



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Afonso Marques de Sousa

**ANÁLISE ECONÓMICA, ENERGÉTICA E  
AMBIENTAL DA APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO  
TÉRMICO AOS EDIFÍCIOS DO CONTINENTE  
EUROPEU**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Análise económica, energética e ambiental da aplicação de isolamento térmico aos edifícios do continente europeu**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Economic, energy and environmental analysis of the application of thermal insulation to buildings on the European continent**

**Autor**

**Afonso Marques de Sousa**

**Orientador**

**António Manuel Mendes Raimundo**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Nelson Miguel Lopes Soares  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogal** Mestre Nuno Francisco Baía da Silva Garcia Saraiva  
Investigador da Associação para o Desenvolvimento da  
Aerodinâmica Industrial

**Coimbra, setembro, 2022**



## **Agradecimentos**

Dado o presente estudo como concluído gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram ao longo do meu percurso académico. Gostaria de deixar umas palavras:

Aos meus pais, pelo seu apoio incondicional e encorajamento que me transmitiram ao longo do meu percurso académico.

Aos docentes do DEMUC pelo conhecimento transmitido ao longo da minha formação como engenheiro.

Ao meu orientador Senhor Professor Doutor António Raimundo por todo o apoio e ensinamentos que me transmitiu ao longo do presente estudo.



## Resumo

O conforto térmico é algo cada vez mais valorizado pelo ser humano, sendo fundamental para a sua produtividade e o seu bem-estar. Porém, assegurar condições de conforto térmico tem consequências energéticas, económicas e ambientais. Os órgãos de governo da União Europeia consideram que o aumento da eficiência energética dos edifícios é algo de extrema importância, devido a estes serem grandes consumidores de energia. Logo, um método eficaz de reduzir custos energéticos e impactos ambientais passa por tornar os edifícios muito eficientes energeticamente. A eficiência energética de um edifício está diretamente relacionada com a qualidade das suas soluções construtivas. Uma forma de melhorar as características das soluções construtivas é o uso de isolamento térmico, de modo a diminuir as trocas de calor entre o exterior e o interior de um edifício.

O presente estudo tinha essencialmente dois objetivos, o primeiro consiste em melhorar o software SEnegEd [Raimundo, 2021] de modo que este faça também a simulação dos impactos ambientais do edifício ao longo do seu ciclo de vida. O segundo objetivo é a realização de uma análise económica, energética e ambiental da aplicação do isolamento térmico aos edifícios do continente europeu. Esta análise permitiu compreender a influência da aplicação de isolamento térmico na eficiência energética dos edifícios e assim perceber a influência desta medida nos custos do ciclo de vida completo dos edifícios localizados no continente europeu para as diversas vertentes. Adicionalmente, fez-se uma verificação de qual o material isolante térmico mais adequado. A análise foi efetuada segundo as perspetivas económica, energética e ambiental.

Os custos do conforto térmico dependem da tipologia de uso do edifício e do tipo de clima. Assim, de forma a representar as tipologias do edificado europeu foram selecionados seis edifícios diferentes, sendo estes: um apartamento e uma moradia (edifícios residenciais), uma clínica (edifício de serviços com funcionamento permanente), uma escola e uma agência bancária (edifícios de serviços com funcionamento intermitente) e um supermercado (edifício de comércio com funcionamento intermitente). Para representar o clima do continente europeu foram selecionadas 5 localizações, em função do número de graus-dia de aquecimento e de arrefecimento, envolvendo assim 5 tipos de clima: Málaga (quente), Lisboa (moderado), Valladolid (frio), Varsóvia (muito frio), Reykjavik (extremamente frio).

Recorreu-se à folha de cálculo CalProTerm para a obtenção das propriedades termofísicas das soluções construtivas opacas e ao software SEnergEd para a realização da simulação do comportamento energético, económico e ambiental do ciclo de vida dos edifícios. A versão do software SEnergEd disponibilizada não realizava a análise ambiental do ciclo de vida do edifício, pelo que foi necessário proceder à implementação desta vertente, munindo este software com os algoritmos necessários à realização do cálculo de impactos ambientais.

Os resultados obtidos mostram, em termos muito genéricos, que a aplicação de isolamento térmico à envolvente opaca dos edifícios do continente europeu é mais benéfica em termos energéticos e em termos ambientais do que sob a perspetiva económica. Adicionalmente, a espessura ótima de isolamento térmico depende da tipologia de edifício, do tipo de clima e da perspetiva com que foi efetuada a análise (energética, ambiental ou económica).

**Palavras-chave:** Conforto térmico, Eficiência energética, Isolamento térmico, Clima europeu, Sustentabilidade, Custo anual equivalente.



## Abstract

Thermal comfort is something increasingly valued by the human being, being fundamental for their productivity and well-being. However, ensuring thermal comfort conditions has energy, economic and environmental consequences. The Governing Bodies of the European Union consider that increasing the energy efficiency of buildings is extremely important, especially due to being one of the major energy consumers. Therefore, an effective method of reducing energy and economic costs and environmental impacts is to make buildings very energy efficient. The energy efficiency of a building is directly related to the quality of its constructive solutions. One way to improve the characteristics of constructive solutions is the use of thermal insulation, so as to decrease heat exchanges between the outside and the interior of a building.

The present study had essentially two objectives, the first is to improve the SEnergEd software [Raimundo, 2021] so that it also simulates the environmental impacts of the building throughout its life cycle. The second objective is to carry out an economic, energy and environmental analysis of the application of thermal insulation to buildings on the European continent. This analysis made it possible to understand the influence of the application of thermal insulation on the energy efficiency of buildings and, thus, to understand the influence of this measure on the costs of the complete life cycle of buildings located on the European continent for the various perspectives. Additionally, a verification was made of which is the most suitable thermal insulating material. The analysis was carried out according to the economic, energy and environmental perspectives. Thermal comfort costs depend on the type of use of the building and the type of climate. Thus, to represent the typologies of European buildings, six different buildings were selected, namely: an apartment and a house (residential buildings), a clinic (service building with permanent operation), a school and a bank branch (buildings of services with intermittent operation) and a supermarket (commercial building with intermittent operation). To represent the climate of the European continent, 5 locations were selected, depending on the number of degree-days of heating and cooling, thus involving 5 types of climate: Malaga (hot), Lisbon (moderate), Valladolid (cold), Warsaw (very cold), Reykjavik (extremely cold).

