CARACTERÍSTICAS DAS JANELAS PROVENIENTE DO <i>BERKELEY LAB WINDOW</i>	26
TABELA 3-8 - DADOS CLIMÁTICOS DAS CIDADES EM ESTUDO.....	28
TABELA 3-9 - MAPA DAS COMBINAÇÕES ANALISADAS NO <i>ENERGYPLUS</i>	30
TABELA 4-1 - COMBINAÇÕES ALVO DE ANÁLISE COM ELEMENTO DE SOMBREAMENTO E OCLUSÃO NOTURNA.....	40
TABELA 4-2 - PREÇO DA ELETRICIDADE.....	44
TABELA 6-1 - DADOS DAS SIMULAÇÕES SEM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO - BRAGANÇA.....	65
TABELA 6-2 - DADOS DAS SIMULAÇÕES SEM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO - LISBOA.....	66
TABELA 6-3 - DADOS DAS SIMULAÇÕES SEM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO - ÉVORA.....	67
TABELA 6-4 - DADOS DAS SIMULAÇÕES SEM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO - FARO.....	68
TABELA 6-5 - RESULTADOS OBTIDOS DAS SIMULAÇÕES COM PERSIANA.....	69
TABELA 6-6 - RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÓMICA.....	72

Siglas e Acrónimos

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado

CE - Certificado Energético

EPS - Poliestireno Expandido Moldado

ETICS - *External Thermal Insolation Composite System*

Low-E - *Low emissivity*

NUTS - Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

PDEE - Plano de Melhoria do Desempenho Energético dos Edifícios

PNEC - Plano Nacional Integrado de Energia e Clima

PRS - Período de retorno simples

PTP - Ponte térmica plana

PVB - Polivinil butiral

PVC - Policloreto de vinil

UV - Ultravioleta

Símbolos

Símbolo	Designação	Unidade
A	Absorção energética global	Adimensional
A_c	Área do caixilho	m^2
A_e	Fração de energia absorvida emitida para o exterior	Adimensional
A_i	Fração de energia absorvida emitida para o interior	Adimensional
A_v	Área do vidro	m^2
$C_{a,i}$	Custo anual de energia no ano i	€
C_g^{ref}	Custo global do edifício de referência	€
C_g	Custo global no período de cálculo	€
C_i	Custo de investimento inicial	€
d	Espessura	m
$f_{i,k}$	Parcela das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k	Adimensional
$f_{v,k}$	Parcela das necessidades de energia útil para arrefecimento supridas pelo sistema k	Adimensional
GD	Número de graus-dias	° C
GD _{REF}	Número de graus-dias de referência	° C
G_{sul}	Energia solar média mensal durante a estação, recebida numa superfície vertical orientada a Sul	kWh/m ² . mês
$g_{\perp}$	Fator solar	Adimensional
$g_{tot,máx}$	Fator solar máximo admissível dos vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares	Adimensional
I	Energia solar global incidente	kWh/m ²
I_{sol}	Energia solar acumulada durante a estação, recebida na horizontal e em superfícies verticais para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais	kWh/m ²
K	Kelvin	K
kg	Quilograma	kg
L_v	Duração da estação de arrefecimento	Meses
M	Duração da estação de aquecimento	Meses
N_{ic}	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento	kWh/m ² . ano
N_{vc}	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento	kWh/m ² . ano
p	Número de anos a partir do período inicial	Anos
P_v	Perímetro do vidro	m
R	Reflexão energética global	Adimensional
R_d	Fator de desconto para o ano i com a taxa de desconto r	Adimensional
R_{ph}	Taxa de renovação de ar horária	h^{-1}

R_{se}	Resistência superficial térmica exterior	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_{si}	Resistência superficial térmica interior	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_t	Resistência térmica	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_T	Resistência térmica total	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
T	Transmissão energética global	Adimensional
U	Coeficiente de transmissão térmica	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
U_c	Coeficiente de transmissão térmica do caixilho	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
U_{ref}	Coeficiente de transmissão térmica de referência	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
U_g	Coeficiente de transmissão térmica da janela	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
U_v	Coeficiente de transmissão térmica do vidro	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
ϵ	Emissividade	Adimensional
λ	Condutibilidade térmica	$W/m \cdot ^\circ C$
ρ	Massa volúmica	kg/m^3
ψ_v	Coeficiente de transmissão térmica linear	$W/m \cdot ^\circ C$
$\theta_{ext,i}$	Temperatura exterior média dos mês mais frio da estação de aquecimento	$^\circ C$
$\theta_{ext,v}$	Temperatura exterior média da estação de arrefecimento	$^\circ C$
$\theta_{ext,v REF}$	Temperatura exterior média de referência da estação de arrefecimento	$^\circ C$
$\eta_{i,k}$	Eficiência do sistema k para aquecimento	Adimensional
$\eta_{v,k}$	Eficiência do sistema k para arrefecimento	Adimensional

1.1. Contexto e motivação

As alterações climáticas revelam-se como uma das principais preocupações ambientais, exigindo atenção e ação imediata. Perante esta problemática, a Comissão Europeia priorizou a diminuição dos consumos carbónicos e assim é celebrado o Acordo de Paris. O acordo, exige que as Partes (países que ratificaram o acordo) se empenhem para mitigar e reduzir as alterações climáticas [1]. Portugal, enquanto Estado-Membro, criou o seu Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC 2030) [2] sendo este o primeiro pacote de medidas que define os seguintes objetivos para o horizonte 2030:

- Redução de 45% a 55% de emissões de gases com efeito estufa;
- Aumentar a eficiência energética em 35% reduzindo o uso de energia primária;
- Aumentar em 47% o uso de energias renováveis;
- Aumentar em 20% o uso de energias renováveis nos transportes.

O PNEC define ainda metas setoriais de redução de emissões de gases poluentes de:

- 70 % no setor dos serviços;
- 35% no setor residencial;
- 40% no setor dos transportes;
- 11% no setor da agricultura;
- 30% no setor dos resíduos e águas residuais.

A *International Energy Agency* [3] indica que o consumo energético doméstico abrange 21% dos setores anteriormente referidos. Mundialmente, este é o terceiro setor com maior exigência energética e, por isso, requer cuidados de maximização da eficiência energética.

Portugal é o quarto país entre os Estados-membros com maior taxa de cidadãos que não conseguem aquecer as suas habitações (17,5%), seja por razões monetárias, sociais, culturais ou pelo mau desempenho térmico das habitações. Assim, é imprescindível que os valores desçam nos anos vindouros [4]. O mau desempenho térmico das residências e a falta de meios monetários

para combater esta problemática, resulta na pobreza energética que, de forma sintética, é definida por *"a falta de acesso de um agregado familiar a serviços energéticos essenciais, quando tais serviços proporcionam níveis básicos e dignos de vida e de saúde, nomeadamente aquecimento, água quente, arrefecimento..."* [5]. A pobreza energética é um indicador que permite aferir a vulnerabilidade dos ocupantes estarem desconfortáveis no interior das habitações decorrente da falta de recursos para aquecerem ou arrefecerem a habitação, esta problemática origina problemas de saúde antes inexistentes assim como no agravamento de doenças existentes. Portugal, no ano de 2024, foi o 2º país com pior classificação no parâmetro de pobreza energética[6]. De acordo com Mahoney et al [7]a solução para redução do risco de pobreza energética passa por implementar medidas passivas nas habitações em detrimento de promover o consumo de energia através do uso de sistema para aquecimento e arrefecimento ambiente.

É necessário considerar o desempenho energético do parque habitacional, de maneira a alcançar-se um melhoramento no setor residencial português. As habitações são classificadas pelo Certificado Energético (CE) emitido no âmbito do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) regido pelo Decreto-Lei n.º 101_D/2020 [8]. A escala é dividida em 8 classes: A+, A, B, B-, C, D, E e F, sendo que a classe F corresponde a edifícios com muito mau desempenho energético e A+ com um excelente desempenho energético [9].

A Figura 1-1 permite constatar que as classes predominantes são as C e D, que representam cerca de 44,5% do parque habitacional português certificado desde 2014 até a atualidade. É um claro indicador de mau desempenho energético das habitações. O desempenho energético ou eficiência energética é proporcional ao consumo de energia, ou seja, ao aumentar a eficiência energética das habitações, consequentemente os seus consumos energéticos diminuem. O consumo energético nas habitações tem fontes diversas, das quais os equipamentos de climatização, tais como: bombas de calor, fogões de sala, aquecedores de resistência elétrica, lareiras, etc. Dito isto, cerca de 41% do aquecimento habitacional provém de aquecedores elétricos [10].

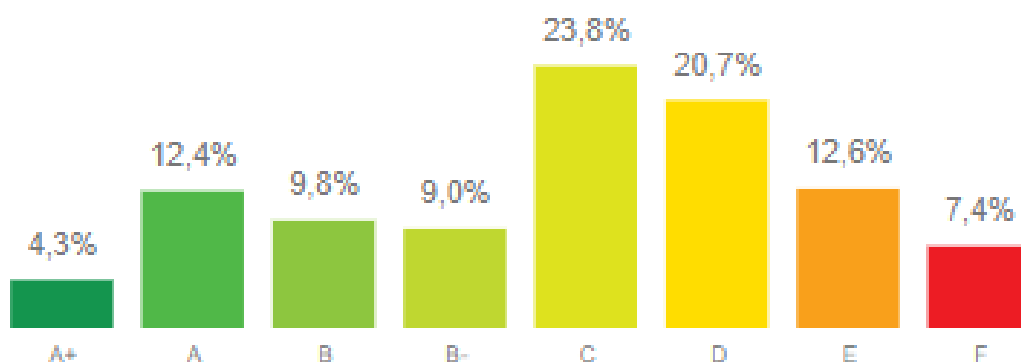


Figura 1-1 - Certificados emitidos por desempenho energético [50]

O estudo térmico, feito em projeto, resulta na obtenção dos ganhos e perdas de energia necessárias para climatizar o edifício em desenvolvimento. A quantificação destas necessidades de

energia é crucial para a compreensão dos resultados da eficiência energética em Portugal e, sobretudo, do comportamento térmico dos elementos da envolvente exterior.

Os envidraçados são os elementos mais condicionantes nas trocas de calor nos edifícios [11] e representam 25-30% das perdas de calor [12]. Deste modo, selecionando os vãos envidraçados optando por uma escolha pensada e estuda para cada caso, pode-se obter melhor eficiência energética, bem como um melhor conforto térmico nas habitações [13].

1.2. Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como objetivos mostrar o procedimento para uma correta escolha na reabilitação dos vãos envidraçados. É necessário fazer uma análise técnica e económica de diferentes soluções de vãos envidraçados, com diferentes vidros, caixilharia, gases, elementos de sombreamento e oclusão noturna e películas, com o intuito de obter a melhor solução possível considerando a especificidades do edifício e do clima.

Assim, o presente trabalho pretende evidenciar a relevância do estudo das soluções de vão envidraçado que melhor respeitam os parâmetros técnicos e económicos em função da região climática, seguindo a seguinte metodologia:

- Análise do estado do conhecimento relativo ao tipo de vidros e aos componentes inerentes ao envidraçado (caixilharia, gases, películas de controlo solar e/ou de baixa emissividade e a dimensão do espaço de ar); assim como dos elementos facultativos que influenciam diretamente o desempenho dos envidraçados (elementos de sombreamento e oclusão noturna). Por fim, a análise dos parâmetros físicos que determinam o comportamento específico de cada solução, nomeadamente: o fator solar, o coeficiente de transmissão térmica e emissividade;
- Enquadramento legislativo no âmbito do comportamento térmico. Enquadramento este que, permite ao leitor conhecer as diferentes zonas climáticas e os critérios térmicos que todas as habitações portuguesas devem respeitar;
- Levantamento bibliográfico com o objetivo de identificar as matérias que já foram analisadas e evidenciar a necessidade de desenvolver um estudo sobre a metodologia a seguir aquando da reabilitação de vãos envidraçados;
- Apresentação detalhada do caso de estudo e das soluções construtivas dos elementos opacos e das combinações dos vãos envidraçados a serem estudados; ainda a definição dos dados climáticos para as diferentes zonas climáticas em análise;
- Descrição pormenorizada das considerações tidas em conta para os *inputs* introduzidos nos programas: *BERKELEY Lab WINDOW* e *EnergyPlus*;
- Apresentação dos pressupostos da análise económica;
- Análise térmica do comportamento das diversas combinações de vãos envidraçados nos diferentes climas. A análise térmica tomou como parâmetros de análise as necessidades nominais anuais de energia útil para a estação de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}), a radiação incidente e quociente entre os ganhos/perdas de calor pelos envidraçados face às trocas de calor do caso de estudo. As combinações

que apresentem os melhores comportamentos térmicos foram depois, analisadas sobre o efeito de um elemento de sombreamento e oclusão noturna;

- Análise económica das combinações com melhores resultados térmicos para os diferentes tipos de vidros. Por fim, a comparação e discussão sobre os resultados térmico e económico.

1.3. Organização do documento

No Capítulo 1, procura-se proporcionar ao leitor o contexto teórico que motiva esta dissertação, com o objetivo de aprimorar a eficiência térmica dos edifícios por meio de otimização dos vãos envidraçados.

No Capítulo 2, é feita uma contextualização acerca dos conceitos físicos que têm relevância para a análise dos vãos envidraçados e serão enumerados os diferentes elementos que compõem um vão envidraçado explicando quais as variações que podem tomar, os diferentes materiais e como intervêm nos parâmetros físicos do vão. Igualmente, é também feito um enquadramento quanto à influência da localização das edificações.

No Capítulo 3, é introduzido o caso de estudo que indica as localizações estudadas, a arquitetura da edificação, soluções construtivas dos elementos opacos e as soluções de vãos envidraçados adotadas. Ainda neste capítulo, é também feita a modelação do edifício no *EnergyPlus* e a modelação das soluções para os vãos envidraçados no programa *Berkeley Lab WINDOW*. Todos os passos realizados nos programas serão explicados, assim como a obtenção dos dados pertinentes para a análise das soluções.

No Capítulo 4, é realizada a análise técnica e económica através da análise das temperaturas interiores e também das necessidades globais de energia para a climatização do edifício a fim de manter as temperaturas interiores na zona de conforto.

Por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões das análises realizadas, a melhor solução para cada zoneamento climático assim como uma discussão sobre outras variáveis, que não foram estudadas e que poderiam levar a resultados diferentes.

Conceitos Gerais de Vãos Envidraçados e Térmica de Edifícios

2.1. Considerações iniciais

O desempenho térmico dos vãos envidraçados ao nível da parede de fachada é condicionado por fatores intrínsecos e extrínsecos ao vão envidraçado. Um bom dimensionamento é feito com base em todos os condicionantes existentes. São considerados fatores intrínsecos aqueles que, na alteração dos materiais constituintes, influenciam o comportamento. Estes parâmetros são: o fator solar, coeficiente de transmissão térmica e emissividade. Os fatores extrínsecos a considerar são: zoneamento climático, elementos de sombreamento, proteções solares, arquitetura, etc.

A necessidade de aumentar a eficiência dos edifícios levou ao rápido desenvolvimento tecnológico na área dos envidraçados. Assim, surgiu no mercado uma vasta gama de materiais que combinados criam um leque variado de soluções diferentes que podem ser adotadas. Diferentes materiais implicam diferentes características que por sua vez quando combinados têm comportamentos térmicos distintos.

Assim, o intuito deste trabalho é analisar apenas o fator solar, a emissividade, o zonamento climático, o uso de elementos de sombreamento e oclusão noturna e o coeficiente de transmissão térmica por serem parâmetros com maior preponderância no desempenho do vidro. O mercado português oferece inúmeras soluções quer sejam quanto ao tipo de vidro, características do espaço de ar entre vidros (caso exista), material de caixilharia, etc. É importante realçar que todos os parâmetros para além dos analisados no presente documento devem ser devidamente considerados por influenciarem diretamente o comportamento térmico do edifício.

2.2. Componentes dos vãos envidraçados

2.2.1. Tipos de vidro

Os vidros são elementos que permitem a admissão de luz natural para o interior do edifício, reduzindo as necessidades de energia para iluminação. Igualmente, têm um papel principal nos ganhos de calor por radiação solar na estação de aquecimento.

Atualmente, as soluções que podem ser encontradas no mercado são soluções de vidro simples, duplo ou triplo [14]. A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** representa as três soluções.

No decorrer dos anos, projetos de reabilitação e de construção de novas habitações inutilizaram a velha solução de vidro simples por ser uma solução precária a nível de isolamento térmico e não respeita os requisitos regulamentares [15, 16] .

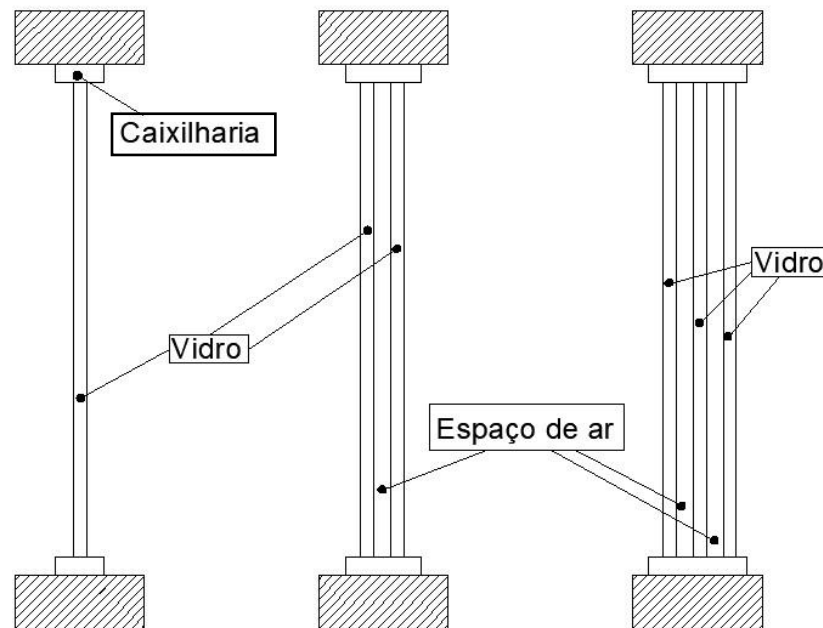


Figura 2-1 - Corte esquemático de um vidro simples, duplo e triplo (respetivamente da esquerda para a direita)

Ao nível do vidro, como material, este pode ser fabricado de diferentes maneiras o que lhe dá diferentes características. Características como o tipo de acabamento, a segurança que oferece, o controlo solar, isolamento acústico e térmico são critérios a considerar na escolha do material. Os mais prevalentes no mercado europeu, e por isso os caracterizados neste estudo, são os vidros *float*, vidro laminado, vidro temperado e vidros decorativos.

Tomam as seguintes características [14, 17]:

- **Vidro *float*** - é o vidro mais comum de se encontrar, pois serve como base para criar todos os outros vidros. É um vidro liso e incolor. Oferece pouca segurança porque parte-se em pedaços grandes e irregulares.
- **Vidro laminado** - é fabricado pela solidarização de duas ou mais chapas intercaladas com uma película plástica de grande resistência como polivinil burital - PVB ou resinas. Admitem uma boa segurança porque em caso de acidente os fragmentos de vidro ficam presos na película.
- **Vidro temperado** - o vidro *float* passa por um tratamento térmico onde é aquecido a 600 °C. Consequentemente, a sua superfície é rapidamente arrefecida enquanto o interior permanece quente. Este processo cria diferentes propriedades físicas. Quando partido gera fragmentos pequenos e não cortantes.

- **Vidros decorativos** - vidros que oferecem diferentes colorações e permitindo diferentes combinações arquitetônicas.
- **Vidros foscos** - é o vidro que oferece privacidade sem prejudicar a entrada de luz.
- **Vidro texturado** - é um vidro que tem a superfície com padrões ou texturas com relevo. Estes relevos podem ser usados quer para efeitos decorativos ou para proteger a intimidade dos espaços.

Outro fator pelo qual os vidros podem se diferenciar é a variação nas espessuras do vidro. O vidro, como parte integrante dos vãos envidraçados e que representa quase a totalidade da janela, tem uma influência importante no isolamento acústico. A espessura influencia a capacidade do material de absorver som. Vidros mais espessos são mais densos e, portanto, podem absorver mais energia sonora, reduzindo a transmissão de ruído. O som propaga-se através de ondas sonoras que atingem uma lâmina de vidro, elas fazem com que as moléculas do vidro vibrem, gerando energia sonora. Vidros mais espessos exigem mais energia para que essas vibrações ocorram. Isso resulta em uma maior absorção de energia sonora e uma menor transmissão de ruído em comparação com vidros mais finos e menos densos [18].

O isolamento acústico é regido por leis pois está diretamente relacionado com o conforto no interior dos espaços e consequentemente com a saúde dos intervenientes. Assim, para o aumento do conforto acústico a espessura dos vidros deve ser devidamente dimensionada.

2.2.2. Espaços de ar e gases

As soluções de vidro duplo e/ou vidro triplo apresentam, na constituição do envidraçado, o espaço de ar. Este espaço permite reduzir os fluxos de calor que o atravessam [19]. O espaço de ar pode variar em espessura como também no gás nele presente. Atualmente, o gás mais comum é o ar atmosférico, composto por oxigénio e azoto [20], que, devido à sua disponibilidade e fácil acesso, é apresentada como a solução mais barata. Contudo, a busca por melhorar o comportamento térmico dos envidraçados levou ao uso gases nobres não reativos, como o árgon, o cripton e o xénon. Estas soluções apresentam custos mais elevados. No entanto, por serem gases com maior massa volúmica comparativamente ao ar atmosférico, apresentam condutibilidade térmica menor e por isso são melhores isolantes térmicos [21, 22].

O coeficiente de transmissão térmica é diretamente proporcional à espessura do material, logo ao aumentar a espessura do espaço de ar aumentamos a resistência térmica e, consequentemente, a reduzir o coeficiente de transmissão térmica [20]. A Tabela 2-1 apresenta a massa volúmica e condutibilidade térmica do ar e árgon. O estudo apenas tem em consideração estes dois gases pois, ao analisar o mercado nacional constatou-se que estas eram as soluções mais comuns e com preços mais acessíveis.

Tabela 2-1 - Propriedades físicas dos gases. Adaptado de:[16]

Gás	Massa volúmica (ρ)- kg/m^3	Condutibilidade térmica (λ) - $W/m \cdot ^\circ C$
Ar	1,23	0,025
Árgon	1,7	0,017

2.2.3. Caixilharia

A caixilharia é um elemento estrutural que suporta o vidro e faz a ligação entre os diferentes constituintes do envidraçado permitindo a operacionalidade. Porém, para além dos aspetos funcionais, do suporte estrutural, da arquitetura e da sua reduzida área em comparação à área envidraçada, é um principal interveniente no comportamento térmico do envidraçado [23].