The CalProTerm spreadsheet was used to obtain the thermophysical properties of the opaque constructive solutions, the SEnergEd software was used to simulate the energy, economic and environmental behavior of the buildings' life cycle. The version of the SEnergEd software initially available did not carry out the environmental analysis of the building's life cycle, therefore it was necessary to implement this aspect, providing this software with the algorithms necessary to carry out the calculation of environmental impacts.

The results obtained showed, in very general terms, that the application of thermal insulation to the opaque envelope of buildings on the European continent is more beneficial in energy and environmental terms than from an economic perspective. Additionally, the optimal thickness of thermal insulation depends on the type of building, the type of climate and the perspective from which the analysis was carried out (energy, environmental or economic).

**Keywords:** Thermal comfort, Energy efficiency, Thermal insulation, European climate, Sustainability, Equivalent annual cost.

---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Estado de Arte.....	2
1.3. Objetivos.....	6
2. FERRAMENTAS DE CÁLCULO.....	8
2.1. CalProTerm.....	8
2.2. SEnergEd .....	9
2.2.1. Versão disponibilizada .....	9
2.2.2. Melhorias introduzidas .....	14
2.3. Relações energéticas e ambientais .....	16
3. MATERIAIS .....	19
3.1. Edifícios – Layout e Perfis de Ocupação e de Funcionamento .....	19
3.1.1. Apartamento .....	20
3.1.2. Moradia.....	20
3.1.3. Clínica.....	21
3.1.4. Escola .....	22
3.1.5. Agência bancária .....	23
3.1.1. Supermercado .....	24
3.2. Sistemas de Climatização .....	25
3.3. Vãos Envidraçados .....	26
3.4. Elementos Opacos.....	27
3.4.1. Isolamentos térmicos mais utilizados na Europa.....	27
3.4.2. Custos económico e ambiental do isolamento térmico .....	28
3.4.3. Soluções construtivas opacas sem isolamento térmico .....	32
3.4.4. Isolamento térmico das soluções construtivas opacas.....	33
3.5. Parâmetros económico-financeiros.....	37
3.6. Condições Climáticas .....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
4.1. Custo Energético do Conforto Térmico .....	43
4.2. Custo Económico do Conforto Térmico .....	47
4.3. Custo Ambiental do Conforto Térmico .....	51
4.4. Espessuras Ótimas de Isolamento Térmico .....	55
5. CONCLUSÕES .....	59
6. REFERÊNCIAS .....	62

ANEXO A – Layout e Perfis de Ocupação e de Funcionamento .....	66
ANEXO B – Soluções Construtivas Opacas sem Isolamento Térmico .....	72
ANEXO C – Soluções Construtivas Opacas com Isolamento Térmico.....	75
ANEXO D – Custo Energético, Económico e Ambiental .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação do modelo 5R1C [Raimundo, 2008].	10
Figura 2.2 - Esquema do algoritmo global de cálculo da versão 508 do SEnergEd	13
Figura 2.3 - Esquema dos impactos ambientais de um edifício	15
Figura 2.4 - Esquema do algoritmo global de cálculo da versão 601 do SEnergEd	16
Figura 3.1 - Planta do apartamento [Raimundo et al., 2011a]	20
Figura 3.2 - Planta da moradia [Raimundo et al., 2011b]	21
Figura 3.3 - Representação da clínica privada [Raimundo et. al., 2011c]	22
Figura 3.4 – Representação esquemática da implantação da escola [Claro, 2015]	23
Figura 3.5 - Planta da agência bancária [Raimundo et al., 2007]	24
Figura 3.6 - Representação esquemática do supermercado [Vidigueira, 2013].	24
Figura 3.7 – <i>CEEIT</i> dos materiais de isolamento térmico EPS, MW e XPS [Raimundo et al., 2020]	29
Figura 3.8 - <i>CAEEIT</i> para materiais de isolamento térmico considerados.	32
Figura 3.9 - Mapa europeu com as cidades selecionadas [Google Maps, 2022].	41
Figura 4.1 - Consumo anual de energia primária pelos edifícios, por m <sup>2</sup> de área climatizada.	44
Figura 4.2 - Custo anual equivalente do conforto térmico, por m <sup>2</sup> de área climatizada.	48
Figura 4.3 - Custo anual ambiental equivalente do conforto térmico, por m <sup>2</sup> de área climatizada.	53
Figura A.0.1 – Planta do Piso 2 do apartamento [Raimundo et al., 2011a].	66
Figura A.0.2 - Perfil de ocupação e perfil de equipamentos não AVAC no apartamento.	66
Figura A.0.3 - Planta do Piso 0 e sótão da moradia [Raimundo et al., 2011b].	67
Figura A.0.4 - Perfil de ocupação e perfil de equipamentos não AVAC na moradia.	67
Figura A.0.5 - Planta da clínica [Raimundo et al., 2011c].	68
Figura A.0.6 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para a clínica.	68
Figura A.0.7 - Representação da planta do supermercado [Vidigueira, 2013].	69
Figura A.0.8 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para o supermercado.	69
Figura A.0.9 - Vista da escola.	70
Figura A.0.10 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para a escola.	70
Figura A.0.11 - Alçada lateral, posterior e poente da agência bancária [Raimundo et al., 2007].	71

Figura A.0.12 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para a agência bancária. .....	71
Figura D.0.1 - Resultados obtidos para o apartamento por m <sup>2</sup> de área climatizada.....	84
Figura D.0.2 - Resultados obtidos para a moradia por m <sup>2</sup> de área climatizada. ....	85
Figura D.0.3 - Resultados obtidos para a clínica por m <sup>2</sup> de área climatizada.....	86
Figura D.0.4 - Resultados obtidos para o supermercado por m <sup>2</sup> de área climatizada.....	87
Figura D.0.5 - Resultados obtidos para a escola por m <sup>2</sup> de área climatizada.....	88
Figura D.0.6 - Resultados obtidos para a agência bancária por m <sup>2</sup> de área climatizada.....	89

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Fatores de conversão de energia final para a energia primária de referência..	17
Tabela 2.2 - Fatores de conversão da energia primária para emissões de CO <sub>2</sub> [DGEG, 2021].....	18
Tabela 3.1 – Eficiências sazonais europeias dos sistemas de ar condicionado da classe A+ [European Commission, 2011].....	25
Tabela 3.2 - Características técnicas dos envidraçados [Rebelo, 2016].....	26
Tabela 3.3 - Características técnicas gerais dos envidraçados .....	27
Tabela 3.4 - Coeficiente global de transmissão de calor e preço em Portugal dos materiais de isolamento térmico [Raimundo et al., 2020] .....	29
Tabela 3.5 – Massa específica e energia embebida dos materiais de isolamento térmico. .	31
Tabela 3.6 - Coeficiente global de transmissão de calor e energia embebida, em função da espessura dos materiais de isolamento térmico considerados. ....	31
Tabela 3.7 - Elementos construtivos base da Envolvente opaca exterior [Saraiva, 2017] ..	33
Tabela 3.8 - Propriedades dos elementos construtivos base da Envolvente opaca exterior	33
Tabela 3.9 - Ordenados mínimos por país para o ano 2020 [Eurostat, 2021]. ....	35
Tabela 3.10 – Custos totais e energia embebida para a parede exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	36
Tabela 3.11 - Custo de energia (em €/kWh) no 2º semestre de 2021 para os casos em estudo [Eurostat, 2022] (valores sem IVA).....	37
Tabela 3.12 - Dados climáticos para as cidades em estudo [Pina, 2021]. ....	41
Tabela 4.1 - Espessura de EPS economicamente ótima .....	47
Tabela 4.2 – Espessura de EPS ambientalmente ótima [cm]. ....	52
Tabela 4.3 - Espessuras de EPS (em cm) ótimas para os parâmetros em estudo. ....	56
Tabela B.1 - Descrição dos elementos construtivos da envolvente opaca interior. [Saraiva, 2017].....	72
Tabela B.2 - Propriedades dos elementos construtivos da Envolvente Opaca Interior. ....	72
Tabela B.3 - Descrição dos elementos de compartimentação interior [Saraiva, 2017]. ....	73
Tabela B.4 - Propriedades dos elementos de compartimentação interior.....	73
Tabela B.5 - Descrição dos elementos em contato com o solo [Saraiva, 2017]. ....	74
Tabela B.6 - Propriedades dos elementos em contacto com o solo.....	74
Tabela C.1 - Custos totais e energia embebida para o pilar/viga exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	75

Tabela C.2 - Custos totais e energia embebida para a caixa de estore, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	76
Tabela C.3 - Custos totais e energia embebida para o pavimento exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	77
Tabela C.4 - Custos totais e energia embebida para a cobertura exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	78
Tabela C.5 - Custos totais e energia embebida para a parede em contato com outros espaços interiores, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	79
Tabela C.6 - Custos totais e energia embebida para o pilar/viga em contato com outros espaços interiores, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	80
Tabela C.7 - Custos totais e energia embebida para o pavimento sobre espaço interior, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	81
Tabela C.8 - Custos totais e energia embebida para a cobertura sob espaço interior, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	82
Tabela C.9 - Custos totais e energia embebida para o pavimento térreo, em função da espessura isolamento térmico aplicado. ....	83



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

*CAE* – Custo anual equivalente [€/ano]

*CAEEIT* - Custo ambiental da eficiência energética do isolamento térmico [MJ/(W/K)]

*CEEIT* – Custo da eficiência energética do isolamento térmico [€/W/K]

*CF<sub>k</sub>* – Cash-flow [€/ano]

*ESEER* - Eficiência energética sazonal para arrefecimento [--]

*ESCOP* - Eficiência energética sazonal para aquecimento [--]

*F<sub>pu</sub>* – Fator de conversão de energia final para energia primária [kWh<sub>EP</sub>/kWh]

*GD<sub>ar</sub>* – Graus-Dia de arrefecimento [°C.dia/ano]

*GD<sub>aq</sub>* – Graus-Dia de aquecimento [°C.dia/ano]

*i* – Taxa de atualização [%/ano]

*IVA* – Taxa de imposto sobre o valor acrescentado [%]

*M<sub>si</sub>* – Massa superficial útil [kg/m<sup>2</sup>]

*n* – Período de análise de investimento [anos]

*PMV* – Voto Médio Previsto (“Predicted Mean Vote”) [%]

*U* – Coeficiente de transmissão térmica [W/(m<sup>2</sup>.K)]

*VLA* – Valor líquido atual [€]

*VR* – Valor residual [€]

*WhD<sub>ar</sub>* – Watts-hora-Dia de arrefecimento [Wh.dia/ano]

## **Siglas**

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

AQS – Águas Quentes Sanitárias

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

EPBD – Energy Performance Building Directive

ETICS – External Thermal Insulation Composite System

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MiEM – Mestrado integrado em Engenharia Mecânica

UTA – Unidades de Tratamento de Ar

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Desde os primórdios que o ser humano tentou manipular as condições climáticas dentro de espaços de maneira a torná-las confortáveis. O conforto térmico é fundamental para o ser humano, pois este afeta o seu bem-estar, a sua produtividade e, no geral, melhora a sua qualidade de vida.

As civilizações egípcias usavam um braseiro de porcelana que transportavam consigo de forma a conseguirem ter uma fonte de calor durante as noites frias e assim estarem confortáveis no interior das suas casas [Pruitt e Kramer, 2017]. Mais tarde, as civilizações medievais da Pérsia começaram a usar ferramentas como cisternas e torres de vento como forma de arrefecer o interior dos seus espaços e assim estarem confortáveis durante os dias quentes [Pruitt e Kramer, 2017]. Estas ferramentas eram simples, mas cumpriam a tarefa de tornar um espaço mais confortável.