No mercado atual, existe uma vasta gama de materiais destinada à incorporação dos vãos envidraçados. A escolha do tipo de material é uma decisão que necessita considerar aspetos económicos, arquitetónicos, de durabilidade e de resistência térmica oferecida pelos materiais. Ainda, é importante compreender que diferentes materiais oferecem diferentes permeabilidades ao ar. Assim, é necessário adaptar e analisar a melhor estratégia de ventilação.

A Tabela 2-2 identifica algumas das características que pesam no momento da escolha do tipo de material. Contudo, importa referir que existem mais características que podem ser levadas em consideração [17, 24].

Tabela 2-2 - Características dos materiais mais usados nas caixilharias

Material	Características técnicas	Características económicas	$U_c (W/m^2 \cdot ^\circ C)$
Alumínio com corte térmico	– Leve e resistente – Boa durabilidade resistente à corrosão – O alumínio é um bom condutor térmico, no entanto o uso de um perfil de poliamida intercalada nos perfis da caixilharia torna esta solução fraca condutora térmica	Solução económica	3,20 [25]
PVC	– Não corrói – Bom desempenho térmico e acústico – Boa resistência e durabilidade – Material combustível	Solução económica, mais cara que o alumínio	1,80 [25]

Tabela 2-3 - Características dos materiais mais usados nas caixilharias (cont.)

Material	Características técnicas	Características económicas	$U_c (W/m^2 \cdot ^\circ C)$
Madeira	– Boa resistência mecânica – Vulnerável a fungos – Bom isolamento térmico e acústico – Material combustível	Solução menos económica quando comparada com PVC e Alumínio	2,00 [25]

Contudo, materiais compósitos, ferro, aço, fibra de vidro e combinações de várias soluções são também opções comerciais disponíveis [22].

2.2.4. Películas

As películas para vidros são concebidas para alterar as propriedades térmicas e óticas dos envidraçados e permitem o acesso de luz natural sem quaisquer implicações. A aplicação das películas altera o comportamento dos vãos envidraçados uma vez que afeta a radiação solar incidente de forma a absorver ou refletir radiação solar em quantidades diferentes. Usualmente, estes vãos são compostos por camadas de poliéster laminado transparente, metalizado ou tintado [26]. A aplicação pode ser feita pelo exterior ou pelo interior (no espaço de ar) sendo que a aplicação em zonas diferentes leva o envidraçado a ter comportamentos distintos [27].

Atualmente, existem vários tipos de películas que podem ser usadas atendendo diferentes necessidades. A EN 15752-1 [28] alista todos os tipos, no entanto, apenas serão referidos e caracterizados os tipos de películas de controlo solar e *low emissivity* (low-E).

As películas de controlo solar intervêm na diminuição dos ganhos solares reduzindo o fator solar [26]. Em relação às películas *low emissivity*, estas foram inicialmente pensadas para climas de baixas temperaturas por reduzirem a condutibilidade térmica (λ) do vidro e, consequentemente, o coeficiente de transmissão térmica (U), aumentando o isolamento térmico [26].

Estas duas características podem ser combinadas numa só película obtendo uma película de controlo solar *low emissivity* [26]. Esta película apresenta um comportamento térmico excelente, bem como ganhos solares bastante reduzidos, no entanto é necessário ponderar se o seu uso é justificável.

2.2.5. Dispositivos de proteção solar e oclusão noturna

Os dispositivos de proteção solar e oclusão noturna têm como principal função controlar as trocas de calor entre o exterior e o interior da habitação bem como controlar os ganhos solares que provêm da incidência solar. Na estação de aquecimento, a incidência solar torna-se excessiva pelo

que é necessário controlar a incidência, seja através de películas aplicadas nos vidros, como através do uso de uma proteção solar, como por exemplo persianas, estores venezianos, portadas, etc. A Figura 2-2 e Figura 2-3 mostram exemplos de proteções solares.



Figura 2-2- Exemplo de estores venezianos [51]



Figura 2-3 - Exemplo de persiana [52]

Na estação de arrefecimento bem como no período noturno a temperatura interior é usualmente maior que a exterior e consequentemente cria-se um fluxo de calor que provoca a diminuição da temperatura interior. Através da ativação desses dispositivos (estores, portadas, etc.) as trocas de calor diminuem, aumentando, assim, a eficiência energética do edifício.

2.3. Parâmetros físicos dos elementos transparentes

2.3.1. Fator solar ($g_{\perp}$)

A radiação total incidente num elemento transparente não é inteiramente transmitida para o interior da habitação. Como se pode observar na Figura 2-4, uma parte da radiação é transmitida

de imediato para o interior, outra parte absorvida pelo corpo e conseqüentemente emitida, e a radiação restante é refletida [13].

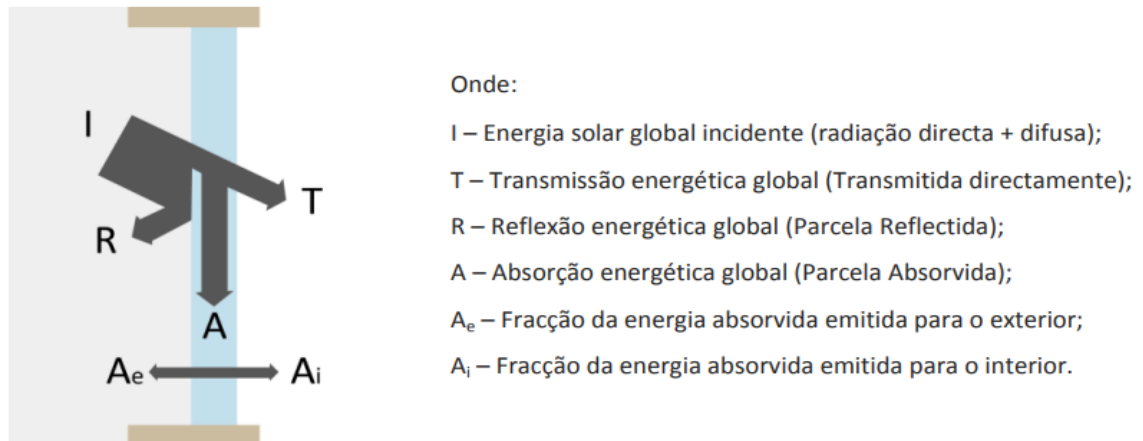


Figura 2-4 - Decomposição da radiação incidente num envidraçado [13]

A quantidade total de radiação solar transmitida para o interior é designada pelo fator solar ($g_{\perp}$). Este parâmetro resulta do quociente entre a energia solar transmitida para o interior através do envidraçado e a energia incidente irradiada pelo sol [29]. O mercado dos vidros apresenta fatores solares dentro do intervalo de 0,35 a 0,88.

A energia solar transmitida para o interior é a soma entre a energia transmitida (T) e a fração de energia absorvida emitida para o interior (A_i).

A expressão 2.1 traduz a definição:

$$g_{\perp} = \frac{\text{Ganhos solares}}{\text{Radiação incidente}} \quad (2.1)$$

O fator solar é afetado tanto pelas características dos vidros, como pelos elementos de sombreamentos inerentes a cada vão envidraçado, como pela orientação segundo o eixo cardinal e a posição global (influência a componente da radiação incidente) [29].

Assim, depreende-se que um maior valor de fator solar implica maiores ganhos solares e vice-versa.

2.3.2. Coeficiente de transmissão térmica da envolvente envidraçada (U_g)

Em projeto, o coeficiente de transmissão térmica é muitas vezes o parâmetro que requer maior atenção, uma vez que é essencial para a eficiência e o comportamento térmico do edifício bem como um requisito exigido por lei. Um vão envidraçado com um bom comportamento térmico terá de ter um fluxo de calor reduzido e para esse efeito ocorrer, um coeficiente de transmissão térmica reduzido.

Todos os materiais oferecem uma resistência térmica (R_t) que depende da condutibilidade térmica do material e da sua espessura, tal como a expressão 2.2 indica [20].

$$R_t = \frac{d}{\lambda} \quad (2.2)$$

Em que:

- d é a espessura do material em metros;
- λ é a condutibilidade térmica do material em $W/m \cdot ^\circ C$.

Uma vez identificada a resistência térmica (R_t) do corpo, é necessário ainda somar as resistências superficiais interiores e exteriores (R_{si} e R_{se}) para obter uma resistência térmica total (R_t) a partir da qual é possível obter o coeficiente de transmissão térmica pois, este é inversamente proporcional à resistência térmica total [20]. Assim, o coeficiente de transmissão térmica (U) é a quantidade de calor que atravessa um elemento por metro quadrado, suficiente para aquecer 1° celsius ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [13].

Uma vez que os vãos envidraçados são compostos por diferentes materiais, é necessário calcular o U_w que caracteriza o coeficiente de transmissão térmica do envidraçado atendendo o conjunto. A expressão 2.3 indica como pode ser obtido [30].

$$U_w = \frac{A_v U_v + A_c U_c + P_v \psi_v}{A_v + A_c} \quad (2.3)$$

Em que:

- U_v é o coeficiente de transmissão térmica do vidro em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;
- A_v é a área de vidro em m^2 ;
- U_c é o coeficiente de transmissão térmica do caixilho em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;
- A_c é a área de caixilho em m^2 ;
- P_v é o perímetro do vidro em metros;
- ψ_v é o coeficiente de transmissão térmica linear em $W/m \cdot ^\circ C$.

Os vãos envidraçados com baixo coeficiente de transmissão térmica (U_w) oferecem um melhor isolamento térmico. Dito isto, a escolha do tipo de material oferece condutibilidades térmicas distintas e, por isso, gera coeficientes de transmissão térmica diferentes. Assim, os materiais com condutibilidade baixa oferecerem melhor isolamento térmico.

No capítulo 2.4 é feita a contextualização legal que define os valores dos parâmetros a considerar como referência, bem como a caracterização das zonas climáticas.

2.3.3. Emissividade (ϵ)

A emissividade (ϵ) traduz-se na capacidade de um vidro transmitir radiação térmica para o interior e resulta da razão entre a radiância de um corpo corrente e a do corpo negro. Assim, a emissividade pode ser considerada como um medidor de eficiência [20].

A radiação térmica é composta por radiação ultravioleta, luz visível e infravermelho [31] como demonstra a Figura 2-5.

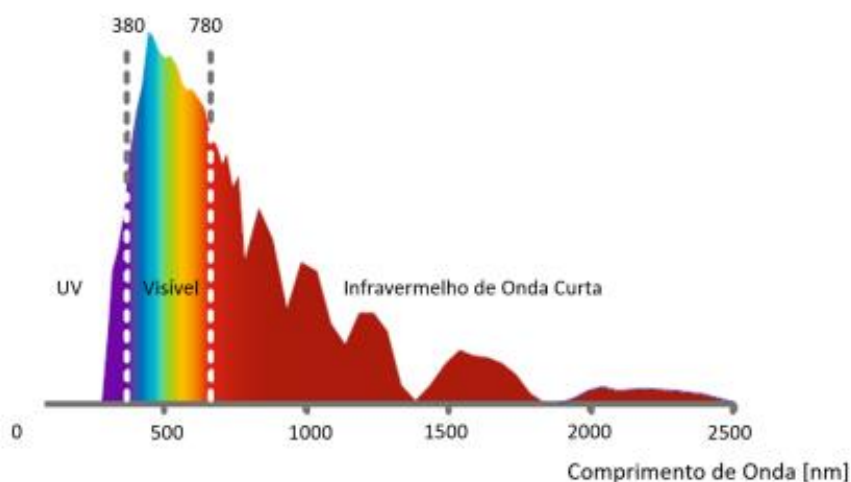


Figura 2-5 - Espectro de radiação térmica [40]

Pode-se concluir que uma superfície com maior emissividade terá maior facilidade na transferência de radiação térmica e consequentemente a temperatura do espaço interior variará mais.

2.4. Enquadramento legislativo dos vãos envidraçados

A ambição em encontrar uma solução ideal acerca da eficiência dos edifícios, levou à criação de instrumentos legais que definem critérios térmicos, quer para novas habitações, quer para remodelações. O Parlamento Europeu e do Conselho, no ano de 2010, publica a Diretiva n.º 2010/31/UE [32] referente ao desempenho energético dos edifícios. Esta publicação atualiza a Diretiva n.º 2002/91/CE [33].

Portugal, no ano de 2013, transpõe a diretiva europeia para o Decreto-Lei n.º 118/2013 [34]. Cria-se, assim, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), aglutinados num único diploma (anteriormente regulada em três diplomas distintos) [34]. Esta junção visa facilitar a interpretação das normas e promover a harmonização concetual e terminológica. Igualmente, o Decreto-Lei n.º 118/2013 [34] faz uma separação clara do âmbito de aplicação do REH, que incide sobre os edifícios de habitação, e do RECS que por sua vez incide sobre os edifícios de comércio e serviço.

Recentemente o Decreto-Lei n.º 118/2013 foi revogado e substituído pelo regulamento atualmente regente o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 [8].

A Certificação Energética dos Edifícios tem a finalidade de controlar a eficiência energética dos edifícios e estabelecer padrões de construção. A certificação fornece aos proprietários das edificações uma melhor perceção do desempenho térmico e, consequentemente, da eficiência energética. O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) [34] recorre à Portaria n.º 349-B/2013 [35] que define a metodologia de determinação das classes de desempenho energético, assim como os requisitos do comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos e edifícios sujeitos a remodelações.

No projeto térmico dos vãos envidraçados (e dos opacos) é necessário considerar os coeficientes de transmissão térmica. Estes têm tabelados valores máximos a respeitar condicionados pela zona climática em que o edifício se localiza. A legislação portuguesa define o zonamento climático baseando-se na "Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III" [36]. Cada zoneamento apresenta diferentes parâmetros climáticos pertinentes para as estações de aquecimento e arrefecimento, assim como diferentes critérios para os coeficientes de transmissão térmica. O Despacho n.º 15793-F [36] quantifica todos estes parâmetros.

- **Estação de aquecimento** - número de graus-dias (GD), duração da estação de aquecimento (M), temperatura exterior média dos mês mais frio da estação de aquecimento (e a energia solar média mensal durante a estação, recebida numa superfície vertical orientada a Sul (G_{sul});
- **Estação de arrefecimento** - duração da estação de arrefecimento (L_v), temperatura exterior média da estação de arrefecimento ($\theta_{ext,v}$), energia solar acumulada durante a estação, recebida na horizontal e em superfícies verticais para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais (I_{sol}).

Para cada estação existe uma divisão em zonas climáticas que são definidas através de parâmetros diferentes. Na estação de arrefecimento, as zonas climáticas V1, V2 e V3 são definidas pela temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento ($\theta_{ext,i}$). A estação de aquecimento divide as zonas I1, I2 e I3 pelo número de graus-dia (GD). A Tabela 2-4 e a Tabela 2-5 indicam os intervalos de qualificação e a Figura 2-6 apresenta o mapa nacional com as diferentes zonas climáticas [36].

Tabela 2-4 - Critérios de definição das zonas climáticas para a estação de arrefecimento [34]

Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} < \theta_{ext,v} \leq 22^{\circ}\text{C}$	$\theta_{ext,v} > 22^{\circ}\text{C}$
Zona	V1	V2	V3

Tabela 2-5 - Critérios de definição das zonas climáticas para a estação de aquecimento [34]

Critério	$GD \leq 1300$	$1300 < GD \leq 1800$	$GD > 1800$
Zona	I1	I2	I3

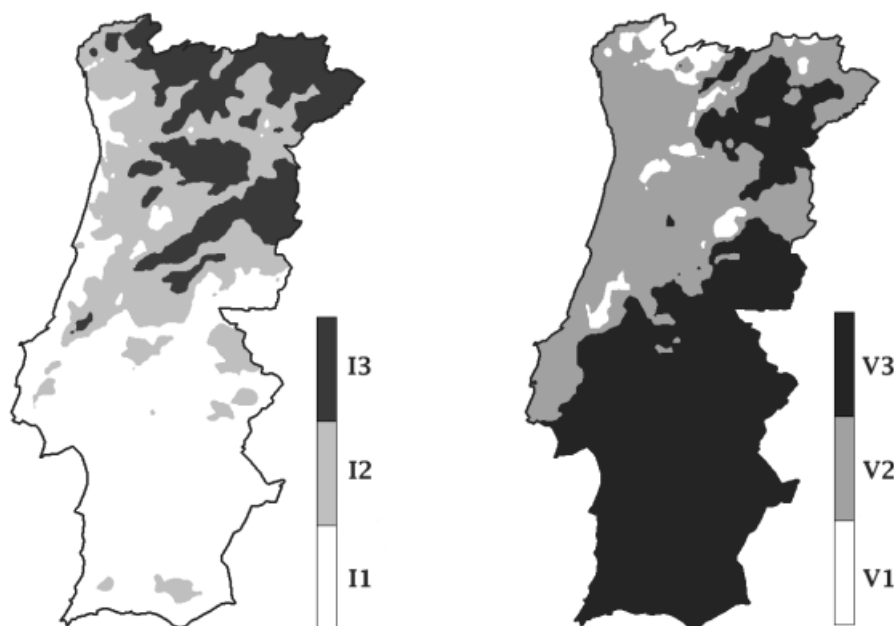


Figura 2-6 - Mapa das zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3) e de inverno (I1, I2 e I3)[36]

Uma vez identificada a zona climática é necessário aceder há Portaria n.º 138-I/2021 [37] para a quantificação máxima dos coeficientes de transmissão térmica a respeitar quer nas envolventes opacas como nas envolventes transparentes assim como os limites máximos admissíveis do fator solar dos envidraçados. A Tabela 2-6 indica os coeficientes de transmissão térmica máximos para as envolventes transparentes.

Tabela 2-6 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente envidraçada para edifícios de habitação [37]

$U_{máx} (W/m^2 \cdot ^\circ C)$	Zona climática		
	I1	I2	I3
Portugal Continental	2,80	2,40	2,20
Região Autónoma da Madeira	2,80	2,40	2,20
Região Autónoma dos Açores	2,90	2,60	2,40

Os envidraçados necessitam de respeitar a condição limite máxima para o fator solar. A Portaria n.º 138-I/2021 [37] define o método de cálculo e os valores estão apresentados na Tabela 2-7.

Tabela 2-7 - Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados, $g_{tot,máx}$ [37]

Tipo de edifício	Inércia do espaço	Zona climática		
		V1	V2	V3
Habitação	Fraca	0,15	0,10	0,10
	Média ou forte	0,56	0,56	0,50

2.5. Influência dos vãos envidraçados no desempenho térmico e energético de edifícios

No decorrer deste capítulo foram descritos alguns dos parâmetros e características que influenciam o comportamento de cada material e do seu conjunto. É importante referir que existem outros parâmetros relevantes como por exemplo: elementos de sombreamento fixos, orientação, área de envidraçado/área de pavimento, etc.

O coeficiente de transmissão térmica é influenciado sempre pelo tipo de material, ou seja, materiais que apresentem condutibilidade térmica menor irão ser melhores isolantes térmicos. Ao nível dos gases, gases mais densos têm uma condutibilidade térmica menor o que resulta num isolamento térmico melhor.

A radiação solar tem um papel ativo nos ganhos solares dos edifícios. No entanto, o uso de películas pode controlar os ganhos solar, influenciando o fator solar dos vãos envidraçados, be-

neficiando a estação de arrefecimento, mas agravando os ganhos solares da estação de aquecimento. No globo terrestre, a radiação solar incidente não é a mesma em todas as zonas nem as condições atmosféricas, por isso é imperativo ter em atenção o zoneamento climático para melhor projetar e idealizar as soluções de vãos envidraçados.

A Tabela 2-8 apresenta algumas referências literárias onde podemos analisar as conclusões obtidas sobre diferentes parâmetros. As mesmas servem como base comparativa para a avaliação futura dos resultados. Ainda, é dado ao leitor um pequeno resumo de cada estudo.