Com o avanço dos tempos e das técnicas o ser humano começou a valorizar cada vez mais o conforto térmico sendo que nas últimas décadas apareceram variadíssimas soluções altamente eficazes no controlo dos ambientes térmicos interiores. Porém, à obtenção de condições de conforto estão associados custos económicos, energéticos e ambientais.

Os órgãos de governo da União Europeia constataram que os edifícios são grandes consumidores de energia, o que faz com que sejam grandes responsáveis pelas emissões de gases com efeito de estufa. Os edifícios são responsáveis por cerca de 40% de toda a energia consumida na União Europeia e por 36% de todas as emissões de gases com efeito de estufa. De modo a tentar tornar os edifícios mais eficientes e consequentemente mais sustentáveis, a União Europeia está a preparar uma nova versão da diretiva EPBD (*energy performance building directive*) [União Europeia, 2021]. Face à diretiva atualmente em vigor [União Europeia, 2018], que exige que os novos edifícios sejam “edifícios com necessidades quase nulas de energia”, a proposta de nova diretiva exige que os novos edifícios sejam “edifícios com emissões nulas” de gases com efeito de estufa. Esta proposta de diretiva propõe também que todos os edifícios com categoria G têm de ser atualizados para uma categoria igual ou superior à F. A meta para esta alteração é o ano 2027 para edifícios públicos e os não

residenciais, para edifícios residenciais a meta é 2030. O objetivo a longo prazo da União Europeia é que em 2050 todos os edifícios tenham emissões zero de gases com efeito de estufa.

O consumo de energia de um edifício está diretamente relacionado com a qualidade das suas soluções construtivas e com o sistema de climatização com que está equipado. Assim, a otimização destes parâmetros permite melhorar a eficiência energética de um edifício e por consequência melhorar a sua classificação energética. De entre os aspetos com impacto significativo sobre o desempenho energético de um edifício destacam-se os elementos opacos da envolvente, os quais funcionam como obstáculo entre o interior e as condições climáticas no exterior. Estas soluções são constituídas por vários elementos que formam uma camada com materiais específicos de forma a obter as melhores propriedades possíveis. É fundamental que estas soluções construtivas tenham boas propriedades térmicas de forma a minimizar as trocas de energia entre o exterior e o interior. Um fator que tem grande influência no coeficiente de transmissão térmica é o isolamento térmico, o qual pode ser de diferentes materiais e ter diferentes espessuras, pelo que é necessária uma boa adequação do mesmo às características e localização do edifício.

Neste trabalho é efetuada uma análise energética, económica e ambiental da aplicação de isolamento térmico aos edifícios e surge pela importância de compreender a influência que a aplicação do isolamento térmico tem no comportamento energético, no custo anual equivalente e no impacto ambiental de um edifício situado no continente europeu. Assim, é dada ênfase à identificação de qual o melhor material de isolamento térmico e qual a espessura ótima, tendo em consideração três abordagens em simultâneo (energética, económica e ambiental).

## **1.2. Estado de Arte**

Nos dias de hoje, a questão da eficiência energética e da sustentabilidade dos edifícios é um tema com extrema importância. Por outro lado, os detentores dos edifícios dão preferência a soluções construtivas que minimizem os custos económicos. Adicionalmente, as preocupações ambientais são um assunto muito relevante, o que levou a que fossem publicados vários estudos sobre estas três temáticas.

Anastaselos et al. (2009) fizeram uma avaliação energética, económica e ambiental das soluções usadas como isolamento térmico. Estes autores criaram uma ferramenta que atribui um ranking a um determinado elemento de construção, o que facilita a comparação entre os vários materiais. Este ranking divide-se em três categorias (A, B e C) e é atribuído consoante a sua performance energética, económica e ambiental. Ao colocar uma classificação para cada tipo de performance permite ao utilizador fazer a seleção de qual a abordagem que este quer priorizar. Este trabalho é de extrema utilidade, pois tabela os valores das emissões de gases com efeito de estufa e os valores da energia embebida para os vários materiais usados nas soluções construtivas opacas, os quais foram bastante úteis para a realização no presente estudo da análise sob a perspetiva ambiental.

Dylewski e Adamczyk (2011) abordaram o tema dos benefícios económicos e ambientais do uso de isolamento térmico nas soluções construtivas das paredes externas dos edifícios. Estes autores concluíram que o impacto ambiental de um edifício diminui fortemente com a diminuição das necessidades de energia para o funcionamento dos equipamentos AVAC, sendo que uma forma altamente eficaz de diminuir estas necessidades é o uso de isolamento térmico.

Bastos et al. (2014) fizeram uma análise à energia consumida e às emissões de gases com efeito de estufa de três tipos de edifícios localizados numa zona em Lisboa durante o ciclo de vida dos mesmos. Modelaram o ciclo de vida dos edifícios com foco nas fases de construção, de restauro/manutenção e de uso, tendo considerado um período de análise de 75 anos. Constataram que a fase de uso corresponde à fase com maiores necessidades de energia primária (69 - 83%) e, como tal, é a que provoca maiores emissões de gases com efeito de estufa.

Rebelo (2016) identificou as janelas mais vantajosas economicamente para edifícios localizados em Portugal.

Braulio-Gonzalo e Bovea (2017) realizaram um estudo sobre a performance económica e ambiental de materiais usados como isolamento térmico nas soluções construtivas opacas da envolvente dos edifícios.

Costa (2018) analisou o custo do conforto térmico para edifícios localizados várias regiões climáticas do clima português.

Totland et al. (2019) efetuaram um estudo sobre a influência da espessura de isolamento térmico nas emissões de CO<sub>2</sub>.

O objetivo principal do estudo de Pina (2021) foi avaliar o custo do conforto térmico em edifícios localizados nos vários climas do continente europeu. De forma a avaliar este custo foram considerados 5 graus de qualidade de conforto térmico. Para realizar uma análise eficaz no paradigma dos edifícios do continente europeu, este autor selecionou 5 localidades que, no seu conjunto, representam as várias condições climáticas do continente europeu, as quais foram selecionadas em função do número de graus-dia de aquecimento e de arrefecimento. Pina (2021) considerou 6 tipologias de edifícios (apartamento, moradia, clínica, supermercado, escola e agência bancária) sendo que 5 destas tipologias são as mesmas do estudo feito por Saraiva (2017). O autor fez também uma análise em que comparou duas classes de sistemas de AVAC (A+ e A+++), tendo concluído que a classe A+ é mais vantajosa do ponto de vista do custo de conforto térmico em quase todas as situações que avaliou. Pina (2021) concluiu que tanto o custo do conforto térmico como as necessidades de energia para climatização aumentam com a melhoria da qualidade do conforto térmico. Verificou ainda que os edifícios com ocupação permanente apresentam custos do conforto térmico e de necessidades de energia superiores aos edifícios com ocupação intermitente. Adicionalmente concluiu que a tipologia de edifício, o tipo de clima, o país, a qualidade de conforto térmico pretendida e o investimento no sistema AVAC influenciam fortemente o custo do conforto térmico.

Dos trabalhos acabados de referir, os de Rebelo (2016), Costa (2018) e Pina (2021) têm uma relação forte, mas indireta, com o presente estudo. Como tal, foram uma fonte privilegiada de recolha de informação. Tratando-se de um trabalho de continuidade, o presente estudo dá continuação aos estudos realizados por Saraiva (2017) e por Raimundo et al. (2020). Como tal, segue-se uma descrição destes estudos.

O trabalho de Saraiva (2017) foi fundamental para o presente estudo. O mesmo tem como foco o ponto ótimo de rentabilidade económica das soluções construtivas opacas de edifícios localizados em Portugal, sendo o seu objetivo relacionar o custo das soluções construtivas opacas com a eficiência energética que possibilitam. Para identificar o ponto ótimo, Saraiva (2017) testou a influência que a aplicação do isolamento térmico nas soluções construtivas opacas tem sobre o custo económico dos edifícios. O levantamento do custo das soluções construtivas foi efetuado recorrendo ao Gerador de preços da Cype Ingenieros

[Cype, 2017] e o cálculo das propriedades termofísicas das soluções construtivas opacas foi realizado recorrendo à folha de cálculo CalProTerm [Raimundo, 2014]. Este autor identificou o EPS (poliestireno expandido) como o material de isolamento térmico mais vantajoso economicamente para ser aplicado a edifícios em Portugal. Saraiva (2017) considerou 5 edifícios (apartamento, moradia, clínica, escola e supermercado) supostamente implantados em 3 localizações em Portugal com climas diferentes (Odemira, Ansião e Mirandela) e usou a versão 320 do software SEnergEd [Raimundo, 2021] para realizar a simulação do comportamento térmico, energético e económico do ciclo de vida completo dos edifícios. Identificou que a aplicação de isolamento térmico na posição intermédia (na caixa de ar) das soluções construtivas opacas era mais vantajosa do ponto de vista económico e que a espessura de isolamento térmico ótima depende fortemente da tipologia de edifício. Saraiva (2017) concluiu que edifícios residenciais localizados nas regiões com climas mais intensos requerem as maiores espessuras de isolamento térmico.

Raimundo et al. (2020) focaram o seu estudo na identificação das soluções de isolamento térmico dos elementos da envolvente opaca mais vantajosas economicamente e energeticamente. Para isso estes autores identificaram a espessura ótima de isolamento térmico para os mesmos edifícios e climas que Saraiva (2017), porém concluíram que a espessura ótima de isolamento térmico depende da perspetiva com que a análise é efetuada. Ou seja, a espessura ótima do ponto de vista económico não é a mesma do que a obtida sob o ponto de vista energético. À semelhança de Saraiva (2017), Raimundo et al. (2020) verificaram que a posição de aplicação de isolamento térmico mais vantajosa é a posição intermédia das soluções construtivas opacas, e também concluíram que edifícios residenciais e as regiões com climas intensos necessitam de espessuras de isolamento térmico maiores que os restantes edifícios e regiões.

Os estudos realizados por Saraiva (2017) e por Raimundo et al. (2020) envolveram edifícios localizados no clima temperado português e neles foi dada ênfase ao consumo de energia e ao custo económico. O presente trabalho continua os dois anteriores considerando mais uma tipologia de edifício, climas do continente europeu entre quente e extremamente frio e acrescenta a avaliação do impacto ambiental.

### 1.3. Objetivos

O presente trabalho tem dois objetivos principais. O primeiro é a melhoria do software SEnergEd [Raimundo, 2021] de modo que este faça também a simulação dos impactos ambientais do edifício ao longo do seu ciclo de vida. O segundo consiste em realizar uma análise de modo a compreender a influência que o isolamento térmico tem nos parâmetros energéticos, económicos e ambientais dos edifícios localizados no continente europeu, nomeadamente a identificação do material isolante mais adequado e a sua espessura ótima segundo as perspetivas económica, energética e ambiental.

A versão disponibilizada do software (SEnergEd\_v508) realiza a simulação dinâmica monozona do comportamento térmico e energético de um edifício, e realiza a avaliação económica do ciclo de vida do mesmo. Logo, para munir este software também com a capacidade de análise do impacto ambiental do edifício ao longo do seu ciclo de vida, foram acrescentados os módulos necessários para o efeito. Esta nova versão foi designada por SEnergEd\_v601, concretizando-se assim o primeiro objetivo deste trabalho.

Para a realização do segundo objetivo foi necessário previamente identificar o material isolante térmico mais adequado, selecionar locais representativos dos vários tipos de clima do continente europeu e selecionar um conjunto adequado de tipologias de uso de edifícios.

Para selecionar o material isolamento térmico mais adequado foram tidos em consideração as suas propriedades térmicas, o seu custo e o seu impacto ambiental. De modo a facilitar esta seleção foram usados dois conceitos, o Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (*CEEIT*) e o Custo Ambiental da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (*CAEEIT*).

Foram selecionadas 5 cidades com condições climáticas distintas, as quais se pensa que, no seu conjunto, são uma boa representação dos vários tipos de clima existentes neste continente. Estas cidades foram selecionadas com base no seu número de graus-dia de aquecimento (*GDaq*) e de arrefecimento (*GDar*), sendo estas: Málaga (clima quente), Lisboa (clima moderado), Valladolid (clima frio), Varsóvia (clima muito frio) e Reykjavik (clima extremamente frio).