Tabela 2-8 - Tabela resumo de literatura com conclusões acerca dos vãos envidraçados

Referência	Parâmetros avaliados	Tipo de edifício	Localização
Marcos [38]	Caixilharia, Vidro, Películas, Equipamentos de climatização e Análise económica	Habitacional	Portugal - Maia
Oliveira [39]	Características dos envidraçados, sombreamento	Gabinete e Sala de aula	Portugal - Viseu
Veríssimo [17]	Localização, orientação, caixilharia, coeficiente de transmissão térmico, fator solar, sombreamento e proteções solares	Habitacional	Portugal - Évora e Montalegre
Mata [40]	Orientação, Vidro de baixa emissividade	Habitacional	Portugal - Portalegre
Muhaisen and Dabboor [11]	Orientação, área de envidraçado, fator solar, coeficiente de transmissão térmico	Habitacional	Palestina - Faixa de Gaza
Faustino [13]	Vidro, gás, caixilharia, sombreamento	Gabinete	Portugal - Lisboa
Aguilar et al. [41]	Vidros e análise económica	Habitacional	México - Ciudad Juarez
Pereira et al. [26]	Películas	-	-
Cuce and Rif-fat [42]	Tecnologia inovadora de vidros	-	-
Gouveia [43]	Tipo de vidro, perfil, abertura da janela, caixilharia, películas, espaçadores	Habitação e serviço	Portugal - Douro e Baixo Alentejo
Perumal et al. [44]	Espessura da caixa de ar	-	-

- Marcos [38] realizou um estudo técnico e económico de diferentes soluções de envidraçados de uma habitação localizada no concelho da Maia, Porto. As características que fez variar foram o tipo de material da caixilharia (PVC, Alumínio sem corte térmico e Alumínio com corte térmico) e o tipo de envidraçado. São três tipos de vidros duplos em que um deles é um vidro duplo simples, outro um vidro duplo com película Low-e e, em último, um com película Low-e e controlo solar. Realizou também quatro simulações onde aplicava uma pala como elemento de sombreamento. Com este estudo, o autor conclui que diferentes soluções resultam em comportamentos diferentes para estações diferentes, ou seja, a escolha de um material pode ser ideal para uma estação e para a outra ser menos eficaz. A escolha deverá ter em conta o período de retorno do investimento considerando o custo da solução e do preço da quantidade de energia para climatização necessária. A caixilharia de PVC é a que tem menos perdas de calor associadas na estação de inverno. O vidro duplo com baixa emissividade (Low-e) apresenta melhor desempenho térmico em todas as caixilhari­as;
- Oliveira [39] analisou um gabinete e uma sala de aula da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. O objetivo da dissertação é aferir o conforto térmico dos espaços levando em consideração a localização, a orientação, a percentagem dos vãos envidraçados em relação à área de pavimento, uso de películas e de elementos de sombreamento e otimizar o desempenho térmico pela substituição dos vãos envidraçados. Inicialmente é feita uma recolha de dados no local e a otimização recorre ao programa *EnergyPlus*. Constatou-se que o uso de palas de sombreamento horizontais ou verticais nas fachadas orientadas a Sul é eficaz na redução dos ganhos solares na estação de arrefecimento. Dispositivos de proteção solar (películas) são de extrema importância na estação de arrefecimento para fachadas a Sul e sem elementos de sombreamento;
- Veríssimo [17] estudou o comportamento térmico e eficiência energética de um edifício habitacional em 8 regiões portuguesas, contudo, analisou a influência de diferentes soluções de vãos envidraçados com mais critério em Montalegre e Évora. Usou como materiais para a caixilharia alumínio com e sem corte térmico, PVC, fibra de vidro e madeira; para os vidros foram usados vidros duplos e triplos preenchidos com argon, dos quais estes apresentam películas de controlo solar e de baixa emissividade. O autor concluiu que a análise técnica sugere um tipo de solução, contudo, a análise económica remete para outro tipo de solução menos eficiente, mas que justifica em termos de eficiência;
- Mata [40] analisou a eficiência térmica de uma unidade hoteleira em Portalegre, com auxílio do programa *EnergyPlus*. Foram analisados diferentes dispositivos de proteção solar como portadas, estores venezianas e pala horizontal). O autor estudou ainda a influência da orientação dos vãos envidraçados e o tipo de vidro. O estudo revela a importância das orientações dos envidraçados nos ganhos solares, as vantagens e desvantagens dos tipos de vidro e a relevância de usar dispositivos de proteção solar;
- Muhaisen e Dabboor [11] investigaram os edifícios na Faixa de Gaza que consomem mais energia com vidros simples e caixilharia de alumínio sem corte térmico. O estudo indica que as orientações tomadas pelos vãos envidraçados podem reduzir as necessidades de energia para climatização. A influência da área de vão envidraçados é representativa no

aumento das necessidades energéticas assim como o tipo de envidraçados desempenha um papel principal na eficiência energética do edifício;

- Faustino [13] levou a cabo o estudo de um gabinete localizado na cidade de Lisboa. O objetivo do estudo foi perceber a influência da caixilharia, do gás usado, os tipos de vidros com e sem películas e o sombreamento podem aumentar a eficiência energética. Em suma, os tipos ideais de vidro, bem como de caixilharia, não são iguais numa análise térmica e económica. O autor recorre ao *EnergyPlus* enquanto ferramenta para análise dos resultados;
- Aguilar et al. [41] analisou o comportamento térmico de quatro configurações diferentes de vidro duplo com e sem películas de controlo solar e baixa emissividade. O estudo foi conduzido para um edifício de habitação no México e evidencia o uso de uma solução valiosa tecnicamente e economicamente;
- Pereira et al. [26] realizaram uma revisão acerca dos diferentes tipos de películas existentes. Analisaram também a influência das películas na eficiência energética dos edifícios. Concluíram que diferentes películas têm comportamentos distintos quando aplicados em diferentes situações;
- Cuce e Riffat [42] apresentam uma revisão de soluções tecnológicas inovadoras para os vãos envidraçados. Invocam as novas tecnologias e explicam como funcionam;
- Gouveia [43] analisou a térmica e acústica dos vãos envidraçados com o objetivo de encontrar uma boa solução de envidraçado. Respeitando a norma e combinando diferentes componentes ao nível do envidraçado analisou as melhores soluções para o desempenho térmico e acústico. Concluiu que o uso de películas Low-e tem uma grande representatividade no desempenho do vão e que vidro triplos são melhores que vidros duplos;
- Perumal et al. [44] analisou a influência da espessura do espaço de ar e a quantidade de espaços de ar numa solução de envidraçado. A espessura do espaço de ar tem impacto na resistência térmica do vão envidraçado e aumenta com o aumento da espessura do espaço de ar

Após o levantamento bibliográfico, o presente estudo pretende evidenciar a necessidade de uma análise térmica e económica no âmbito da reabilitação dos envidraçados, com o intuito de promover a solução que oferece benefícios económicos como, a melhoria da eficiência energética. Pretende ainda demarcar a metodologia para uma escolha sensata. No contexto nacional, onde o mercado é dominado por soluções padronizadas e pela busca por opções mais económicas, esta dissertação analisa os envidraçados com os materiais mais comuns no mercado.

Caso de estudo e metodologias

3.1. Descrição do caso de estudo

O caso de estudo é um edifício unifamiliar destinado à habitação e apresenta uma tipologia T2. Este é um edifício térreo, em que os compartimentos principais (quartos e sala) estão orientados a Sul. As fachadas a Norte (Figura 3-1) e a Oeste apresentam vãos envidraçados com menor área e a fachada Este é constituída apenas por um elemento construtivo opaco. Na fachada Sul (Figura 3-2) encontra-se a maior área envidraçada, aproveitando a luz natural ao longo do dia, reduzindo as necessidades de iluminação e permitindo maximizar os ganhos solares.

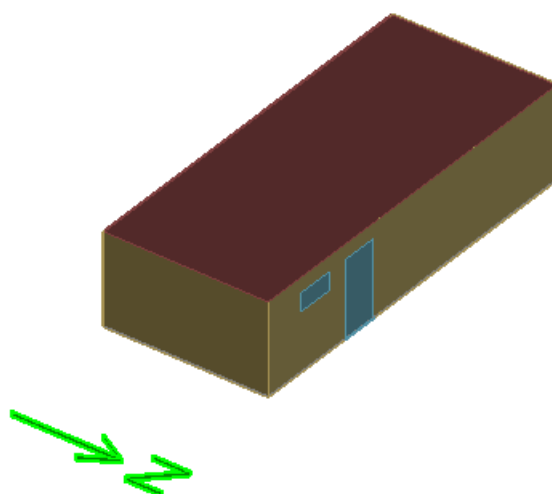


Figura 3-1 - Fachada Norte e Este do caso de estudo

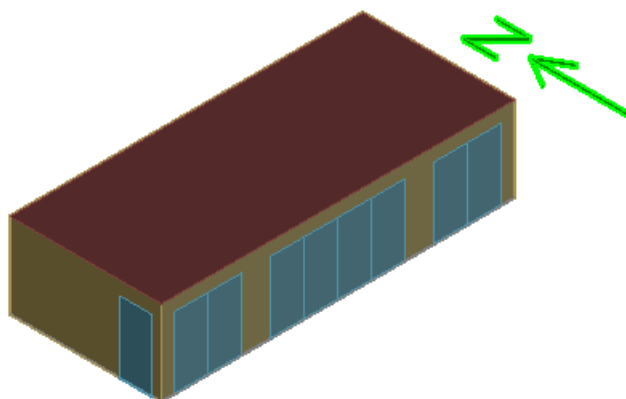


Figura 3-2 - Fachada Sul e Oeste do caso de estudo

Estruturalmente o edifício é de betão armado com uma área útil de $41,5 \text{ m}^2$ e uma área bruta de $47,25 \text{ m}^2$. A Tabela 3-1 indica as áreas dos elementos opacos e transparentes de cada fachada.

Tabela 3-1 - Áreas dos elementos opacos e transparentes do caso de estudo

	Norte	Este	Sul	Oeste	Total
Área total de parede [m^2]	26.25	11.25	26.25	11.25	75.00
Área dos elementos opacos verticais [m^2]	22.65	11.25	4.17	8.49	46.56
Área dos elementos opacos horizontais [m^2]	-	-	-	-	94.5
Área de envidraçado [m^2]	3.60	0	22.08	2.76	28.44
Relação Área vidro/Área parede [%]	13.71	0	84.11	24.53	37.92

3.2. Definição das soluções construtivas

3.2.1. Elementos opacos

As paredes exteriores são compostas por alvenaria de bloco de betão com 25 cm de largura, onde o revestimento interior é um reboco à base de argamassa de cimento de 2 cm de espessura. Como solução de revestimento exterior optou-se por um revestimento de estanquidade à base de sistema de ETICS (*External Thermal Insolation Composite System*) com 40 mm de isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS) e camada de acabamento à base de ligantes sintéticos. A Figura

3-3 ilustra a solução construtiva e a Tabela 3-2 indica as características dos materiais usados. Esta solução apresenta um coeficiente de transmissão térmica de $0,58 \text{ W/m}^2\text{.K}$.

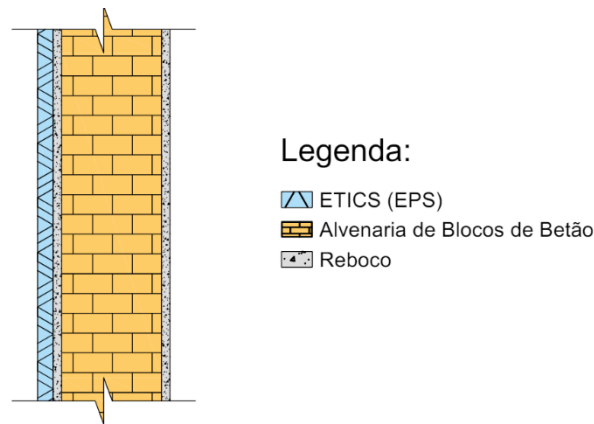


Figura 3-3 - Pormenor construtivo dos elementos verticais opacos

Tabela 3-2 - Características dos materiais das paredes exteriores

Material	Espessura (m)	Condutibilidade térmica (W/m.K)	Massa Volúmica (Kg/m^3)	Calor específico (J/Kg.K)
Reboco	0,02	1,30	1800	837
Alvenaria de blocos de betão	0,25	0,46	2110	922
EPS	0,04	0,04	25	1210
Acabamento	0,002	-	-	-

A laje térrea é em betão armado com uma espessura de 20 cm, uma betonilha de regularização de 10 cm, isolamento térmico (EPS) de 4 cm e um pavimento flutuante laminado. A Figura 3-4 ilustra o pormenor construtivo e a Tabela 3-3 indica as características dos materiais usados. A solução apresenta um coeficiente de transmissão térmica de $0,55 \text{ W/m}^2\text{.K}$.

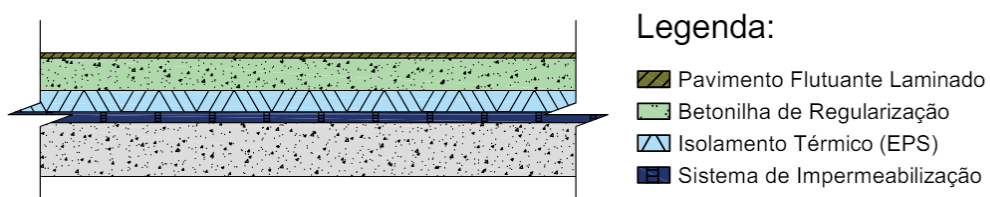


Figura 3-4 - Pormenor construtivo da laje térrea do caso de estudo

Tabela 3-3 - Características dos materiais da laje

Material	Espessura (m)	Condutibilidade térmica ($W/m.K$)	Massa Volúmica (Kg/m^3)	Calor específico ($J/Kg.K$)
Betão armado	0,20	2,00	2300	880
Betonilha	0,10	0,21	640	795
EPS	0,04	0,04	25	1210
Pavimento flutuante laminado	0,01	0,15	500	1200

A cobertura é plana não acessível e é composta por uma laje de betão com espessura de 20 cm, camada de forma com uma inclinação de 1%, isolamento de XPS com 80 mm e seixo rolado como proteção pesado. O interior é rebocado. A Figura 3-5 ilustra o pormenor construtivo da cobertura e a Tabela 3-4 indica as características dos materiais usados. A solução é caracterizada por um coeficiente de transmissão térmica de $0,36 W/m^2.K$.

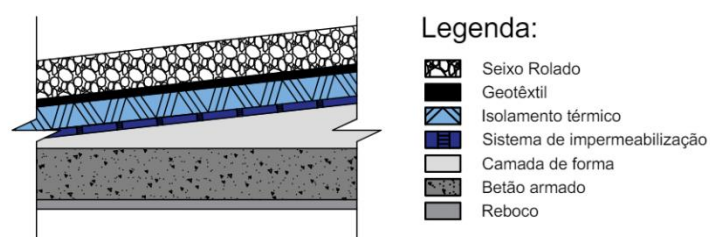


Figura 3-5 - Pormenor construtivo da cobertura do caso de estudo

Tabela 3-4 - Características dos materiais da cobertura

Tabela

Material	Espessura (m)	Condutibilidade térmica ($W/m.K$)	Massa Volúmica (Kg/m^3)	Calor específico ($J/Kg.K$)
Reboco	0,02	1,30	1800	837
Betão armado	0,20	2,00	2300	880
Camada de forma	0,10	0,21	640	795
XPS	0,08	0,04	16	1210
Seixo rolado	0,08	2,00	1500	800

Em relação às zonas de ponte térmica plana (PTP) dos elementos verticais para as zonas de vigas e pilares, a Tabela 3-5 indica as características dos materiais. Estas zonas são caracterizadas por terem um coeficiente de transmissão térmica maior, neste caso é igual a $0,75 W/m^2.K$. São também pontes térmicas planas as zonas de vergas das janelas, caixas de estores e as caixilharias.

Tabela 3-5 - Características dos materiais das PTP com vigas e pilares

Material	Espessura (m)	Condutibilidade térmica ($W/m.K$)	Massa Volúmica (Kg/m^3)	Calor específico ($J/Kg.K$)
Reboco	0,02	1,30	1800	837
Betão armado	0,25	2,0	2400	880
EPS	0,04	0,04	25	1210

3.2.2. Vãos envidraçados

O caso de estudo é constituído por um total de 11 vãos envidraçados dos quais 10 são de 2,10m x 1,00m (4 oscilo-batentes, 5 fixos e uma porta de vidro) e um vidro de 0,50m x 1,00m (batente).

Os elementos verticais transparentes serão de diferentes tipos, ou seja, vão variar ao nível da caixilharia, do gás presente no espaço entre vidros e nas películas usadas. Todas as soluções seguem as mesmas dimensões, sendo as dimensões de 6 + 16 + 6 (mm) em que os 6 mm correspondem aos vidros e os 16 mm ao espaço de ar. O vidro interior será sempre um vidro simples e o exterior será aquele que sofrerá as variações.

Os gases usados variam entre o ar (gás mais comum e mais económico presente no mercado) e o argon com ar, na proporção de 90% para 10%, respetivamente. Ao nível da caixilharia, serão estudadas as mais usadas no mercado português: PVC, madeira e alumínio com corte térmico.

Foram escolhidas quatro opções para os envidraçados, provenientes da base de dados do programa *Berkeley Lab WINDOW* e os caixilhos foram introduzidos manualmente no programa. A Tabela 3-6 apresenta as características dos vidros escolhidos.

Tabela 3-6 - Características dos vidros escolhidos da base de dados

Tipo de vidro	Coef. de transmissão térmica (U) - $W/m^2.^\circ C$ Air Árgon	Fator solar ($g_{\perp}$) Air Árgon
Vidro simples	2,69 2,56	0,779 0,780
Vidro de controlo solar	1,85 1,62	0,265 0,258
Vidro baixo emissivo	1,74 1,48	0,565 0,563
Vidro baixo emissivo com controlo solar	1,66 1,39	0,260 0,292

A Tabela 3-7 indica o fator solar e coeficiente de transmissão térmica das diferentes combinações (vidro + caixilho). Os seguintes dados foram retirados após simulação no programa *Berkeley Lab WINDOW*. O Anexo 6.1 apresenta de forma mais detalhada as características das janelas.

Tabela 3-7 - Características das janelas proveniente do *Berkeley Lab WINDOW*

Tipo de vidro	Caixilharia	Gás	Dimensões (largura x altura)	$g_{\perp}$	U_w
Vidro duplo simples	Alumínio c/ corte térmico	Air	2,0 x 2,1m	0,659	2,82
			1,0 x 2,1m	0,635	2,84
			1,0 x 0,5m	0,506	3,07
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,659	2,74
			1,0 x 2,1m	0,636	2,77
			1,0 x 0,5m	0,506	3,03
	PVC	Air	2,0 x 2,1m	0,643	2,33
			1,0 x 2,1m	0,616	2,30
			1,0 x 0,5m	0,468	2,09
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,643	2,25
			1,0 x 2,1m	0,616	2,23
			1,0 x 0,5m	0,469	2,05
	Madeira	Air	2,0 x 2,1m	0,649	2,40
			1,0 x 2,1m	0,624	2,38
			1,0 x 0,5m	0,483	2,23
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,650	2,32
			1,0 x 2,1m	0,624	2,31
			1,0 x 0,5m	0,484	2,19
Vidro de controlo solar	Alumínio c/ corte térmico	Air	2,0 x 2,1m	0,241	2,30
			1,0 x 2,1m	0,236	2,35
			1,0 x 0,5m	0,212	2,80
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,235	2,15
			1,0 x 2,1m	0,230	2,21
			1,0 x 0,5m	0,207	2,73
	PVC	Air	2,0 x 2,1m	0,225	1,81
			1,0 x 2,1m	0,217	1,81
			1,0 x 0,5m	0,175	1,83
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,219	1,66
			1,0 x 2,1m	0,211	1,67
			1,0 x 0,5m	0,170	1,75
	Madeira	Air	2,0 x 2,1m	0,231	1,88
			1,0 x 2,1m	0,224	1,89
			1,0 x 0,5m	0,190	1,97
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,225	1,73
			1,0 x 2,1m	0,218	1,75
			1,0 x 0,5m	0,180	1,89

Tabela 3-7 - Características das janelas proveniente do *Berkeley Lab WINDOW (comt.)*

Tipo de vidro	Caixilharia	Gás	Dimensões (largura x altura)	$g_{\perp}$	U_w
Vidro de baixa emissividade	Alumínio c/ corte térmico	Air	2,0 x 2,1m	0,485	2,23
			1,0 x 2,1m	0,469	2,28
			1,0 x 0,5m	0,383	2,77
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,484	2,01
			1,0 x 2,1m	0,468	2,13
			1,0 x 0,5m	0,382	2,68
	PVC	Air	2,0 x 2,1m	0,469	1,74
			1,0 x 2,1m	0,450	1,74
			1,0 x 0,5m	0,345	1,79
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,468	1,58
			1,0 x 2,1m	0,449	1,59
			1,0 x 0,5m	0,345	1,71
	Madeira	Air	2,0 x 2,1m	0,475	1,81
			1,0 x 2,1m	0,457	1,82
			1,0 x 0,5m	0,360	1,93
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,474	1,65
			1,0 x 2,1m	0,457	1,67
			1,0 x 0,5m	0,360	1,85
Vidro de baixa emissividade com controlo solar	Alumínio c/ corte térmico	Air	2,0 x 2,1m	0,237	2,18
			1,0 x 2,1m	0,232	2,24
			1,0 x 0,5m	0,208	2,74
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,232	2,01
			1,0 x 2,1m	0,228	2,08
			1,0 x 0,5m	0,205	2,66
	PVC	Air	2,0 x 2,1m	0,221	1,69
			1,0 x 2,1m	0,213	1,70
			1,0 x 0,5m	0,171	1,77
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,216	1,52
			1,0 x 2,1m	0,208	1,54
			1,0 x 0,5m	0,168	1,68
	Madeira	Air	2,0 x 2,1m	0,227	1,76
			1,0 x 2,1m	0,220	1,78
			1,0 x 0,5m	0,186	1,91
		Árgon	2,0 x 2,1m	0,223	1,59
			1,0 x 2,1m	0,216	1,62
			1,0 x 0,5m	0,183	1,82

3.3. Dados climáticos das zonas de estudo

A obtenção dos dados climáticos remete para o Despacho n.º 15793-F [36] que possibilita a atribuição do NUTS de nível III, através da localização em estudo.

As características que determinam os zonamentos climáticos de inverno e de verão são o número de graus dias de referência e temperatura média exterior correspondente à estação convencional de arrefecimento de referência. O processo de determinação das zonas climáticas foi abordado no capítulo 2.4.

As quatro zonas onde será aplicado o caso de estudo são: Faro, Lisboa, Bragança e Évora. A escolha destas localizações atende à necessidade de avaliar o comportamento técnico e a análise económica da melhor solução em zonas com climas distintos onde os ganhos solares e incidência solar diferem. Os dados climáticos encontram-se indicados na Tabela 3-8.

Tabela 3-8 - Dados climáticos das cidades em estudo

Cidade	GD_{REF} (°C)	$\theta_{ext,v REF}$ (°C)	Zona climática da est. de aqueci- mento	Zona climática da est. de arrefeci- mento	$U_{m\acute{a}x}$	$g_{tot,m\acute{a}x}$
Faro	987	23,1	I1	V3	2,80	0,50
Lisboa	1071	21,7	I1	V2	2,80	0,56
Bragança	2015	21,5	I3	V2	2,20	0,56
Évora	1150	24,3	I1	V3	2,80	0,50

Analisando os valores máximos para o coeficiente de transmissão térmica e o fator solar (Tabela 3-8) e comparando com os valores presentes na Tabela 3-7 verifica-se que os valores são admissíveis por lei. As soluções que, embora não respeitem os valores máximos foram também simuladas.

3.4. Descrição do Berkeley Lab WINDOW

O programa *Berkeley Lab WINDOW* é uma ferramenta desenvolvida pela Lawrence Berkeley National Laboratory, direcionado para o estudo em detalhe de janelas e vidros, através da capacidade de modelar e analisar o comportamento de diferentes soluções de vãos envidraçados. O programa recorre a uma base de dados, que está em constante atualização, que dispõe de diferentes materiais e vidros presentes no mercado atual.

Os parâmetros das janelas aplicadas ao caso de estudo serão fornecidos pelo *Berkeley Lab WINDOW*. A modelação das diferentes soluções permite introduzir os diferentes caixilhos, vidros e as características do espaço de ar. As diferentes combinações terão diferentes coeficiente de transmissão térmica, fator solar e outros parâmetros que depois serão usados como *input* no *Ener-gyPlus*.

3.5. Descrição do *EnergyPlus*

O *EnergyPlus*, programa criado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, permite a modelação e a análise do desempenho térmico dos edifícios com grande rigor. A base de dados do programa, devido à sua complexidade, permite aceder a inúmeros ficheiros com dados climáticos distintos, calculando com rigor o desempenho energético dos edifícios em diferentes partes do globo terrestre.

Esta ferramenta é exaustiva na sua essência e, portanto, a modelagem dos edifícios permite não só considerar as propriedades das envolventes opacas e transparentes, como permite considerar a permanência de humanos, a existência de diferentes zonas de temperaturas pelas diferentes divisões, a existência de climatização, iluminação, o uso de equipamentos elétricos e considerar ventilação natural. Ao nível dos envidraçados, o programa oferece a opção de introduzir elementos de sombreamento, palas horizontais e/ou verticais, ajustar a orientação, etc. O *EnergyPlus* permite, adicionalmente, calendarizar todas as atividades, desde as horas em que a habitação se encontra ocupada, à ativação dos estores/sistemas de climatização a acontecer quando certas condições não são respeitadas e à definição do período das estações de aquecimento e arrefecimento.