As tipologias de edifício foram selecionadas com o objetivo de obter uma boa representação das várias tipologias de uso do continente europeu, tendo-se optado por: um apartamento localizado a meio de um edifício multifamiliar e uma moradia isolada (edifícios residenciais), uma clínica (edifício de serviços com ocupação permanente), uma escola e uma agência bancária (edifícios de serviços com ocupação intermitente) e um supermercado (edifício de comércio com ocupação intermitente).

Seguiu-se a compilação das características arquitetónicas dos edifícios, o levantamento dos seus elementos construtivos e a caracterização dos elementos passivos e ativos dos mesmos, em termos de propriedades termofísicas, eficiência energética, impacto ambiental e custo económico. A execução desta componente beneficiou do facto de este ser um trabalho de continuidade, existindo assim muita informação disponível, nomeadamente resultante dos trabalhos de: Rebelo (2016), sobre envidraçados; Saraiva (2017) sobre soluções construtivas opacas; e Pina (2021) sobre climas do continente europeu e diferenças de preço entre países.

Finalmente, para compreender a influência do isolamento térmico no comportamento térmico, energético, ambiental e económico de edifícios localizados no continente europeu recorreu-se à nova versão do software (SEnergEd\_v601), o que permitiu obter a espessura ótima de isolamento térmico para os diversos tipos de clima e tipologias de edifício, tendo em consideração os correspondentes custos energéticos, económicos e ambientais. Com a espessura ótima de isolamento térmico é possível compreender a influência deste no comportamento energético, económico e ambiental de várias de várias tipologias de edifícios localizadas em vários climas típicos europeus.

## 2. FERRAMENTAS DE CÁLCULO

O foco do presente estudo assenta na minimização do custo do conforto térmico segundo três vertentes, a energética, a económica e a ambiental. Para o efeito foi usada uma metodologia que permite calcular o custo do conforto térmico tendo em conta as três vertentes referidas anteriormente. Adicionalmente, pretende-se com este estudo compreender a influência que a qualidade das soluções tem na eficiência energética dos edifícios, e, conseqüentemente, qual o impacto que o aumento desta eficiência tem nos custos energéticos, económicos e ambientais.

A metodologia de cálculo utilizada assentou no recurso às ferramentas de cálculo CalProTerm [Raimundo, 2014] e SEnergEd [Raimundo, 2021].

O CalProTerm permite obter os valores do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) e da massa superficial útil ( $M_{si}$ ) para as diversas soluções construtivas dos edifícios. Esta ferramenta de cálculo foi fundamental para a caracterizar a envolvente opaca.

De seguida foi utilizada a versão 508 do software SEnergEd, versão disponibilizada, para fazer a simulação térmica, energética e económica do ciclo de vida completo do edifício. Para o efeito tiveram de ser inseridos os dados do edifício, os do clima e das pessoas, assim como parâmetros económico-financeiros. Como se pretendia efetuar também a análise de impacto ambiental, foi necessário melhorar a versão 508 do SEnergEd, implementando os algoritmos necessários. A nova versão (SEnergEd\_v601) ficou preparada para a simulação dinâmica do comportamento térmico e energético dos edifícios e para o cálculo do seu custo económico e ambiental durante o seu ciclo de vida.

### 2.1. CalProTerm

A folha de cálculo CalProTerm, desenvolvida por Raimundo (2014), é um software de cálculo das características termofísicas dos elementos construtivos dos edifícios, tendo associada uma base de dados com as propriedades dos materiais de construção. Nesta folha de cálculo encontra-se um elevado número de materiais utilizados na área da construção e da restauração de edifícios.

De forma a usar a folha de cálculo CalProTerm é necessário saber quais são os materiais que constituem o elemento construtivo, a sua ordem no elemento e a espessura de cada material. De notar que a folha de cálculo dá valores consoante a separação do espaço climatizado com: outro espaço climatizado, um espaço não climatizado, terreno e ambiente exterior, pelo que é importante saber qual o tipo de espaço com o qual esse elemento está em contacto.

Neste trabalho a folha de cálculo CalProTerm será usada para obter os coeficientes de transmissão térmica ( $U$ ) e a massa superficial útil ( $M_{si}$ ) das soluções construtivas opacas.

## **2.2. SEnergEd**

Esta foi a ferramenta base para a realização deste estudo, ou seja, foi com recurso a ela que foi efetuada a análise económica, energética e ambiental da aplicação de isolamento térmico aos edifícios do continente europeu. A primeira versão deste software foi desenvolvida por Raimundo em 2008 [Raimundo, 2008], que continuou a melhoria do mesmo ao longo dos anos [Raimundo, 2021]. Durante este processo houve participação de alguns estudantes de mestrado, que no âmbito das suas dissertações introduziram melhorias que lhe permitiram realizar os estudos que pretendiam fazer. De entre estas participações destacam-se as de Costa (2018) e as de Pina (2021). Luís Costa introduziu a possibilidade de, em alternativa ao controlo do funcionamento dos sistemas de AVAC por setpoints de temperatura do ar, ele poder ser efetuado por setpoints de  $PMV$  (voto médio previsto), que é um indicador da qualidade do conforto térmico [ISO 7730, 2017]. De realçar que o cálculo do  $PMV$  requer informação específica sobre os ocupantes, nomeadamente as características do seu vestuário, o seu nível de atividade física e o trabalho externo que estão a desenvolver. João Pina melhorou substancialmente os algoritmos de cálculo dos fatores de sombreamento dos envidraçados. Antes desta melhoria o SEnergEd tinha a sua utilização limitada a edifícios localizados em Portugal. O João Pina fez também um trabalho importante a nível da criação de ficheiros climáticos para várias localidades do continente europeu.

### **2.2.1. Versão disponibilizada**

A versão que me foi disponibilizada [SEnergEd\_v508] efetua a simulação dinâmica monozona do comportamento térmico e energético de um edifício e efetua uma avaliação económica do mesmo durante o seu ciclo de vida completo.