A modelação do caso de estudo contou com as seguintes considerações:

- A taxa de renovação de ar horária média anual é de $0,6 \text{ h}^{-1}$;
- Os dados climáticos são provenientes da base de dados do *EnergyPlus*;
- Os dados dos vão envidraçados são provenientes do *Berkeley Lab WINDOW*;
- Todos os compartimentos do edifício estão à mesma temperatura ambiente;
- O caso de estudo considera a existência de 4 habitantes que se encontram em repouso com um metabolismo de 100 W/pessoa . Considerou-se que no período das 21:00h-07:00h os 4 habitantes encontram-se dentro da habitação, das 07:00h-19:00h a casa está vazia e das 19:00h-21:00h estão 2 habitantes presentes;
- Os aparelhos de iluminação consomem um valor médio de 10 W/m^2 com horários e valores de utilização diferentes ao longo do dia e do ano;
- Em todo o ano, exceto de 1 de maio a 30 de setembro temos um uso de 60% da iluminação total no período das 18h até às 24h e de 10% nas restantes horas. Para o outro período do ano apenas varia o uso de 60% para 80%;
- Os equipamentos elétricos consomem em permanência um valor médio de 15 W/m^2 ;
- O uso de um aparelho de climatização que manterá a temperatura interior dentro dos 18 e 25°C .

A ativação dos estores difere de todas as fachadas para a fachada norte. A fachada norte segue a seguinte agenda: de 1 de junho a 30 de setembro, os estores estão fechados totalmente no período das 21h às 07h e abertos ao longo do dia; no resto do ano, fecham às 18h e abrem às 07h. A fachada sul e oeste segue a seguinte agenda: de 1 de junho a 30 de setembro, os estores estão fechados totalmente das 21h às 07h, abertos parcialmente a 60 por cento das 07h às 18h e 30 por cento das 18h às 21h. O resto do ano conta com abertura total das 07h às 18h e fechados no restante.

3.6. Descrição das combinações simuladas

No total, foram simuladas 24 combinações, inicialmente sem elemento de sombreamento, com o objetivo de reduzir a amostra a quatro opções por zona climática. Pretendeu-se que as quatro soluções incluíssem cada tipo vidro, pois podem vir a revelar-se melhores opções aquando da análise económica, mas também para manter a amostra representativa. A Tabela 3-9 esquematiza as combinações utilizadas. A leitura das siglas é feita da seguinte forma: as primeiras letras remetem para o tipo de vidro utilizado, as letras do meio para o tipo de caixilharia e as últimas letras para o tipo de gás utilizado.

A título exemplificativo, a combinação "VD_A_Air" indica que temos um vidro duplo simples (VD) com uma caixilharia de alumínio com corte térmico (A) e o gás usado é o ar (Air).

Tabela 3-9 - Mapa das combinações analisadas no *EnergyPlus*

	Alumínio com corte térmico		PVC		Madeira	
	Ar	Árgon	Ar	Árgon	Ar	Árgon
Vidro duplo	VD_A_Air	VD_A_Ar	VD_P_Air	VD_P_Ar	VD_M_Air	VD_M_Ar
vidro de controlo solar	VC_A_Air	VC_A_Ar	VC_P_Air	VC_P_Ar	VC_M_Air	VC_M_Ar
vidro de baixa emissividade	VB_A_Air	VB_A_Ar	VB_P_Air	VB_P_Ar	VB_M_Air	VB_M_Ar
vidro de baixa emissividade com controlo solar	VBC_A_Air	VBC_A_Ar	VBC_P_Air	VBC_P_Ar	VBC_M_Air	VBC_M_Ar

3.7. Pressupostos da análise económica

No âmbito do Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 dezembro, na sua atual redação, a viabilidade económica é analisada através do período de retorno simples (PRS) aplicável exclusivamente ao Plano de Melhoria do Desempenho Energético dos Edifícios (PDEE), nos termos do Despacho n.º 6476-D/2021 [45]. No que respeita aos vãos envidraçados, estes podem não apresentar um PRS aceitável, uma vez que a maioria dos edifícios em Portugal não têm consumos expressivos de climatização. Deste modo, a análise custo-ótimo, com base no Regulamento delegado (UE) n.º 244/2012 [46] é uma opção mais viável. A seguinte análise recorre à expressão 3.1 [47].

$$C_g = Ci + \sum_{i=1}^{50} (C_{a,i} * R_d(i)) - C_g^{ref} \quad (3.1)$$

Em que:

- C_g é o custo global no período de cálculo em €;

- C_i é o custo de investimento inicial em €;
- $C_{a,i}$ é o custo anual de energia no ano i em €;
- C_g^{ref} custo global do edifício de referência em €;
- R_d é o fator de desconto para o ano i com a taxa de desconto r, que se calcula pela expressão 3.2.

$$R_d = \left(\frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^p \quad (3.2)$$

- p é o número de anos a partir do período inicial. Neste estudo p é igual a 50 anos.

O valor da taxa de desconto r é o apresentado no Regulamento delegado (UE) n.º 480/2014[48]. O custo anual de energia ($C_{a,i}$)[49] calcula-se pela expressão 3.3.

$$C_{a,i} = \left(\frac{f_{i,k} * N_{ic}}{\eta_{i,k}} + \frac{f_{v,k} * N_{vc}}{\eta_{v,k}} \right) * \text{custo da energia (€)} \quad (3.3)$$

Em que:

- $f_{i,k}$ é a parcela das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k;
- N_{ic} são as necessidades de energia útil para aquecimento em kWh/ano;
- $\eta_{i,k}$ é a eficiência do sistema k para aquecimento;
- $f_{v,k}$ é a parcela das necessidades de energia útil para arrefecimento supridas pelo sistema k;
- N_{vc} são as necessidades de energia útil para arrefecimento em kWh/ano;
- $\eta_{v,k}$ é a eficiência do sistema k para arrefecimento;

Análise do comportamento dos envidraçados aplicados ao caso de estudo

4.1. Análise técnica

A análise técnica incide sobre os resultados obtidos nas simulações efetuadas no *EnergyPlus* para as diferentes combinações. O foco foi analisar tanto a necessidades nominais anuais de energia útil para a climatização do espaço interior, como as trocas de calor pelos vãos envidraçados. Parâmetros como a temperatura interior, as temperaturas superficiais dos elementos exteriores e a radiação incidente foram tidos em conta para a validação dos resultados obtidos.

As necessidades nominais anuais de energia útil para climatização traduzem a quantidade de energia necessária para aquecer ou arrefecer o ambiente interior e manter uma temperatura de conforto dentro dos limites definidos. As necessidades dividem-se entre as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) e as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}). Estes parâmetros, comparados entre si, definem a melhor solução, ou seja, aquela que exigir menores necessidades anuais de energia.

4.1.1. Análise das simulações sem elemento de sombreamento

A Figura 4-1 apresenta as necessidades nominais anuais de energia útil para a estação de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) de Bragança. No Anexo 6.2 encontram-se os resultados obtidos em pormenor para cada zona.

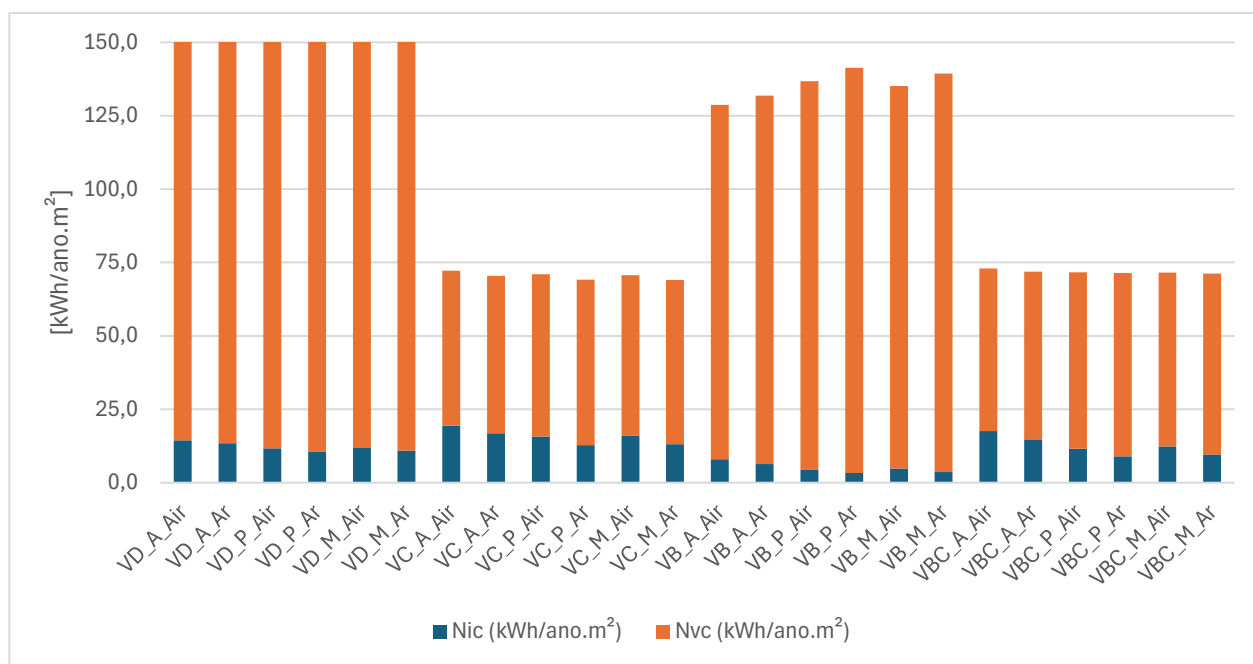


Figura 4-1 - Necessidades nominais de energia útil para sombreamento - Bragança

Analisando a Figura 4-1, constata-se que os vidros de controlo solar apresentam os valores mais baixos para as necessidades nominais de energia útil para a estação de arrefecimento com o valor mais baixo de 52,7 kWh/ano.m². Este tipo de vidros tem fatores solares reduzidos (com valores entre os 0,180 e 0,300) quando comparados às outras soluções, o que oferece menor entrada de radiação solar no edifício, logo menores aumentos da temperatura interior. Por outro lado, para a estação de aquecimento é a pior escolha com as necessidades nominais de energia útil para aquecimento a atingirem os valores mais altos (19,4 kWh/ano.m²). Neste período a parcela da radiação de energia solar transmitida através do vidro para o interior é menor e, por isso, o objetivo é aproveitar toda a radiação incidente possível, contudo, com um vidro com o um fator solar reduzido tal não é possível. Na estação de aquecimento, vidros de baixa emissividade apresentam os menores valores de necessidades nominais de energia útil para aquecimento (3,6 kWh/ano.m²).

Em relação aos gases é possível observar que o argon comparado com o ar oferece menos necessidades de aquecimento (com reduções a variar entre 1 e 2,9 kWh/ano.m²) e, de forma contrária, na estação de arrefecimento, as necessidades aumentam (com aumentos de 1,2 a 5,5 kWh/ano.m²). O ar tem uma condutibilidade térmica maior que o argon, o que resulta num coeficiente de transmissão térmica maior. Dito isto, o argon é um melhor isolante o que é positivo na estação de aquecimento, porém o mesmo não se pode dizer quanto à eficiência na estação de arrefecimento.

As perdas e os ganhos de calor são apresentados em valores percentuais indicando a quantidade de calor ganho ou perdido pelos envidraçados face aos ganhos/perdas totais do edifício. A Figura 4-2 ilustra as perdas e ganhos de calor pelos vãos envidraçados das diferentes combinações em Bragança.

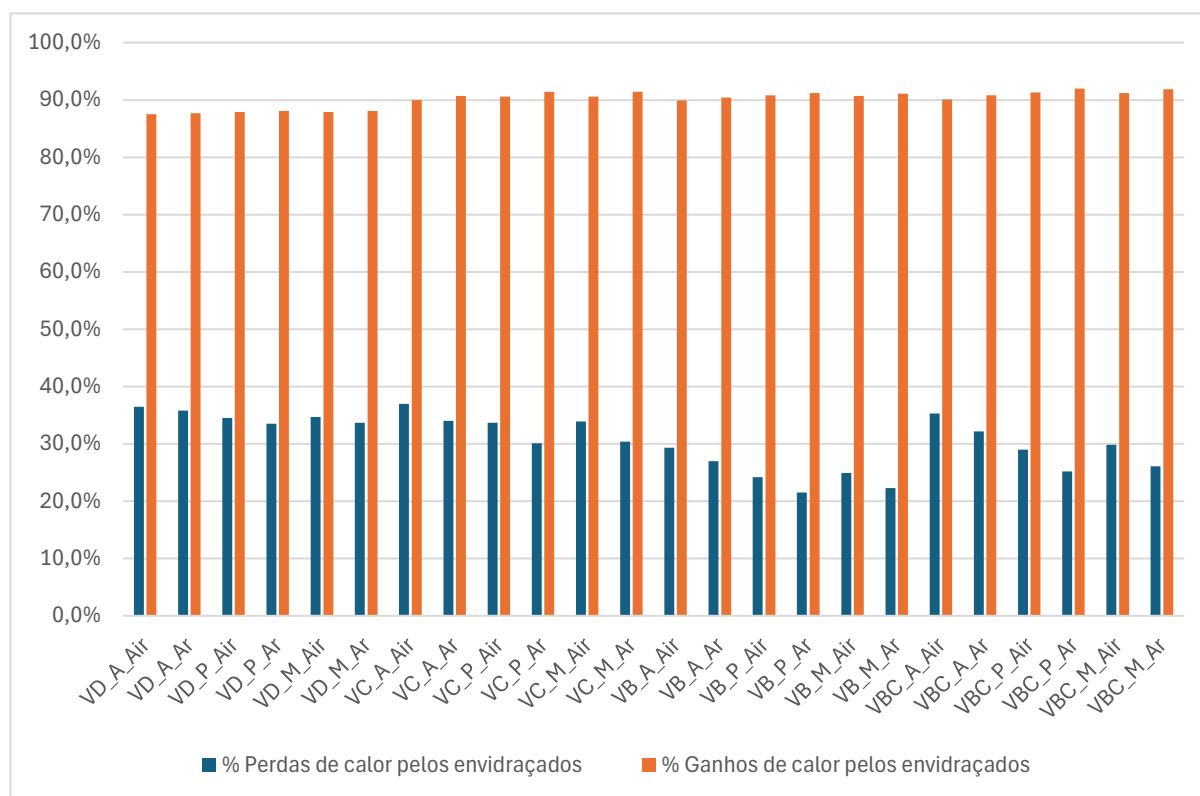


Figura 4-2 - Balanço das trocas de calor pelos envidraçados - Bragança

Pela análise da Figura 4-2 é possível concluir que para os vidros, o coeficiente de transmissão térmica ao ser menor, resulta em menores perdas de calor pelos vãos envidraçados. Assim vidros de baixa emissividade revelam-se as melhores soluções em diminuir as perdas pelos envidraçados e em manter a temperatura interior no intervalo de conforto, sem necessidade de climatização, com um percentual de 42,5% (média) de horas por ano.

Caixilharias em PVC são a melhor solução independentemente do tipo de vidro, para a estação de aquecimento. Contudo, para a estação de arrefecimento o PVC não é o melhor, sendo substituído pelo alumínio com corte térmico. O coeficiente de transmissão térmica influencia diretamente os fluxos de calor, ou seja, para menores coeficientes de transmissão térmica, melhores resultados na estação de aquecimento e piores na estação de arrefecimento. Este facto acontece, pois, os ganhos no verão são muitos (pela falta de sombreamento) e as perdas pelos envidraçados são diminutas provocando sobreaquecimento do espaço interior. Veríssimo [17] obteve uma resposta semelhante face ao comportamento da caixilharia de PVC.

Caso a análise tivesse em conta apenas a componente técnica, a melhor solução para Bragança seria VC_M_Ar. Esta zona é caracterizada pelo seu inverno rigoroso e por um verão com temperaturas altas. Consequentemente, a opção de utilizar materiais com menor coeficiente de transmissão térmica permite aumentar a eficiência energética da habitação. No verão, com radiação solar a atingir valores altos, vidros de controlo solar permitem limitar o aquecimento excessivo proveniente da radiação solar incidente.

Lisboa é um município em que o inverno não é tão rigoroso quanto o de Bragança falamos de uma zona climática I1. Quanto ao verão, por estar mais a sul que Bragança, implica que a radiação incidente seja maior. A Figura 4-3 apresenta as necessidades exigidas para Lisboa.

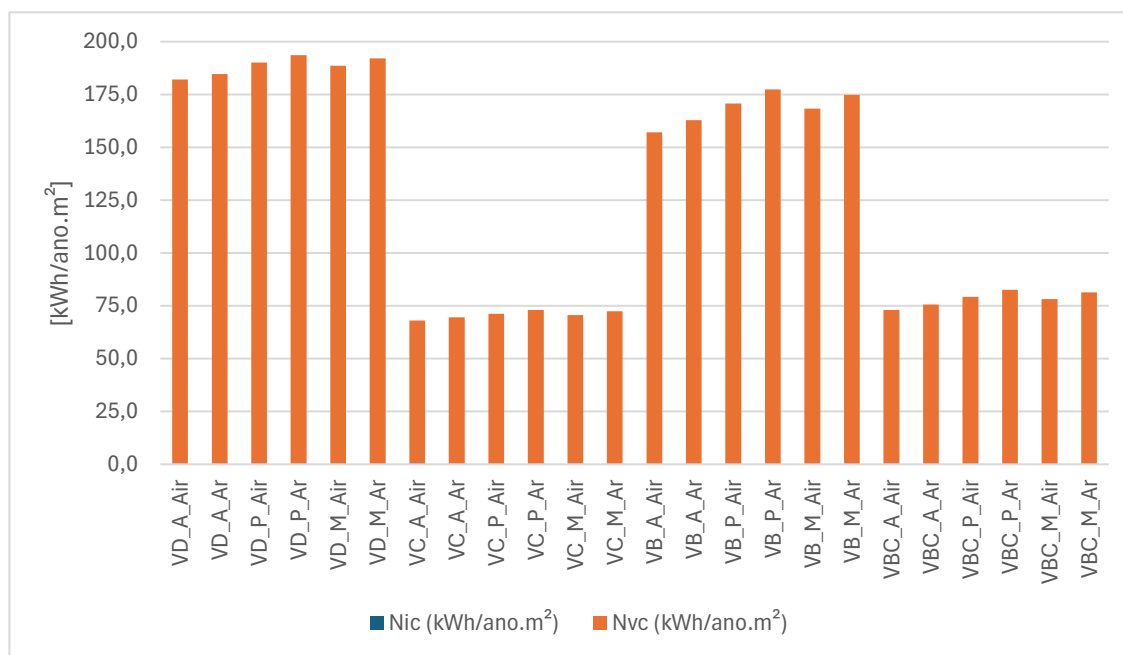


Figura 4-3 - Necessidade nominais de energia útil sem sombreamento - Lisboa

A Figura 4-3 revela que nesta situação, a necessidade de energia para arrefecimento são as mais significativas e por isso é a estação que terá maior atenção. Segundo a Tabela 6-2 (Anexo 6.2) permite observar que as necessidades de energia útil para aquecimento são nulas ou muito reduzidas e, portanto, irrelevantes. Lisboa, com um valor máximo 855,99 W/m² de radiação incidente exige que os vidros ofereçam resistência à radiação que entra para o espaço interior, na estação de arrefecimento. Assim, o vidro de controlo solar é o vidro que exige menores quantidade de energia para arrefecimento com um valor mínimo de 67,6 kWh/ano.m². Estes tipos de vidro têm fatores solares entre 0,171 e 0,241 e consequentemente, seleciona a radiação que entra para o espaço interior reduzindo-a, evitando o sobreaquecimento do espaço. Faustino [13] obteve a mesma conclusão de que, para a estação de arrefecimento o vidro de controlo solar é a melhor solução e os vidros com um fator solar mais alto são os mais prejudiciais para o sobreaquecimento do espaço interior. Em relação aos gases, o autor concluiu que o argon aumenta as necessidades nominais de energia útil para arrefecimento, mas, na estação de aquecimento revela-se o melhor gás, diminuindo as necessidades nesse período.

Podemos observar que, o vidro duplo simples com fatores solares maiores que 0,40 é a pior escolha para Lisboa. A atingir valores máximos (193,6 kWh/ano.m²) de energia para manter o espaço abaixo dos 25 °C. À semelhança da observação feita em Bragança, o argon revela-se pior que o ar, agravando as necessidades de energia na estação de arrefecimento.

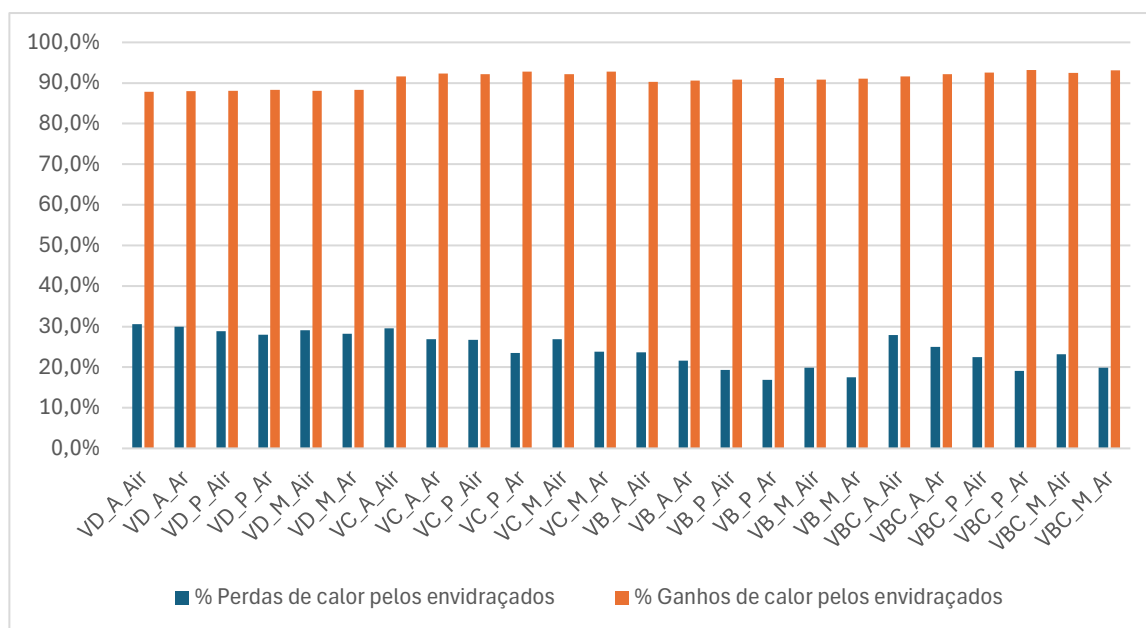


Figura 4-4 - Balanço das trocas de calor pelos envidraçados - Lisboa

Em relação às caixilharias, a Figura 4-4 revela que o alumínio com corte térmico é o material que permite aumentar as perdas de calor (aproximadamente 30%), algo benéfico para o espaço interior, pois permite que o espaço interior não sobreaqueça. O PVC com o coeficiente de transmissão térmica elevado revela-se a pior solução.

Em Lisboa, a solução mais eficiente é VC_A_Air. Sendo a estação de verão a mais preocupante, esta solução, através do vidro, permite reduzir a radiação incidente e em simultâneo maximizar as perdas pelos envidraçados. Esta combinação permite que apenas 50,3% do ano seja necessário climatizar o espaço interior para respeitar as temperaturas de conforto.

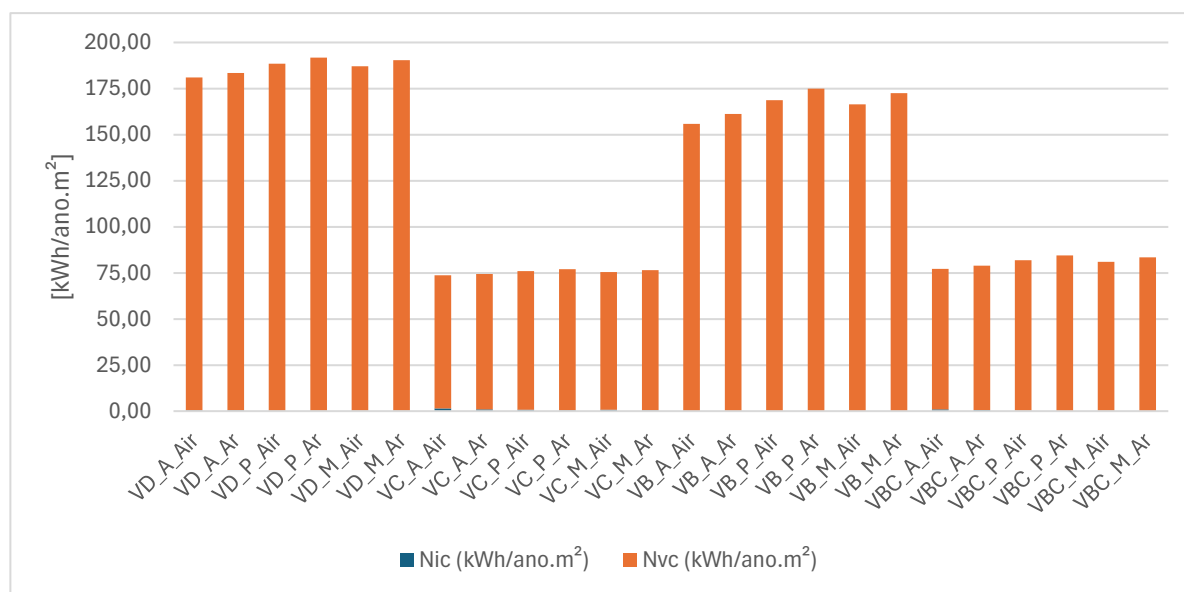


Figura 4-5 - Necessidades nominais de energia útil sem sombreamento - Évora

Évora é caracterizada por ter a zona climática V3 indicando assim verões rigoroso. Pela Figura 4-5 deduz-se a relevância da estação de arrefecimento traduzindo-se nas necessidades de energia para arrefecimento excessivas. O vidro de controlo solar (VC) é o que apresenta as necessidades de arrefecimento mais baixas (a rondar os 75 kWh/ano.m²) e, por conseguinte, o melhor. A radiação incidente nos envidraçados é elevada, atingindo o valor máximo de 869,68 W/m² e a temperatura exterior a atingir valores altos no período de arrefecimento (máximo 38,2 °C), exige vidros com fatores solares reduzidos.

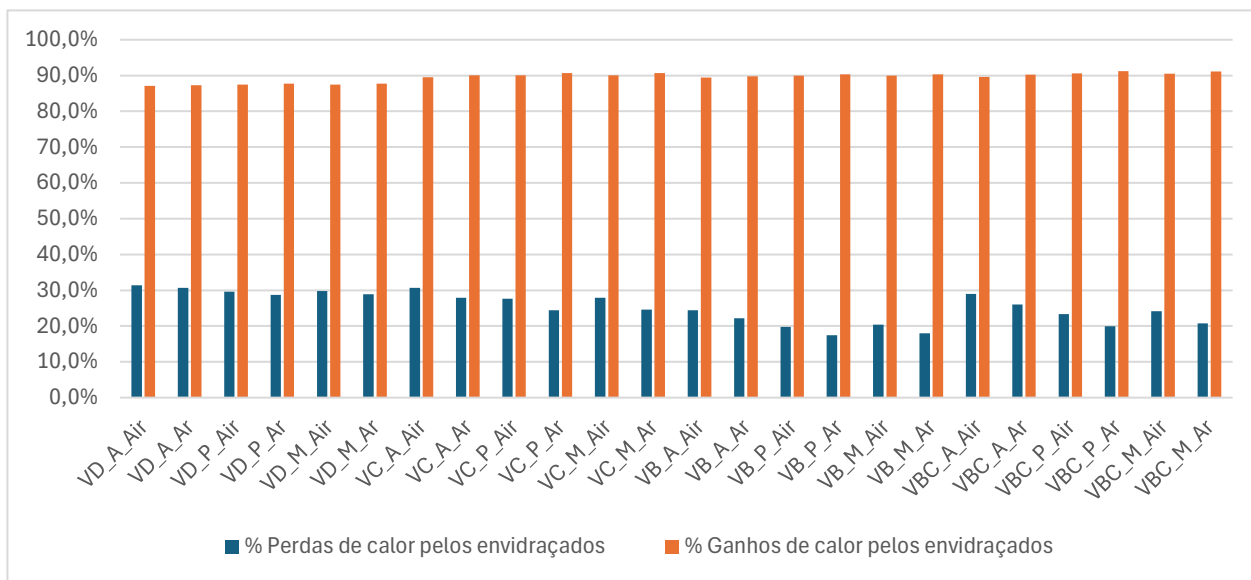


Figura 4-6 - Balanço das trocas de calor pelos envidraçados - Évora

A melhor solução para Évora é a combinação VC_A_Air que apresenta as necessidades nominais de energia útil para climatização de 73,78 kWh/ano.m² e pela análise da Figura 4-6 o alumínio é, mais uma vez, o material que favorece as perdas de calor e, por isso, o melhor para zonas onde a estação de arrefecimento é mais influente.

No caso de Évora, Veríssimo [17] retira conclusões semelhantes relativamente à caixilharia de PVC ser a mais prejudicial e caixilharias com coeficientes de transmissão térmica maiores aumentam as perdas de calor e por isso são as melhores opções para este tipo de clima.

As necessidades de energia para climatização de Faro encontram-se na Figura 4-7.

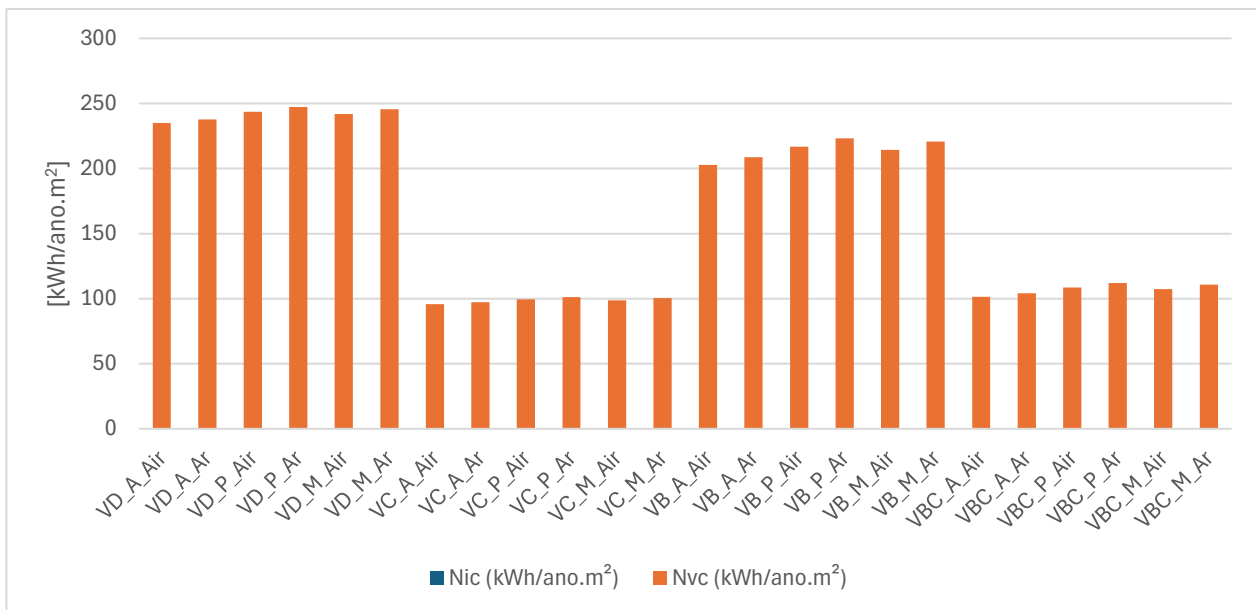


Figura 4-7 - Necessidades nominais de energia útil sem sombreamento - Faro

Faro destaca-se por ser zona climática V3 onde a radiação incidente toma valores máximos de 846,5 W/m². O vidro de controlo solar (VC) é o vidro que apresenta melhores resultados para Faro com as necessidades de energia para climatização a baixo dos 100 kWh/ano.m².

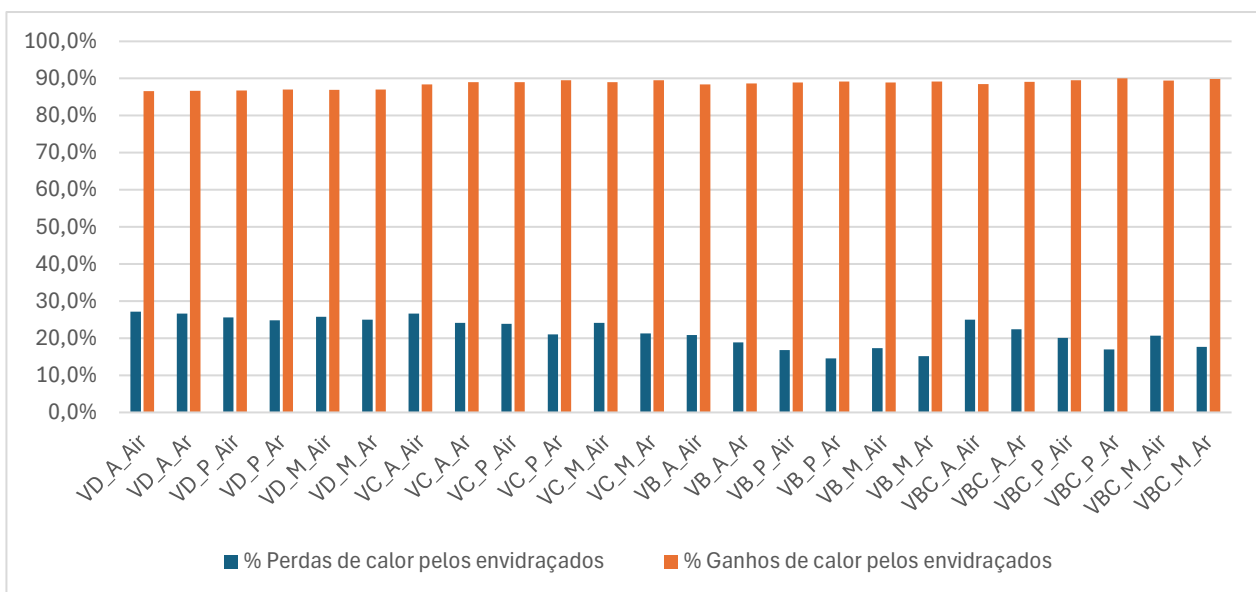


Figura 4-8 - Balanço das trocas de calor pelos envidraçados - Faro

Das soluções VC, a melhor é a solução com alumínio e ar (VC_A_Air) onde, pela Figura 4-8, deduz-se que é a solução com maiores perdas (26,6%). Resumidamente para os municípios de Faro, Évora e Lisboa a melhor solução é a combinação VC_A_Air e para Bragança é a combinação VC_M_Ar.

4.1.2. Análise das simulações com persiana

As simulações sem elemento de sombreamento e oclusão noturna permitiram definir as quatro melhores opções para cada tipo vidro. Deste modo, as combinações presentes na Tabela 4-1 serão alvo de uma análise incluindo uma persiana exterior. A persiana usada conta com as características definidas na Figura 4-9.

Tabela 4-1 - Combinações alvo de análise com elemento de sombreamento e oclusão noturna

Zona climática	Combinação
Lisboa	VD_A_Air
	VC_A_Air
	VB_A_Air
	VBC_A_Air
Faro	VD_A_Air
	VC_A_Air
	VB_A_Air
	VBC_A_Air
Bragança	VD_A_Air
	VC_M_Ar
	VB_A_Air
	VBC_M_Ar
Évora	VD_A_Air
	VC_A_Air
	VB_A_Air
	VBC_A_Air

Field	Units	Obj1
Name		PERSIANA
Solar Transmittance	dimensionless	0,4
Solar Reflectance	dimensionless	0,2
Visible Transmittance	dimensionless	0,4
Visible Reflectance	dimensionless	0,2
Infrared Hemispherical Emissivity	dimensionless	0,9
Infrared Transmittance	dimensionless	0
Thickness	m	0,005
Conductivity	W/m-K	0,1
Shade to Glass Distance	m	0,15
Top Opening Multiplier		0,5
Bottom Opening Multiplier		0,5
Left-Side Opening Multiplier		0,5
Right-Side Opening Multiplier		0,5
Airflow Permeability	dimensionless	

Figura 4-9 - Características da persiana usada nas simulações

A simulação das quatro combinações com persianas exterior em Bragança resultou nos dados apresentados na Figura 4-10.

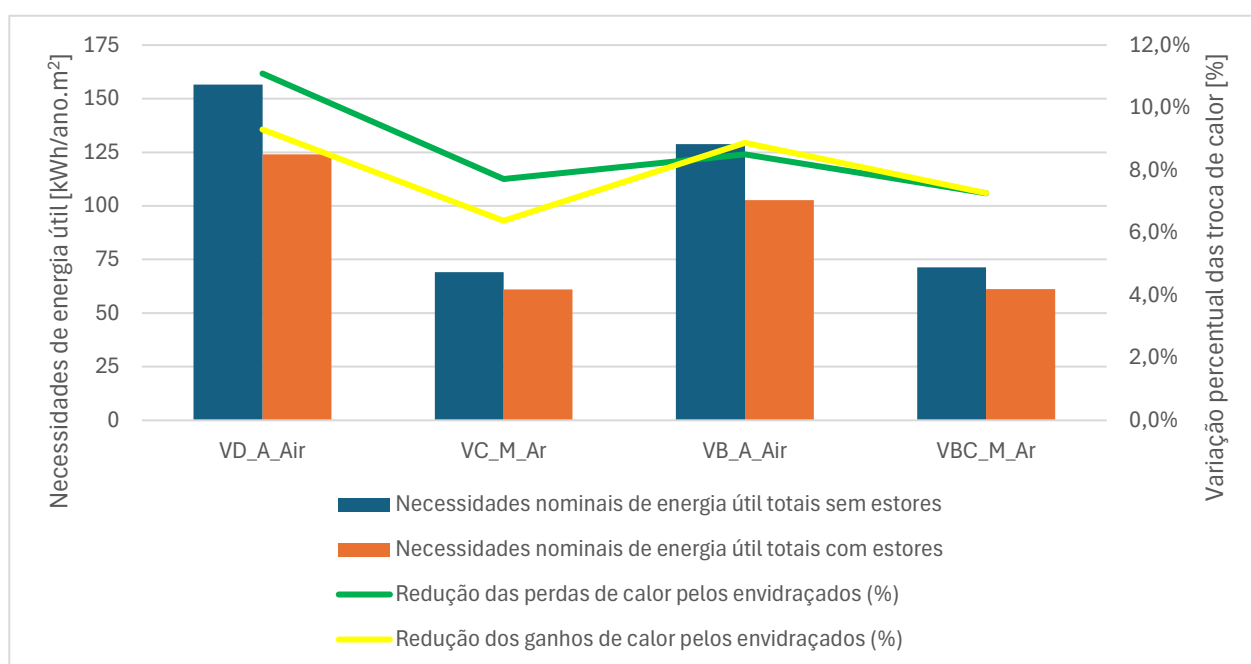


Figura 4-10 - Resultados das simulações com persiana - Bragança

Pela análise da Figura 4-10 a combinação VC_M_Ar mantém-se a melhor opção com as necessidades nominais de energia útil totais de 61 kWh/ano.m² com uma redução de 6,2%. Adicionalmente, a implementação de persiana permitiu reduzir os ganhos de calor pelos envidraçados em 6,4% e as perdas em 7,7%. A implementação da persiana permitiu à combinação VBC_M_Ar reduzir as necessidades nominais de energia útil total em 7,7% atingindo o valor de 61,1

kWh/ano.m². Assim, a combinação VC_M_Ar e a VBC_M_Ar são as duas soluções que termicamente seriam alvo de escolha.

O vidro duplo simples (VD) apresenta os maiores valores percentuais na redução das trocas de calor (11,1% para as perdas e 9,3% para os ganhos). Quando ativado, o estore cria um espaço de ar entre ele e o vidro. Esta combinação, onde o espaço de ar é pouco ventilado, proporciona uma resistência térmica adicional ao vão envidraçado, resultando na redução das perdas de calor. No período diurno, a persiana é usada como elemento de sombreamento, permitindo que a radiação que atravessa o vidro reduza e, de forma direta, as temperaturas superficiais no envidraçado são menores. Os vidros com fatores solares altos e coeficientes de transmissão térmica altos beneficiam mais do uso de estores do que vidros que apresentem condições opostas. Assim, poderá ser mais vantajoso optar por um vidro duplo simples (mais económico) e adicionar uma persiana ao invés de optar por uma solução de envidraçado mais cara que até pode não necessitar de persiana. Tal facto terá de ser estudado para os casos em particular, uma vez que, os resultados técnicos dependem da radiação incidente no edifício, a quantidade de energia que ele necessita para manter as temperaturas no intervalo de conforto e das características dos elementos construtivos.

Assim, para Bragança a melhor opção em termos técnicos é a combinação VC_M_Ar com as necessidades nominais de energia útil total de 61 kWh/ano.m². A Figura 4-11 ilustra os resultados para Lisboa.

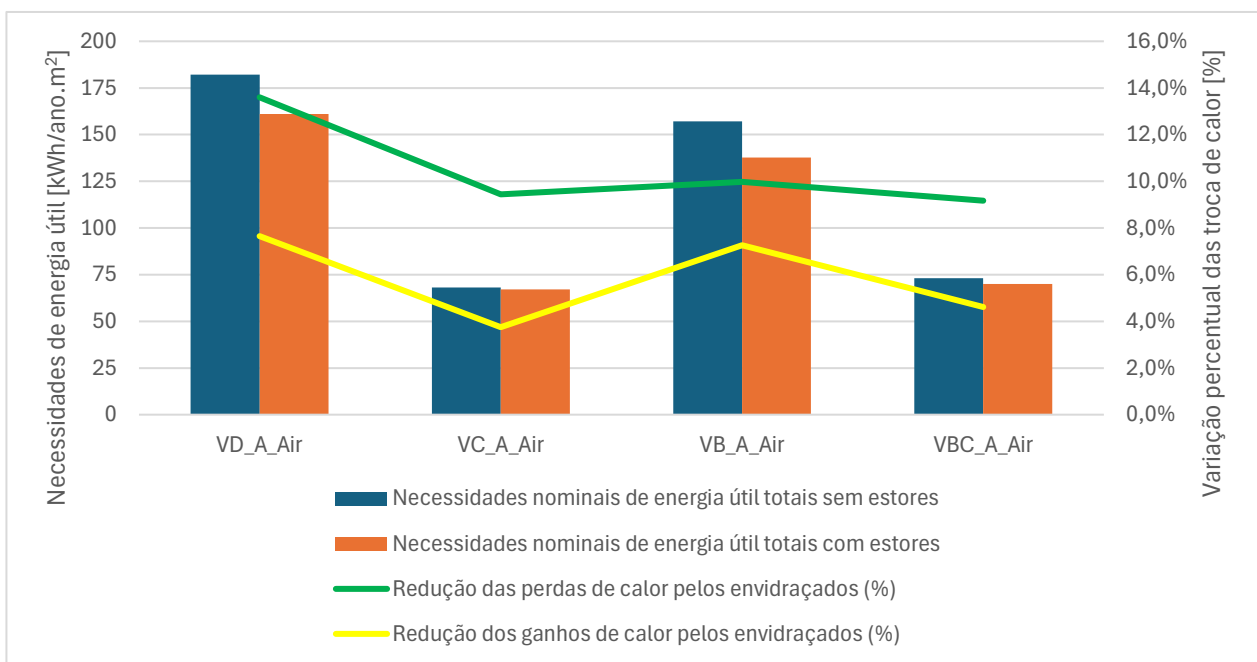


Figura 4-11 - Resultados das simulações com persiana - Lisboa

A Figura 4-11 permite concluir que a combinação VC_A_Air continua a ser a mais eficiente. Esta combinação foi a que menos beneficiou na redução dos ganhos de calor pelos envidraçados com apenas 3,7 pontos percentuais. A implementação da persiana resulta na redução das necessi-

dades nominais de energia útil total de 68,1 kWh/ano.m² para 67,1 kWh/ano.m². Neste caso específico, a inserção da persiana no vidro de controlo solar poderá não registar diferenças significativas que justifiquem o investimento. Claro que na busca pela máxima eficiência é necessária a persiana, em termos económicos o investimento nas persianas pode não justificar. No geral, a persiana revela resultados otimistas na redução das perdas de calor no período noturno pelo que, a sua implementação é justificada. Faustino [13] conclui que para o seu caso de estudo, a implementação de persianas exteriores é a mais vantajosa resultando em reduções energéticas de 25 a 30%. Embora neste caso a redução energética não toma valores percentuais tão altos (reduções de 0 a 12%) é conclusivo e evidente que a persiana exterior é um elemento necessário no município de Lisboa.