A simulação do comportamento térmico e energético de edifícios assenta numa metodologia de cálculo usando o modelo conhecido por 5R1C e que se encontra descrito na norma ISO 13790 (2006). O modelo 5R1C, descrito em Raimundo (2008), recorre a uma metodologia dinâmica de simulação horária anual que é aplicada a um espaço monozona (Figura 2.1). Este modelo baseia-se numa analogia entre o comportamento térmico de um edifício e um circuito elétrico constituído por 5 resistências e 1 capacitância.

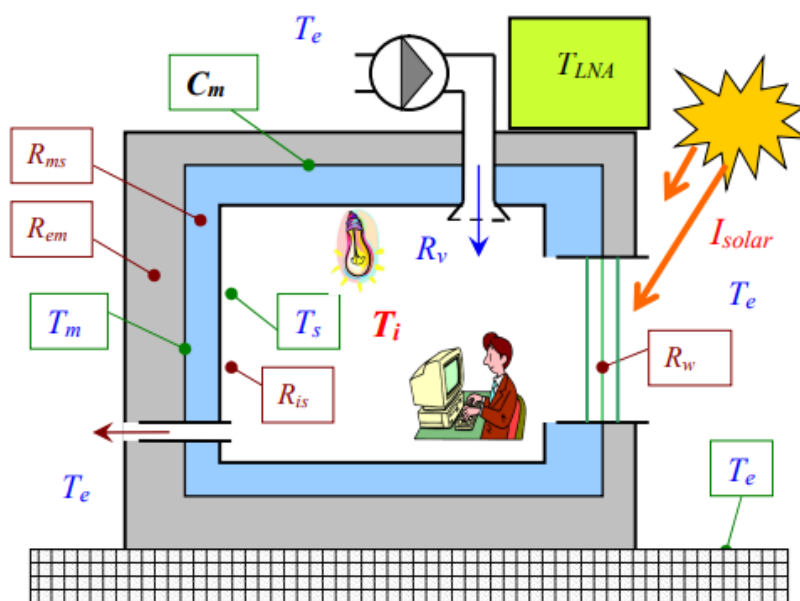


Figura 2.1 - Representação do modelo 5R1C [Raimundo, 2008].

Os fenómenos de transmissão de calor são essenciais no modelo 5R1C, estes fenómenos são representados na forma de um balanço térmico em regime transitório e têm em consideração a temperatura média do ar no interior do espaço útil ( $T_i$ ), a temperatura média das superfícies da envolvente em contacto com o ar interior ( $T_s$ ) e a temperatura média da massa térmica ( $T_m$ ). Importante constatar que a temperatura do ar exterior e das superfícies sólidas exteriores à envolvente da zona útil ( $T_e$ ) e a temperatura dos locais não climatizados ( $T_{LNA}$ ) são também fundamentais para representar os fenómenos de transferência entre o interior do edifício e o ambiente exterior. O balanço que ocorre no circuito tem ainda em consideração a radiação solar ( $I_{solar}$ ).

O circuito referido anteriormente é composto por uma resistência térmica entre superfícies interiores e o ar interior ( $R_{is}$ ), uma resistência térmica entre a massa térmica e as superfícies interiores dos elementos opacos ( $R_{ms}$ ), uma resistência térmica entre o exterior e

---

a massa térmica dos elementos opacos ( $R_{em}$ ), uma resistência térmica associada aos vãos envidraçados ( $R_w$ ) e uma resistência térmica associada ao caudal de ar novo introduzido no espaço ( $R_v$ ). A capacitância representa a massa de inércia do edifício que se supõe concentrada no interior dos elementos opacos ( $C_m$ ).

Para que o modelo 5R1C seja válido é necessário seguir alguns critérios nomeadamente, que todos os espaços climatizados do edifício tenham os mesmos setpoints de temperatura do ar (ou do índice *PMV*, se for essa a opção), que exista apenas um sistema de aquecimento e apenas um sistema de arrefecimento, os quais servem todas as zonas climatizadas, e que quando existe ventilação mecânica, pelo menos 96% do caudal de ar novo é introduzido nas zonas climatizadas.

A análise económica do ciclo de vida do edifício efetuada pelo software *SEnergEd* assenta numa análise de projeto de investimento, recorrendo para o efeito ao conceito de Custo Anual Equivalente (*CAE*). Esta metodologia encontra-se descrita de modo detalhado nos elementos de apoio ao estudo da unidade curricular Economia e Gestão Industrial do curso *MiEM* do *DEM-FCTUC* [Raimundo, 2018] e de modo resumido na publicação de Raimundo et al. (2020).

O Custo Anual Equivalente (*CAE*) representa o custo associado ao ciclo de vida do edifício, correspondendo ao custo médio anual que se obtém tendo em conta o investimento inicial, os custos associados à exploração do edifício e os custos de demolição do mesmo. Para determinar o *CAE* de um edifício é necessário fornecer ao *SEnergEd* informação suficiente para determinar o investimento inicial (em terreno, projetos, licenças, impostos, construção dos elementos passivos, instalação de sistemas ativos e de sistemas de produção de energia a partir de fontes renováveis, etc.), determinar eventuais rendimentos, calcular os gastos com o funcionamento e a manutenção e estimar o valor residual. É ainda necessário conhecer o período de vida útil do edifício, como é que o investimento inicial é financiado (parcela de capitais próprios, parcela de capitais alheios e taxa de juro efetiva global a pagar pelos capitais alheios), a taxa de inflação e o enquadramento fiscal do detentor do edifício.

Entre outras possibilidades, os rendimentos anuais podem ser devidos à venda de energia ou ao arrendamento de espaços. Os gastos anuais estão associados ao funcionamento do edifício e podem ser devidos à compra de energia e de água, à manutenção e remodelação dos elementos passivos e ativos, a impostos (por exemplo, o *IMI*), a taxas municipais (de saneamento, de recolha de resíduos, etc.), quotas de condomínio e outras despesas. A

diferença entre os rendimentos anuais e os gastos anuais é designado por Cash-flow anual de exploração ( $CF_k$ ).

O Valor Residual ( $VR$ ) é o valor do projeto de investimento no final do período de análise, ou seja, é a quantia que se espera que o edifício valha no instante final do período de análise. Este valor pode ser obtido subtraindo ao valor do terreno os gastos com demolições, remoção de escombros e outros gastos como por exemplo licenças.