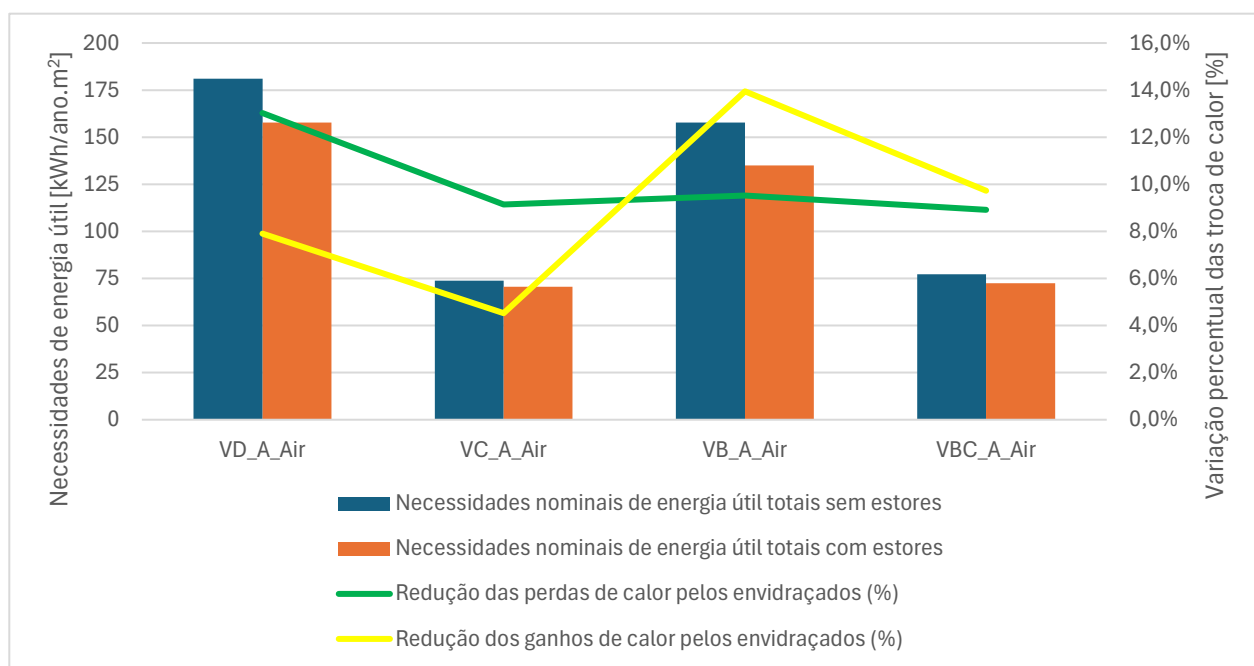


Figura 4-12 - Resultados das simulações com persianas - Évora

Pela análise da Figura 4-12 a combinação VC_A_Air é a mais eficiente com as necessidades nominais de energia útil total de 70,6 kWh/ano.m². O vidro duplo simples embora a solução mais penalizadora, quando usado com a persiana obtém resultados idênticos ao vidro baixo emissivo sem persiana (157,8 kWh/ano.m²). Este facto, em termos económicos pode ser um aliado da poupança no investimento inicial.

Para Faro, a Figura 4-13 indica que a combinação VC_M_Air mantém-se a melhor opção, demonstrando ser a mais eficiente com ou sem persiana. É possível observar ainda que, embora seja a solução mais eficiente, é aquela que beneficia menos do uso da persiana exterior.

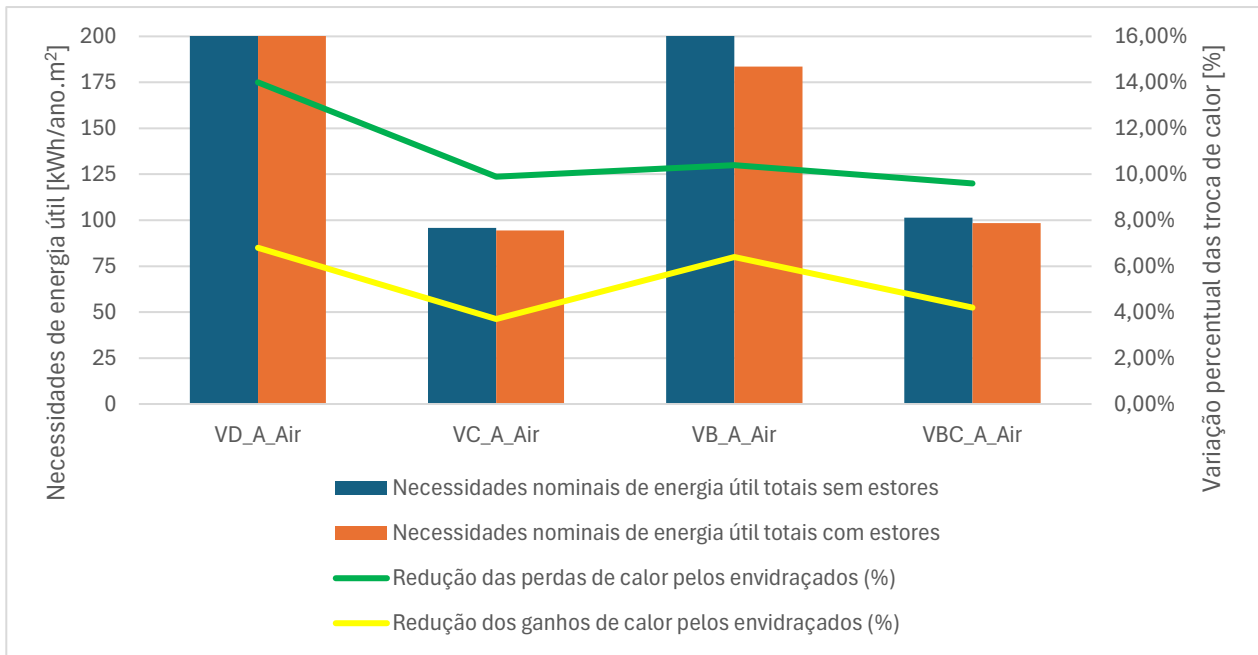


Figura 4-13 - Resultados das simulações com persianas - Faro

4.2. Análise económica

O aparelho de climatização é um *split* com as características apresentadas no Anexo 6.4. A eficiência do sistema para a estação de aquecimento e arrefecimento é de 5,1 e 6,3, respetivamente. Em relação ao custo de energia os preços são dados pela Tabela 4-2. Considerou-se $f_{i,k}$ e $f_{v,k}$ igual a 1 uma vez não haver recurso a energias renováveis.

Tabela 4-2 - Preço da eletricidade [53]

Consumo anual de eletricidade (kWh)	Preços eletricidade (€/kWh)
<1000	0,3138
<2500	0,2151
<5000	0,1938
<15000	0,1848
>=15000	0,1825

A Tabela 6-6 do Anexo 6.5 apresenta os valores obtidos para a análise económica. Embora o PRS não seja uma análise apropriada por não considerar a inflação, a seguinte tabela indica o PRS. A análise custo-ótimo também é referida e será a que tem mais destaque. Os valores para o custo de investimento inicial foram retirados do Gerador de Preços, plataforma que auxilia a orçamentação. A Figura 4-14 ilustra os resultados obtidos para Lisboa.

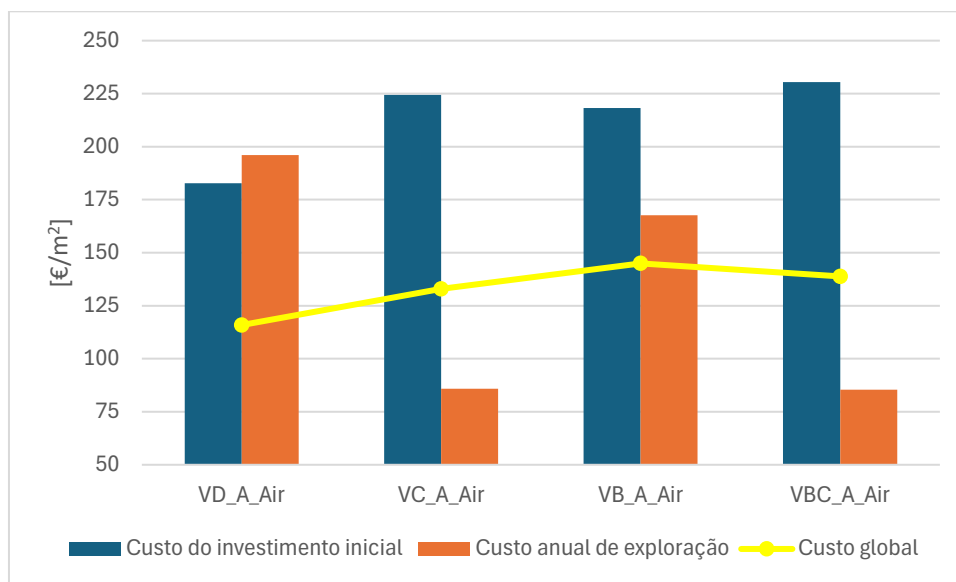


Figura 4-14 - Resultados do estudo económico de Lisboa

Analisando o caso de Lisboa através da Figura 4-14 é possível observar que em termos de investimento inicial todas as combinações à exceção da VD_A_Air, rondam valores muito próximos, mas em termos de custo anual de exploração a solução VB_A_Air indica um custo bastante mais elevado (167,60 €/m²). A combinação que exige um menor custo de investimento inicial é a VD_A_Air com um valor de 7 586,78€, contudo é a solução que atinge o maior valor do custo anual de exploração de 196,04 €/m². Apesar desse facto, é a solução que apresenta um custo global mais baixo de 115,89 €/m². Se a análise térmica indica a solução mais eficiente, a análise económica indica a solução mais rentável por isso, a combinação VC_A_Air (mais eficiente) é substituída pela VD_A_Air.

No entanto, ao observar a Figura 4-15 e Figura 4-16, o período de retorno de ambas as soluções é aos 15 anos e a combinação VC_A_Air resulta num retorno final de 21 433,76€ comparado a 17 649,04€. Nesta situação, embora a solução mais económica seja a VD_A_Air a combinação VC_A_Air deve ser a escolhida pois apresenta melhor eficiência e é aquela que ao fim do período de vida do edifício, permite mais poupanças.

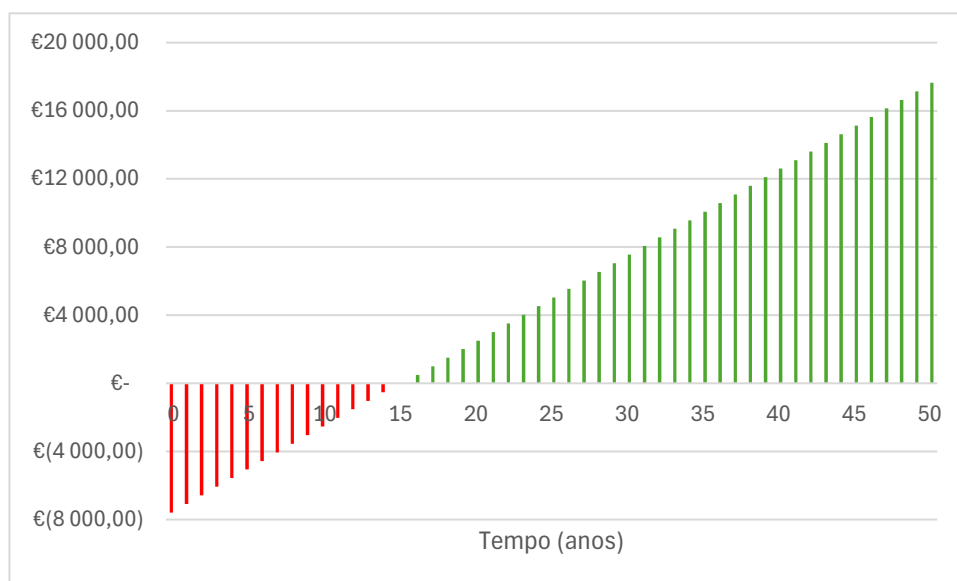


Figura 4-15 - Retorno do investimento da combinação VD_A_Air - Lisboa

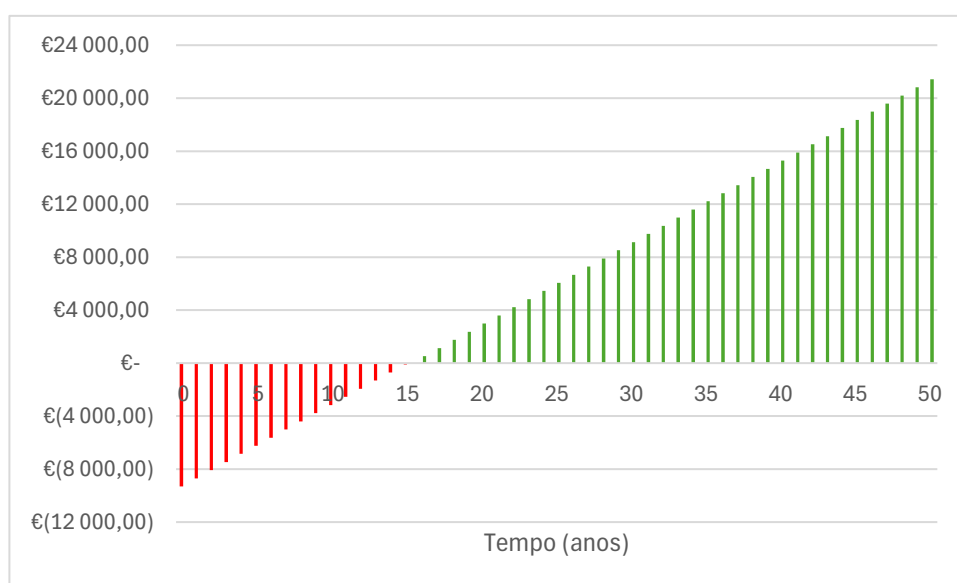


Figura 4-16 - Retorno do investimento da solução VC_A_Air - Lisboa

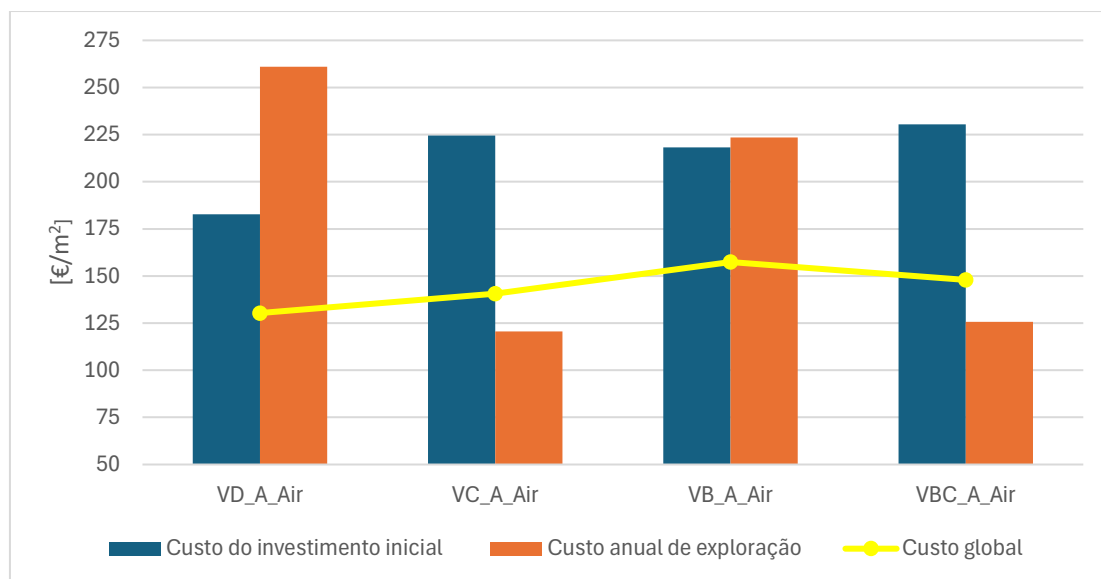


Figura 4-17 - Resultados do estudo económico de Faro

A Figura 4-17 permite concluir as soluções com controlo solar são aquelas que apresentam os menores valores para o custo anual de exploração, valores a rondas os 125 €/m². A solução de vidro duplo simples é aquela que implica um investimento inicial mais baixo, no entanto é aquela que tem maiores custo para climatização (260,95 €/m²). Assim, a solução mais económica é a VD_A_Air com um custo global de 130,35 €/m².

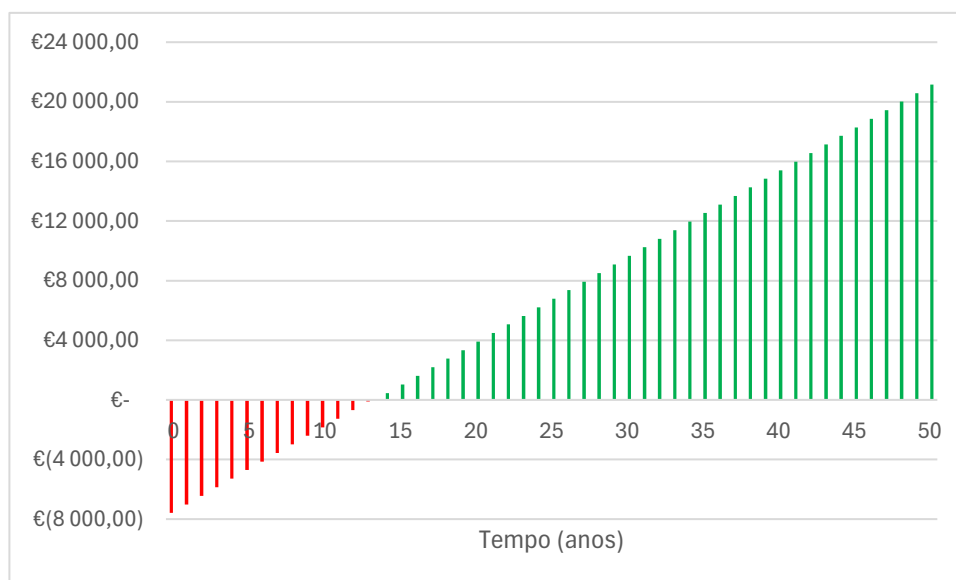


Figura 4-18 - Retorno do investimento da combinação VD_A_Air - Faro

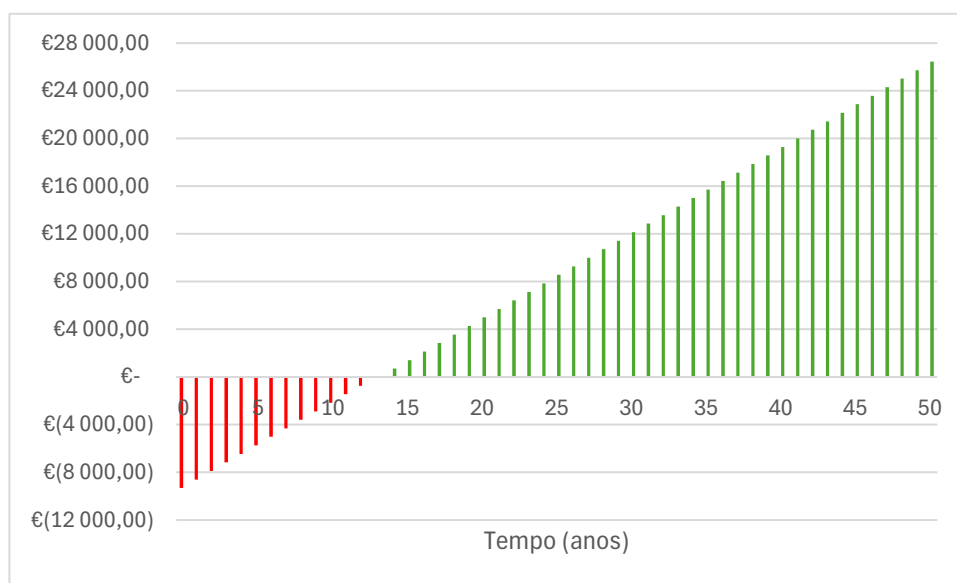


Figura 4-19 - Retorno do investimento da combinação VC_A_Air - Faro

Pela análise da Figura 4-18 e Figura 4-19 o período de retorno do investimento para ambas as soluções é aos 13 anos. A solução VD_A_Air embora seja a solução que implica menor custo global, quando comparada com a solução VC_A_Air, o valor do retorno ao final dos 50 anos é inferior pelo que a solução VC_A_Air é a melhor escolha embora o custo do investimento inicial seja maior. Veríssimo [17] analisou o PVC como caixilharia mais económica, no entanto constatou o facto semelhante de o vidro de controlo solar ser o que apresenta menores custos anuais de energia.

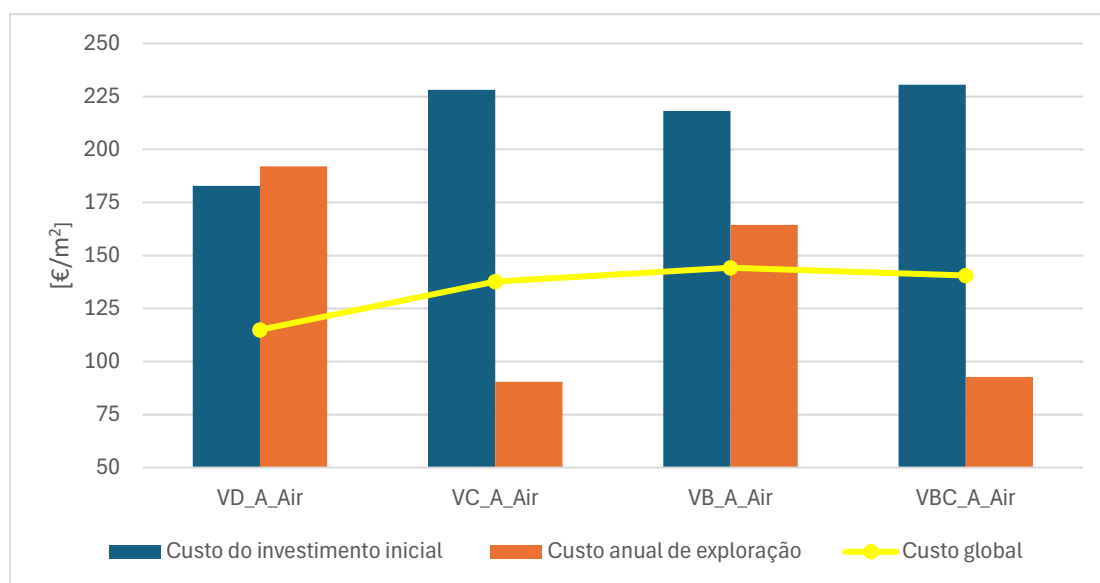


Figura 4-20 - Resultados do estudo económico de Évora

Para Évora, é possível concluir, através da Figura 4-20, que a combinação VD_A_Air é a que tem um custo global menor (115 €/m²) embora o seu custo anual de exploração seja o mais elevado (192,07€/m²).

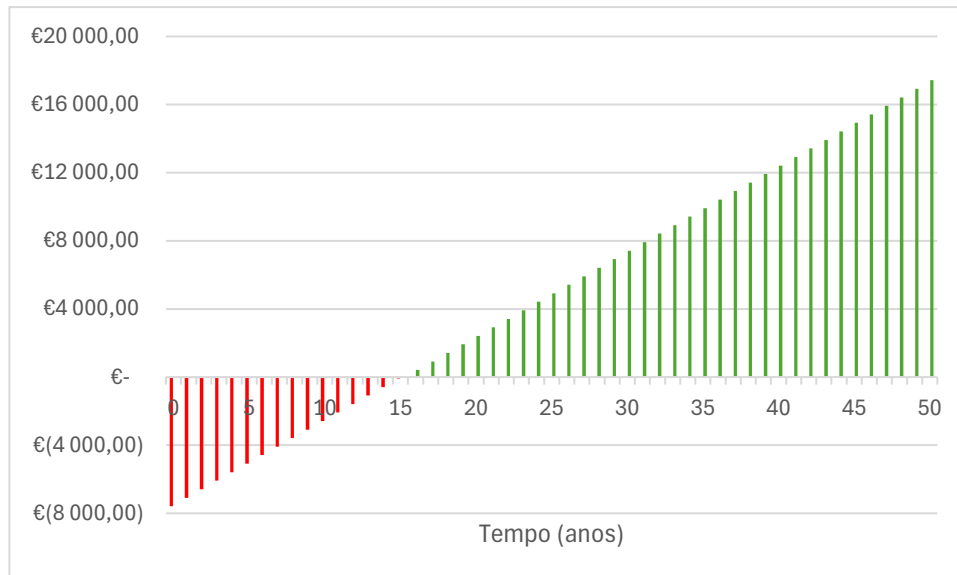


Figura 4-21 - Retorno do investimento da combinação VD_A_Air - Évora

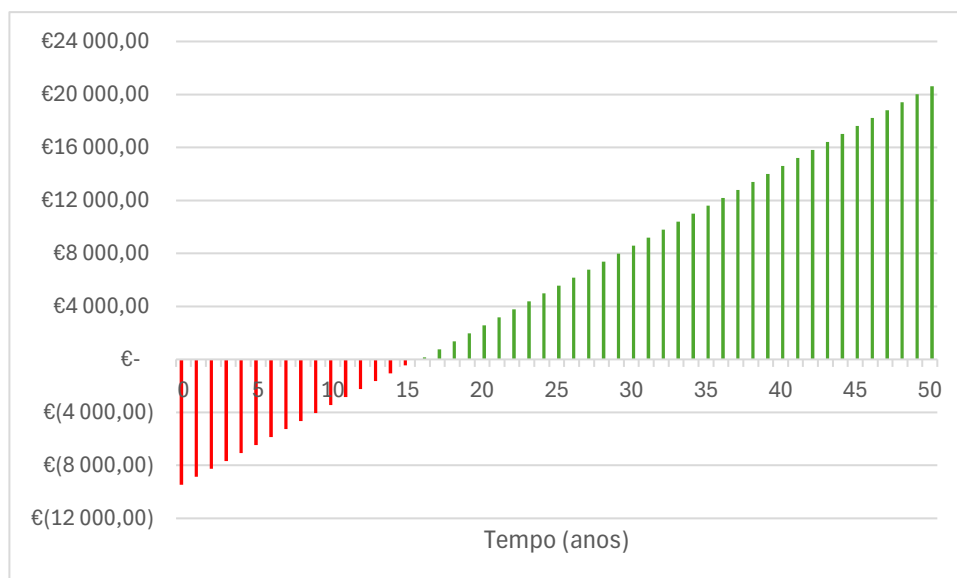


Figura 4-22 - Retorno do investimento da combinação VC_A_Air - Évora

A Figura 4-21 e Figura 4-22 permite constatar que para ambas as soluções o período de retorno ronda os 15 anos, com VC_A_Air a levar mais 7 meses para retornar o investimento. A solução VC_A_Air embora seja aquela que não tem o custo global mais baixo, quando comparada com o a combinação VD_A_Air apresenta um valor de poupança maior para os 50 anos. Assim

VC_A_Air é a melhor solução com um custo global de 137,70 €/m², mas com um retorno de 20 623,02€.

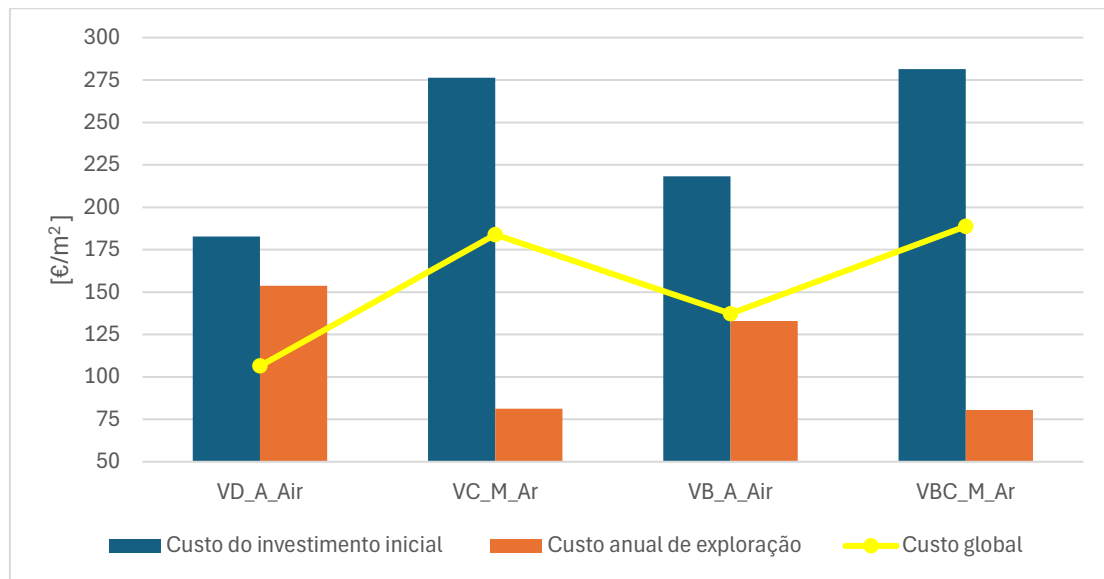


Figura 4-23 - Resultados do estudo económico de Bragança

Para Bragança, através da Figura 4-23 conclui-se que o caixilho de madeira e o árgon levam a um investimento inicial muito elevado (diferença de ± 2000€) quando comparado com as soluções de caixilho de alumínio com corte térmico. Embora VD_A_Air apresente os piores resultados para a análise térmica, o custo do investimento inicial compensa os custos de climatização, com um custo global de 106,48 €/m². Contudo, na procura de uma solução que balance a eficiência energética com a económica, pela Figura 4-24, a combinação VC_M_Ar poderia ser uma boa opção pelo facto de ser a opção mais eficiente e a segunda que proporciona uma poupança ao fim dos 50 anos maior. O único lado negativo desta solução é que o período de retorno deixa de ser aos 17 anos e 8 meses para 22 anos e 11 meses para além do investimento inicial deixar de ser de 7586,78€ e aumentar para 11 472,66€. Este seria um bom caso em que a escolha da combinação passava pela subjetividade do utilizador.

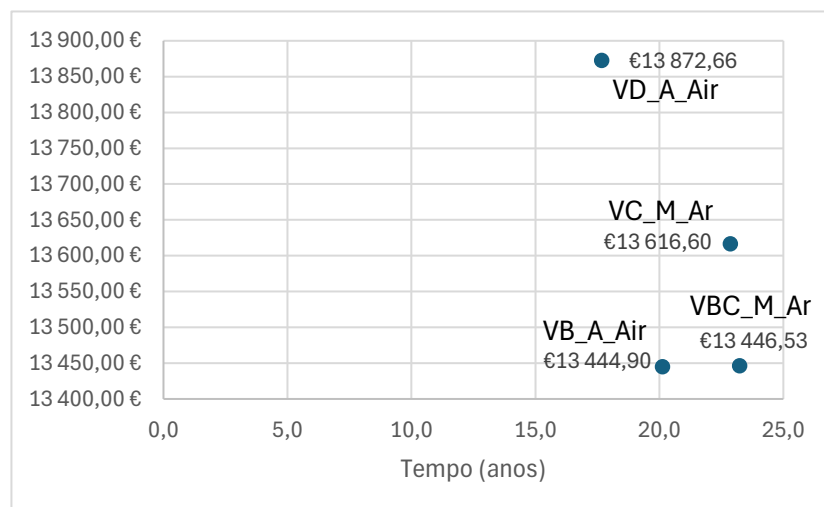


Figura 4-24 - Retorno do investimento para Bragança

É importante destacar que soluções com custos de investimento iniciais muito próximos podem ter custos associados à climatização bastante diferentes o que resulta em valores anuais bastante diferentes para o utilizador. Assim, é conclusivo que um investimento inicial reduzido está associado a um custo anual de exploração mais elevado e vice-versa. Esta relação ocorre porque as soluções com materiais de menor resistência térmica e maior fator solar são mais comuns no mercado e mais baratas. No entanto, o preço reduzido reflete-se numa maior necessidade de energia para climatização. A análise permite também constatar o facto de apesar do investimento inicial ser reduzido não significa que a poupança monetária no final do período de vida do edifício seja a que atinge maiores valores. Podendo ser facilmente ultrapassada por soluções que exijam um investimento inicial maior, mas que em simultâneo resultam em poupanças maiores.

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são expostas as principais evidências retiradas do comportamento térmico e dos resultados económicos das diferentes combinações face à zona climática onde estão inseridas. Por fim, são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

No decurso da presente dissertação apresentou-se uma metodologia para uma correta escolha do vidro, caixilharia e tipo de gás nos casos de necessidade de reabilitação dos vãos envidraçados. Esta metodologia deve ser associada a uma análise holística no que respeita ao melhoramento do isolamento térmico da envolvente opaca do edifício. A reabilitação térmica dos envidraçados com uma envolvente onde o isolamento térmico é pouco ou inexistente pode gerar problemas higrotérmicos previamente inexistentes. Em todos os casos, é necessário recorrer não só à análise térmica como à análise económica para uma escolha consciente e factual. Cada caso terá de ser adequado ao clima e tipo de edificação para que os resultados das simulações e da análise económica sejam o mais realistas possíveis. O parque habitacional português é caracterizado pelo mau desempenho higrotérmico e, conseqüentemente, pelo desconforto dos ocupantes. Aliado a este facto, as habitações portuguesas não recorrem a aparelhos de climatização para controlar a temperatura interior e quando o fazem, são frequentemente pautadas por ineficiência energética. Esta problemática pode ser reduzida se na escolha dos vãos envidraçados exteriores forem analisadas as soluções que exigem menos necessidades de energia útil para climatização e com isso, menores custos de exploração. Do estudo foi possível concluir que:

- Para zonas climáticas I2 e I3, onde o inverno é um período bastante condicionante, o argon é a melhor opção, com uma resistência térmica maior que o ar, permite reduzir as perdas de calor pelo vão envidraçado. O ar revela-se a melhor solução perante uma zona climática com um verão intenso (V2 e V3). Por ser melhor condutor, permite perdas de calor e, conseqüentemente, a diminuição da temperatura interior;
- O material escolhido para a caixilharia tem uma relação direta com o coeficiente de transmissão térmica. O clima influencia a escolha do material pois se for necessário reduzir as necessidades de energia para a estação de aquecimento opta-se por um material que ofereça maior resistência térmica e caso as necessidades de energia para a estação de arrefecimento serem elevadas, a aplicação de uma caixilharia com um

coeficiente de transmissão térmica maior, como por exemplo o alumínio com corte térmico, permite reduzir o sobreaquecimento do espaço interior ao estimular as perdas de calor;

- A utilização de elementos de sombreamento e oclusão noturna são uma mais-valia na melhoria da eficiência térmica. O correto uso destes dispositivos nas diferentes estações como nos diferentes períodos do dia permitem reduzir a radiação incidente no verão, diminuindo a possibilidade de sobreaquecimento do espaço interior. No período noturno, evitam as perdas de calor permitindo que a temperatura do espaço interior não sofra grandes variações de temperatura;
- Vidros de controlo solar, em Portugal, são uma boa escolha por serem eficientes. Contudo, é uma opção que no mercado português, está associada a um investimento inicial elevado quando comparado com outras soluções mais comuns;
- Vidros de baixa emissividade afiguram-se como a escolha mais acertada em zonas onde o inverno é mais rigoroso, como por exemplo o distrito Bragança. Esta solução permite aumentar a eficiência no inverno, mas pode ser prejudicial no verão se este for rigoroso (V3). Economicamente apresenta um investimento inicial elevado, contudo pode ser recompensante por reduzir as necessidades;
- Vidros duplos simples são vidros comuns no mercado e, por isso, mais baratos, contudo pouco eficientes. Comprova-se que apesar da sua ineficiência associada a maiores custos com energia para climatização, estes são vidros que levam a bons valores para o custo global quando comparados com outras soluções (vidros de controlo solar e/ou de baixa emissividade) com um investimento inicial substancialmente maior e mais eficientes (menores valores para o custo de exploração).
- Vidros que apresentem custos globais inferiores devem ser comparados com as outras hipóteses pelo PRS. Por exemplo, em Évora, com um investimento inicial alto (9 468,89€) associado a custos anuais de exploração mais reduzidos (90,42 €/m²) ao fim de 50 anos o valor de poupança é bastante maior que para a solução em que o custo global é de 115 €/m² (comparado a 137,70 €/m²).

Em termos conclusivos, é fundamental mencionar que o mercado relativo aos vãos envidraçados é bastante vasto e, portanto, podem existir melhores opções que as analisadas. Deverá sempre ser analisado um leque de combinações razoáveis para que a amostra seja representativa. Ainda, é imperativo ter em conta também outros fatores como o número de renovações do ar interior, a necessidade de respeitar a legislação vigente e o conforto higrotérmico e acústico.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Propõe-se que em trabalhos futuros seja analisada a influência destas soluções de envidraçados (tendencialmente muito estanques ao ar) no clima interior, nomeadamente a qualidade do ar interior e o comportamento térmico. A instalação de envidraçados pouco permeáveis ao ar, combinados com pouco ou inexistente isolamento térmico na envolvente opaca, conduz a anomalias que não existiam antes da instalação destes envidraçados.

Propõe-se ainda um estudo comparativo do edifício analisado com a redução da área dos envidraçados, alterações da orientação e com o uso de palas horizontais, assim como a influência das diferentes soluções no conforto térmico e visual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Governo de Portugal, «Acordo de Paris 2015-2020», 2020, Acedido: 26 de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3d%3dBQAAAB%2bLCAAAAAAABAAzNLA0tgQAra2cKgUAAAA%3d>
- [2] DGE, «Plano Nacional Energia-Clima 2030», 2019, Acedido: 26 de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://participa.pt/contents/consultationdocument/imported/2585/670002.pdf>
- [3] International Energy Agency, «Energy statistics Data browser». Acedido: 26 de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector>
- [4] Eurostat, «9% of EU populations unable to keep home warm in 2022». Acedido: 26 de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20230911-1>
- [5] Parlamento Europeu e do Conselho, *Diretiva (UE) 2023/1791*. L231/1, 2023, pp. 1-111.
- [6] «Inability to keep home adequately warm - EU-SILC survey», Eurostat.
- [7] K. Mahoney, R. Lopes, S. Sareen, e J. P. Gouveia, «Perceptions of competing agendas in carbon neutrality policies in Portugal: Adverse impacts on vulnerable population groups», 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103509>.
- [8] Presidência do Conselho de Ministros, *Decreto-Lei n.º 101-D/2020*. 2020, pp. 21-45.
- [9] Lx Certificado Energético, «O que é o Certificado Energético?» Acedido: 24 de Janeiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.lxcertificadoenergetico.com/certificacao-energetica-informacao/>
- [10] ADENE, «Estudo do mercado no âmbito das campanhas de sensibilização e de promoção da eficiência energética na Habitação Particular», 2017. Acedido: 27 de Janeiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://www.adene.pt/wp-content/uploads/2019/08/ADENE_vaga-1_Relat%C3%B3rioHABPART.pdf
- [11] A. S. Muhaisen e H. R. Dabboor, «Studying the Impact of Orientation, Size, and Glass Material of Windows on Heating and Cooling Energy Demand of the Gaza Strip Buildings», *Journal of Architecture and Planning*, vol. 27, n. 1, pp. 1-15, 2015, Acedido: 27 de Janeiro de

2024. Disponível em: https://cap.ksu.edu.sa/sites/cap.ksu.edu.sa/files/imce_images/jap_ksu_jan2015_e1.pdf
- [12] V. Halder, «Upgrading a Broad Area Illuminating Integrating Sphere and Solar Transmittance Measurement of a Sheer Blind», 2007. Acedido: 27 de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Upgrading-a-Broad-Area-Illuminating-Integrating-and-Halder/84628a49b841c318eed4623e55e73337f83eefa0>
- [13] C. R. Faustino, «Influência dos Vãos Envidraçados no Desempenho Energético de Edifícios», 2012. Acedido: 1 de Fevereiro de 2024. Disponível em: <https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/api/records/xsfZ4GN1qZmoWA7XjlQmMzY7sqSaLHqN8IAG/file/27fde50bf86512729ce2c40ef32c0b816a9a529dc6fb213c8e530842cd846017.pdf>
- [14] Vasiglass, «Tipos de Vidro: Características e Acessórios». Acedido: 1 de Fevereiro de 2024. Disponível em: <https://vasiglass.pt/tipos-de-vidro-caracteristicas-acessorios/>
- [15] Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, *Portaria n.º 138-I/2021*. 2021, pp. 12-53.
- [16] C. A. P. dos Santos e L. Matias, *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC, 2010.
- [17] B. M. L. Veríssimo, «Influência Dos Vãos Envidraçados No Desempenho Térmico De Edifícios De Habitação», Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2019.
- [18] Innovative, «The Effect of Glass Thickness on Soundproofing». Acedido: 21 de Junho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://aluminiumwindowsanddoors.net.au/the-effect-of-glass-thickness-on-soundproofing/>
- [19] Efficient Windows Collaborative, «Gas Fills». [Em linha]. Disponível em: <https://efficientwindows.org/gas-fills/>
- [20] F. M. A. Henriques, *Comportamento Higrotérmico De Edifícios*. 2011.
- [21] A. G. P. M. Rebelo, «Optimização e dimensionamento de vãos envidraçados», Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009. Acedido: 13 de Fevereiro de 2024. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/2525/1/2010000485.pdf>
- [22] Classe +, «Guia Técnico para Janelas Eficientes». Acedido: 13 de Fevereiro de 2024. Disponível em: <https://www.classemais.pt/>
- [23] Efficient Windows Collaborative, «What are Window Frames?» Acedido: 13 de Fevereiro de 2024. Disponível em: <https://efficientwindows.org/window-frames/>
- [24] JOB, «O que é Caixilharia?» Acedido: 15 de Fevereiro de 2024. Disponível em: <https://jobhomeservice.pt/caixilharia-o-que-e-como-escolher-o-melhor/>
- [25] International Organization for Standardization, «UNE-EN ISO 10077-1:2020», 2020.
- [26] J. Pereira, H. Teixeira, M. da G. Gomes, e A. M. Rodrigues, «Performance of Solar Control Films on Building Glazing: A Literature Review», 1 de Junho de 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/app12125923.
- [27] J. O. Pereira, «Simulação Energética De Películas Em Envidraçados», Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2015.

- [28] CEN (European Committee of Standardization), «Glass in building - Decoration of glass - Part 1: Glass enamels - Definitions and test methods », 2014.
- [29] T. e C. Ministério das Obras Públicas, *Decreto-Lei n.º 80/2006*. Portugal, 2006, pp. 2468–2513.
- [30] European Solar Shading Organization, *Solar Shading For low Energy And Healthy Buildings*, vol. 2. 2018. Acedido: 31 de Janeiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://www.federlegnoarredo.it/ContentsFiles/ES-SO_Technical_GuideBook_HD_Final.pdf
- [31] A. Carlos e F. C. Oliveira, *Transferência De Calor: um Guia Para A Resolução De Problemas Práticos*. 2022. Acedido: 29 de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/138871>
- [32] Parlamento Europeu e do Conselho, *Diretiva n.º 2010/31/UE*. Parlamento Europeu e do Conselho, 2010, pp. 13–35.
- [33] Parlamento Europeu e do Conselho, *Diretiva n.º 2002/91/CE*. 2002, pp. 65–71.
- [34] Ministério da Economia e do Emprego, *Decreto-Lei n.º 118/2013*. 2013, pp. 4988–5005.
- [35] O. do T. e E. Ministério do Ambiente, *Portaria n.º 349-B/2013*. 2013, pp. 18–29.
- [36] O. do T. e E.-D.-G. de E. e G. Ministério do Ambiente, *Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013*. 2013, pp. 26–31.
- [37] Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, *Portaria n.º 138-I/2021, de 1 de julho*. Portugal: Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação, 2021, pp. 12–53.
- [38] A. J. V. Marcos, «Vãos Envidraçados em Edifícios de Habitação: Otimização, Eficiência Energética e Análise Económica», 2013. Acedido: 31 de Janeiro de 2024. Disponível em: https://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/4014/1/DM_AdemarMarcos.pdf
- [39] A. M. F. F. de Oliveira, «Vãos Envidraçados, Desempenho Térmico e Conforto Térmico Humano», Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [40] B. M. B. da Mata, «Estudo De Dispositivos De Proteção Solar: O Caso De Estudo Aplicado A Uma Unidade Hoteleira», Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2022. Acedido: 20 de Fevereiro de 2024. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/160298/1/Mata_2022.pdf
- [41] J. O. Aguilar, J. Xamán, Y. Olazo-Gómez, I. Hernández-López, G. Becerra, e O. A. Jaramillo, «Thermal performance of a room with a double glazing window using glazing available in Mexican market», *Appl Therm Eng*, vol. 119, pp. 505–515, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.083.
- [42] E. Cuce e S. B. Riffat, «A state-of-the-art review on innovative glazing technologies», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 2015, *Elsevier* doi: 10.1016/j.rser.2014.08.084.
- [43] A. C. P. Gouveia, «Estudo Sobre a Otimização Acústica e Térmica de Vãos Envidraçados Destinados à Envolvente De Edifícios», Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2021. Acedido: 25 de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/96017/1/ESTUDO%20SOBRE%20A%20OTIMIZA%20%C3%87%20%C3%83O%20AC%20%C3%9aSTICA%20E%20T%20%C3%89RMICA%20DE%20V%20%C3%83OS%20ENVIDRA%20%C3%87ADOS%20DESTINADOS%20%C3%80%20ENVOLVENTE%20DE%20EDIF%20%C3%8dCIOS.pdf>

- [44] S. Perumal, S. Rajendrian, V. Venkatraman, D. Sundaresan, e L. Pandiyan, «Experimental Study About Thermal Resistance of Windows With Air Gap Between Two Glasses Used In Single Houses», *Thermal Science*, vol. 24, pp. 515–518, 2020, doi: 10.2298/TSCI190411031P.
- [45] Ambiente e Ação Climática - Direção-Geral de Energia e Geologia, *Despacho n.º 6476-D/2021*. 2021, pp. 27–29.
- [46] Comissão, *Regulamento delegado (UE) N.º 244/2012*. 2012, pp. 1–28.
- [47] H. N. M. da S. Correia, «Análise Do Custo-Benefício da Reabilitação de Edifícios com Recurso a Janelas Eficientes» Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2022. Acedido: 27 de Maio de 2024. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/148837/1/Correia_2022.pdf
- [48] Comissão, *Regulamento delegado (UE) N.º 480/2014*. 2014, pp. 5–44.
- [49] ADENE, «Guia SCE-Medidas de Melhoria (REH)», 2020. Acedido: 20 de Maio de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2020/04/4.5-Guia-SCE-Medidas-Melhoria-REH_V1.pdf
- [50] Certificação Energética dos Edifícios, «Estatísticas de Certificação Energética dos Edifícios». Acedido: 29 de Janeiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://sce.pt/estatisticas/>
- [51] BlueDrape, «Estores venezianos». Acedido: 19 de Março de 2024. Disponível em: <https://www.bluedrape.pt/produtos>
- [52] TecniConforto, «Persianas». Acedido: 19 de Março de 2024. Disponível em: <https://tecni-conforto.pt/Produtos/estores2/>
- [53] DGEG, «Preço da eletricidade em Portugal Continental». Acedido: 27 de Maio de 2024. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/precos-de-energia/precos-de-eletricidade-e-gas-natural/>

|6.

Anexos

6.1. Características dos vãos envidraçados proveniente do WINDOW

	ID	Name	Type	Width	Height	Ufactor	SHGC	Tvis	CR
				mm	mm	W/m2-K			
	1	VD_A_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.822	0.659	0.662	N/A
	2	VD_A_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	2.842	0.635	0.632	N/A
	3	VD_A_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	3.068	0.506	0.465	N/A
	4	VD_A_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.743	0.659	0.662	N/A
	5	VD_A_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	2.767	0.636	0.632	N/A
	6	VD_A_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	3.026	0.506	0.465	N/A
	7	VD_P_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.332	0.643	0.662	N/A
	8	VD_P_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	2.303	0.616	0.632	N/A
	9	VD_P_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	2.093	0.468	0.465	N/A
	10	VD_P_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.253	0.643	0.662	N/A
	11	VD_P_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	2.229	0.616	0.632	N/A
	12	VD_P_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	2.052	0.469	0.465	N/A
	13	VD_M_Alr_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.402	0.649	0.662	N/A
	14	VD_M_Alr_OES	Custom Singl	1000	2100	2.380	0.624	0.632	N/A
	15	VD_M_Alr_NOR	Custom Singl	1000	500	2.232	0.483	0.465	N/A
	16	VD_M_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.323	0.650	0.662	N/A
	17	VD_M_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	2.306	0.624	0.632	N/A
	18	VD_M_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	2.191	0.484	0.465	N/A
	19	VC_A_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.302	0.241	0.327	N/A
	20	VC_A_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	2.349	0.236	0.312	N/A
	21	VC_A_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	2.802	0.212	0.230	N/A
	22	VC_A_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.152	0.235	0.327	N/A
	23	VC_A_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	2.208	0.230	0.312	N/A
	24	VC_A_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	2.727	0.207	0.230	N/A
	25	VC_P_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.812	0.225	0.327	N/A
	26	VC_P_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	1.811	0.217	0.312	N/A
	27	VC_P_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	1.827	0.175	0.230	N/A
	28	VC_P_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.663	0.219	0.327	N/A
	29	VC_P_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	1.670	0.211	0.312	N/A
	30	VC_P_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	1.752	0.170	0.230	N/A
	31	VC_M_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.882	0.231	0.327	N/A

Figura 6-1 - Cálculos das características dos vãos envidraçados (1)

	ID	Name	Type	Width	Height	Ufactor	SHGC	Tvis	CR
				mm	mm	W/m2-K			
	32	VC_M_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	1.888	0.224	0.312	N/A
	33	VC_M_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	1.966	0.190	0.230	N/A
	34	VC_M_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.733	0.225	0.327	N/A
	35	VC_M_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	1.747	0.218	0.312	N/A
	36	VC_M_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	1.891	0.185	0.230	N/A
	37	VB_A_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.229	0.485	0.654	N/A
	38	VB_A_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	2.280	0.469	0.624	N/A
	39	VB_A_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	2.765	0.383	0.460	N/A
	40	VB_A_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.067	0.484	0.654	N/A
	41	VB_A_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	2.127	0.468	0.624	N/A
	42	VB_A_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	2.684	0.382	0.460	N/A
	43	VB_P_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.739	0.469	0.654	N/A
	44	VB_P_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	1.742	0.450	0.624	N/A
	45	VB_P_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	1.790	0.345	0.460	N/A
	46	VB_P_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.577	0.468	0.654	N/A
	47	VB_P_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	1.589	0.449	0.624	N/A
	48	VB_P_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	1.709	0.345	0.460	N/A
	49	VB_M_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.809	0.475	0.654	N/A
	50	VB_M_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	1.819	0.457	0.624	N/A
	51	VB_M_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	1.929	0.360	0.460	N/A
	52	VB_M_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.647	0.474	0.654	N/A
	53	VB_M_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	1.666	0.457	0.624	N/A
	54	VB_M_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	1.849	0.360	0.460	N/A
	55	VBC_A_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.182	0.237	0.419	N/A
	56	VBC_A_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	2.237	0.232	0.400	N/A
	57	VBC_A_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	2.742	0.208	0.295	N/A
	58	VBC_A_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	2.013	0.232	0.419	N/A
	59	VBC_A_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	2.076	0.228	0.400	N/A
	60	VBC_A_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	2.658	0.205	0.295	N/A
	61	VBC_P_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.693	0.221	0.419	N/A
	62	VBC_P_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	1.698	0.213	0.400	N/A

Figura 6-2 - Cálculos das características dos vãos envidraçados (2)

63	VBC_P_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	1.767	0.171	0.295	N/A
64	VBC_P_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.523	0.216	0.419	N/A
65	VBC_P_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	1.538	0.208	0.400	N/A
66	VBC_P_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	1.683	0.168	0.295	N/A
67	VBC_M_Air_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.763	0.227	0.419	N/A
68	VBC_M_Air_OES	Custom Singl	1000	2100	1.775	0.220	0.400	N/A
69	VBC_M_Air_NOR	Custom Singl	1000	500	1.906	0.186	0.295	N/A
70	VBC_M_Ar_SUL	Custom Dual	2000	2100	1.593	0.223	0.419	N/A
71	VBC_M_Ar_OES	Custom Singl	1000	2100	1.615	0.216	0.400	N/A
72	VBC_M_Ar_NOR	Custom Singl	1000	500	1.822	0.183	0.295	N/A

Figura 6-3 - Cálculos das características dos vãos envdçados (3)

6.2. Dados dos envidraçados sem elementos de sombreamento

Tabela 6-1 - Dados das simulações sem elementos de sombreamento - Bragança

Combinação	Nic (kWh/ano.m²)	Nvc (kWh/ano.m²)	Nic + Nvc (kWh/ano.m²)	% Perdas de calor pelos en- vidraçados	% Ganhos de calor pelos en- vidraçados
VD_A_Air	14,5	142,2	156,6	36,5%	87,5%
VD_A_Ar	13,5	144,3	157,8	35,8%	87,7%
VD_P_Air	11,7	149,1	160,7	34,5%	87,9%
VD_P_Ar	10,5	152,0	162,6	33,5%	88,1%
VD_M_Air	12,0	147,8	159,7	34,7%	87,9%
VD_M_Ar	10,8	150,7	161,6	33,7%	88,1%
VC_A_Air	19,4	52,7	72,2	37,0%	90,0%
VC_A_Ar	16,6	53,7	70,3	34,0%	90,7%
VC_P_Air	15,6	55,2	70,8	33,7%	90,6%
VC_P_Ar	12,7	56,5	69,2	30,1%	91,4%
VC_M_Air	16,0	54,8	70,7	33,9%	90,6%
VC_M_Ar	13,1	56,0	69,1	30,4%	91,4%
VB_A_Air	8,0	120,8	128,7	29,3%	89,9%
VB_A_Ar	6,4	125,5	131,9	27,0%	90,4%
VB_P_Air	4,5	132,4	136,8	24,2%	90,8%
VB_P_Ar	3,3	138,1	141,3	21,5%	91,2%
VB_M_Air	4,9	130,3	135,1	24,9%	90,7%
VB_M_Ar	3,6	135,8	139,4	22,3%	91,1%
VBC_A_Air	17,6	55,3	73,0	35,3%	90,1%
VBC_A_Ar	14,7	57,2	71,9	32,2%	90,8%
VBC_P_Air	11,6	60,1	71,7	29,0%	91,3%
VBC_P_Ar	9,0	62,5	71,5	25,2%	92,0%
VBC_M_Air	12,3	59,3	71,6	29,8%	91,2%
VBC_M_Ar	9,7	61,6	71,3	26,1%	91,9%

Tabela 6-2 - Dados das simulações sem elementos de sombreamento - Lisboa

Combinação	Nic (kWh/ano.m ²)	Nvc (kWh/ano.m ²)	Nic + Nvc (kWh/ano.m ²)	% Perdas de calor pelos en- vidraçados	% Ganhos de calor pelos en- vidraçados
VD_A_Air	0,3	181,8	182,1	30,6%	87,8%
VD_A_Ar	0,2	184,4	184,6	30,0%	88,0%
VD_P_Air	0,2	190,0	190,1	28,9%	88,1%
VD_P_Ar	0,1	193,6	193,7	28,0%	88,3%
VD_M_Air	0,2	188,5	188,6	29,1%	88,1%
VD_M_Ar	0,1	192,0	192,1	28,2%	88,3%
VC_A_Air	0,5	67,6	68,1	29,6%	91,6%
VC_A_Ar	0,3	69,2	69,5	26,9%	92,3%
VC_P_Air	0,2	70,9	71,1	26,7%	92,2%
VC_P_Ar	0,1	72,9	73,0	23,5%	92,8%
VC_M_Air	0,3	70,4	70,6	26,9%	92,2%
VC_M_Ar	0,1	72,3	72,4	23,8%	92,8%
VB_A_Air	0,0	157,1	157,1	23,7%	90,3%
VB_A_Ar	0,0	162,9	162,9	21,6%	90,6%
VB_P_Air	0,0	170,8	170,8	19,3%	90,8%
VB_P_Ar	0,0	177,4	177,4	16,9%	91,2%
VB_M_Air	0,0	168,4	168,4	19,9%	90,8%
VB_M_Ar	0,0	174,9	174,9	17,5%	91,1%
VBC_A_Air	0,3	72,7	73,1	27,9%	91,6%
VBC_A_Ar	0,2	75,4	75,6	25,0%	92,2%
VBC_P_Air	0,1	79,2	79,3	22,5%	92,6%
VBC_P_Ar	0,0	82,5	82,6	19,1%	93,2%
VBC_M_Air	0,1	78,1	78,2	23,2%	92,5%
VBC_M_Ar	0,0	81,3	81,4	19,9%	93,1%

Tabela 6-3 - Dados das simulações sem elementos de sombreamento - Évora

Combinação	Nic (kWh/ano.m²)	Nvc (kWh/ano.m²)	Nic + Nvc (kWh/ano.m²)	% Perdas de calor pelos en- vidraçados	% Ganhos de calor pelos en- vidraçados
VD_A_Air	0,51	180,57	181,08	31,4%	87,1%
VD_A_Ar	0,41	182,98	183,39	30,7%	87,3%
VD_P_Air	0,27	188,29	188,56	29,6%	87,5%
VD_P_Ar	0,20	191,64	191,84	28,7%	87,7%
VD_M_Air	0,29	186,83	187,12	29,8%	87,5%
VD_M_Ar	0,22	190,16	190,37	28,9%	87,7%
VC_A_Air	1,43	72,35	73,78	30,7%	89,5%
VC_A_Ar	0,93	73,46	74,39	27,9%	90,1%
VC_P_Air	0,79	75,12	75,91	27,6%	90,1%
VC_P_Ar	0,43	76,52	76,95	24,4%	90,7%
VC_M_Air	0,84	74,62	75,47	27,9%	90,1%
VC_M_Ar	0,47	75,99	76,46	24,6%	90,7%
VB_A_Air	0,08	155,79	155,87	24,4%	89,4%
VB_A_Ar	0,03	161,14	161,17	22,2%	89,8%
VB_P_Air	0,01	168,65	168,66	19,8%	90,0%
VB_P_Ar	0,00	174,93	174,93	17,4%	90,3%
VB_M_Air	0,01	166,35	166,35	20,4%	90,0%
VB_M_Ar	0,00	172,43	172,43	18,0%	90,3%
VBC_A_Air	1,01	76,17	77,18	29,0%	89,6%
VBC_A_Ar	0,60	78,33	78,93	26,0%	90,2%
VBC_P_Air	0,28	81,66	81,94	23,3%	90,6%
VBC_P_Ar	0,12	84,44	84,55	19,9%	91,2%
VBC_M_Air	0,34	80,68	81,02	24,1%	90,5%
VBC_M_Ar	0,15	83,36	83,51	20,7%	91,1%

Tabela 6-4 - Dados das simulações sem elementos de sombreamento - Faro

Combinação	Nic (kWh/ano.m²)	Nvc (kWh/ano.m²)	Nic + Nvc (kWh/ano.m²)	% Perdas de calor pelos en- vidraçados	% Ganhos de calor pelos en- vidraçados
VD_A_Air	0	235,1	235,1	27,2%	86,6%
VD_A_Ar	0	237,7	237,7	26,6%	86,7%
VD_P_Air	0	243,6	243,6	25,6%	86,8%
VD_P_Ar	0	247,3	247,3	24,8%	87,0%
VD_M_Air	0	242,0	242,0	25,8%	86,9%
VD_M_Ar	0	245,6	245,6	25,0%	87,0%
VC_A_Air	0	95,8	95,8	26,6%	88,4%
VC_A_Ar	0	97,2	97,2	24,1%	89,0%
VC_P_Air	0	99,4	99,4	23,9%	89,0%
VC_P_Ar	0	101,2	101,2	21,0%	89,5%
VC_M_Air	0	98,8	98,8	24,1%	89,0%
VC_M_Ar	0	100,5	100,5	21,3%	89,5%
VB_A_Air	0	202,9	202,9	20,9%	88,4%
VB_A_Ar	0	208,8	208,8	18,9%	88,7%
VB_P_Air	0	216,7	216,7	16,8%	88,9%
VB_P_Ar	0	223,3	223,3	14,6%	89,2%
VB_M_Air	0	214,2	214,2	17,3%	88,9%
VB_M_Ar	0	220,6	220,6	15,2%	89,2%
VBC_A_Air	0	101,4	101,4	25,0%	88,5%
VBC_A_Ar	0	104,3	104,3	22,4%	89,1%
VBC_P_Air	0	108,6	108,6	20,1%	89,5%
VBC_P_Ar	0	112,1	112,1	17,0%	90,0%
VBC_M_Air	0	107,3	107,3	20,7%	89,4%
VBC_M_Ar	0	110,8	110,8	17,7%	89,9%

6.3. Dados dos envidraçados com elementos de sombreamento

Tabela 6-5 - Resultados obtidos das simulações com persiana

Com estore						
Zona climática	Combinação	Nic (kWh/ano.m ²)	Nvc (kWh/ano.m ²)	Nic + Nvc (kWh/ano.m ²)	Redução das perdas de calor pelos envidraçados (%)	Redução dos ganhos de calor pelos envidraçados (%)
Lisboa	VD_A_Air	0,1	160,9	161,0	13,6%	7,7%
	VC_A_Air	0,3	66,9	67,1	9,4%	3,7%
	VB_A_Air	0,0	137,7	137,7	10,0%	7,3%
	VBC_A_Air	0,2	69,9	70,1	9,2%	4,6%
Faro	VD_A_Air	0,0	214,4	214,4	14,0%	6,8%
	VC_A_Air	0,0	94,5	94,5	9,9%	3,7%
	VB_A_Air	0,0	183,6	183,6	10,4%	6,4%
	VBC_A_Air	0,0	98,5	98,5	9,6%	4,2%
Bragança	VD_A_Air	10,2	113,8	124,0	11,1%	9,3%
	VC_M_Ar	11,0	50,0	61,0	7,7%	6,4%
	VB_A_Air	6,1	96,6	102,7	8,5%	8,9%
	VBC_M_Ar	8,2	52,9	61,1	7,3%	7,3%
Évora	VD_A_Air	0,1	157,6	157,7	13,0%	7,9%
	VC_A_Air	0,9	69,8	70,6	9,1%	4,5%
	VB_A_Air	0,0	135,0	135,0	9,5%	13,9%
	VBC_A_Air	0,6	72,0	72,5	8,9%	9,7%

6.4. Dados técnicos do *split*



ZANTIA®
Inspired by Comfort!

AR CONDICIONADO

SPLIT

DADOS TÉCNICOS	AUSTIN 9	AUSTIN 12	AUSTIN 18	AUSTIN 24
Capacidade Arrefecimento (Btu/h)	9000 (3100–11600) / 2.6Kw	12000 (3800–14200) / 3.5Kw	18000 (6200–21000) / 5.3Kw	24000 (7100–27000) / 7.0Kw
Pot. Consumida Arrefecimento (W)	732 (100–1240)	1213 (130–1580)	1550 (140–2300)	2600 (420–3150)
Consumo em Arrefecimento (A)	3,18 (0,4–5,4)	5,27 (0,5–6,9)	6,7 (0,6–10)	11,5 (1,8–13,8)
Capacidade Aquecimento (Btu/h)	10000 (2800–11500)	13000 (3700–14400)	19000 (4400–23000)	25000 (5500–27000)
Pot. Consumida Aquecimento (W)	733 (120–1200)	1088 (100–1680)	1570 (220–2350)	2400 (300–2750)
Consumo em Aquecimento (A)	3,18 (0,5–5,2)	4,73 (0,4–6,9)	6,8 (0,95–10,2)	11 (1,3–12,2)
Arrefecimento Sazonal - Pdesignc (kW)	2,8	3,6	5,2	7,0
Arrefecimento Sazonal - SEER (W/W)	6,3	6,1	7,4	6,1
Arrefecimento Sazonal - Classe Energética	A++	A++	A++	A++
Aquecimento (Quente) - Pdesignc (kW)	2,6	2,5	4,4	5,6
Aquecimento (Clima Quente) - SCOP (W/W)	5,1	5,1	5,1	5,1
Aquecimento (Quente) - Classe Energética	A+++	A+++	A+++	A+++
Aquecimento (Clima Médio) - Pdesignc (kW)	2,6	2,7	4,1	4,8
Aquecimento (Clima Médio) - SCOP (W/W)	4,0	4,0	4,0	4,0
Aquecimento (Clima Médio) - Classe Energética	A+	A+	A+	A+
Potência Máxima Consumida (W)	2150	2150	2500	3500
Consumo Máximo (A)	10	10	13	15,5
Compressor Tipo	Rotativo	Rotativo	Rotativo	Rotativo Duplo
Compressor Modelo	Super DC Inverter	Super DC Inverter	Super DC Inverter	Super DC Inverter
Tipo Refrigerante / Quantidade (kg)	R32 / 0,55	R32 / 0,55	R32 / 1,08	R32 / 1,42
GWP(EU)	675	675	675	675
Caudal de Ar Interior Mín/Med/Máx (m³/h)	259 / 333 / 434,8	315 / 430 / 540	540 / 680 / 840	662 / 817 / 980
Caudal de Ar Exterior (m³/h)	1750	1800	2100	3500
Nível de Ruído Unid. Int. Mín/Med/Máx (dB(A))	21 / 25 / 38	25 / 34,5 / 40,5	26 / 36 / 42,5	36 / 40,5 / 45
Nível de Ruído Unidade Exterior (dB(A))	55,5	56	56	59
Alimentação (V/Hz)	220-240/1/50	220-240/1/50	220-240/1/50	220-240/1/50

Figura 6-4 - Características do *split*

Figura 6-5 - Características do *split*

6.5. Resultados da análise económica

Tabela 6-6 - Resultados da análise económica

Zona climática	Combinação	Custo do investimento inicial	Custo anual de exploração	Custo global (por m²)	Período de retorno (anos)
Lisboa	VD_A_Air	7 586,78 €	196,04 €	115,89 €	15,0
	VC_A_Air	9 314,52 €	85,79 €	132,95 €	15,1
	VB_A_Air	9 056,31 €	167,60 €	144,96 €	17,0
	VBC_A_Air	9 565,21 €	85,33 €	138,88 €	15,5
Faro	VD_A_Air	7 586,78 €	260,95 €	130,35 €	13,2
	VC_A_Air	9 314,52 €	120,63 €	140,71 €	13,0
	VB_A_Air	9 056,31 €	223,49 €	157,41 €	14,8
	VBC_A_Air	9 565,21 €	125,73 €	147,89 €	13,5
Bragança	VD_A_Air	7 586,78 €	153,82 €	106,48 €	17,7
	VC_M_Ar	11 472,66 €	81,23 €	183,93 €	22,9
	VB_A_Air	9 056,31 €	132,99 €	137,24 €	20,1
	VBC_M_Ar	11 680,78 €	80,46 €	188,78 €	23,2
Évora	VD_A_Air	7 586,78 €	192,07 €	115,00 €	15,2
	VC_A_Air	9 468,89 €	90,42 €	137,70 €	15,7
	VB_A_Air	9 056,31 €	164,41 €	144,24 €	17,2
	VBC_A_Air	9 565,21 €	92,77 €	140,54 €	16,0