Com base na informação anterior é determinado o Valor Líquido Atual ( $VLA$ ), o qual está associado à rentabilidade do projeto de investimento e é calculado através da soma algébrica de todos os fluxos monetários atualizados para o instante inicial de arranque do projeto, ou seja,

$$VLA = \sum_{k=m}^{k=n} \frac{CF_k - I_k}{(1+i)^k} + \frac{VR}{(1+i)^n} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1) o  $i$  é a taxa de atualização,  $n$  é o número de anos do período de análise,  $I_k$  retrata o investimento inicial no projeto,  $k$  é um índice que representa cada ano durante o período de análise.

A partir do conhecimento do Valor Líquido Atual é possível determinar o valor do Custo Anual Equivalente através da expressão:

$$CAE = -VLA \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.2)$$

No presente estudo será usado o custo do conforto térmico em vez de o custo anual equivalente. Este custo de conforto térmico terá apenas em consideração o preço da energia, o custo de material de isolamento térmico e o seu custo de aplicação. Logo, o único investimento inicial será o custo do material isolante térmico e o custo correspondente à sua aplicação nas soluções construtivas opacas.

O software SEnergEd necessita que seja introduzida informação sobre a localização do edifício, orientação das suas fachadas, características geométricas e de arquitetura, características e sombreamento dos envidraçados, características das soluções construtivas da envolvente opaca, densidade de ocupação, de iluminação e de equipamentos não AVAC, perfil de funcionamento dos equipamentos energéticos não AVAC, perfil de atividade dos ocupantes, características do vestuário, contribuição de energias renováveis, setpoints para aquecimento e arrefecimento definidos por temperatura (ou por PMV), potência e eficiência

dos equipamentos AVAC, perfil de funcionamento dos equipamentos AVAC, características do ar interior e caudal de ar novo, caracterização do sistema de preparação de AQS, características da cozinha, da lavandaria e de outros espaços complementares, sistemas de energia renovável, iluminação exterior, equipamentos e sistemas específicos, etc.

Para fazer a análise económica o SEnergEd precisa de alguns dados adicionais, sendo eles os necessários para determinar o investimento inicial e o valor residual, preço da renovação dos componentes do edifício, rendimentos e gastos, taxa anual de inflação, preço de compra de energia, imposto anual pela propriedade do edifício, taxa de imposto de IVA, gastos com a manutenção, etc.

Após a introdução dos dados anteriores, a versão disponibilizada do software (SEnergEd\_v508) faz a simulação do comportamento térmico, energético e económico devolvendo vários resultados, como por exemplo, a necessidade e o consumo anual de energia global do edifício, o consumo anual após contribuição de energia renováveis, horas com ocupação em situação de conforto, gastos associados aos consumos de energia global do edifício, o custo anual equivalente do edifício e o investimento anual. O software faz também a evolução horária da potência térmica útil, da temperatura exterior e interior, do índice PMV e do indicador PPD. Apresenta-se na Figura 2.2 o esquema global da estrutura de cálculo da versão 508 do software SEnergEd.

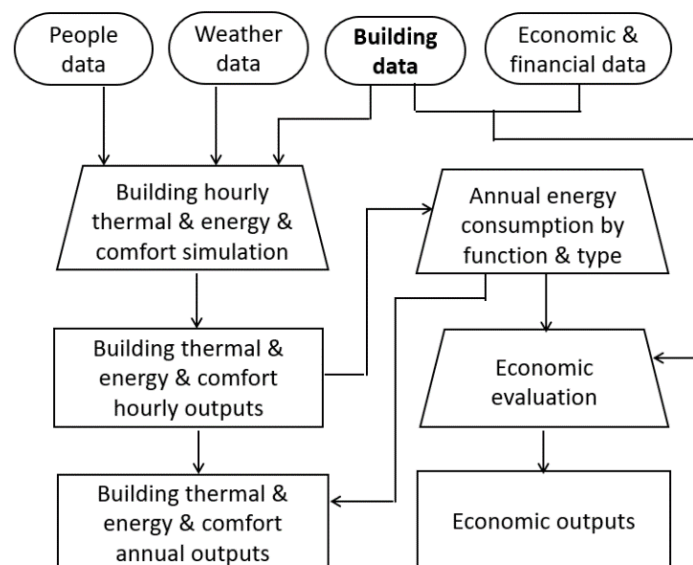


Figura 2.2 - Esquema do algoritmo global de cálculo da versão 508 do SEnergEd

### **2.2.2. Melhorias introduzidas**

Para a execução do presente estudo a versão 508 do software SEnergEd apresenta limitações. Esta versão permite fazer a simulação térmica, energética e económica para o ciclo de vida completo do edifício, porém não permite fazer a análise de impacto ambiental. A versão 601 do software SEnergEd pretende ser mais completa fazendo uma análise de impacto ambiental ao ciclo de vida completo do edifício.

Os impactos ambientais de um edifício dividem-se essencialmente em três partes: os impactos ambientais provocados pela construção, os impactos ambientais provocados pela exploração do edifício (fase de uso) e os impactos ambientais provocados pela demolição do edifício no seu fim de vida.

Os impactos ambientais provocados pela demolição do edifício são difíceis de caracterizar sendo que diversos estudos relacionados com esta área se focam apenas nos impactos ambientais provocados pela construção e pela fase de uso do edifício. Segundo Azari (2014) estas são as fases com impactos ambientais mais significativos. Assim, de modo a incorporar a análise ambiental no software SEnergEd o foco será na fase de construção e na fase de uso.

Totland et al. (2019) refere que quando os edifícios eram termicamente menos isolados a fase de uso era responsável por cerca de 90% dos seus impactos ambientais. Porém, à medida que os edifícios têm sido melhorados, a energia consumida durante a fase de uso tem diminuído, o que tem colocado mais atenção na energia consumida na fase de construção. Os impactos ambientais da fase de uso estão diretamente relacionados com os impactos da fase de construção visto que as escolhas dos materiais colocados nas soluções construtivas podem diminuir significativamente a energia consumida na fase de uso.

Os impactos ambientais provocados pela fase de construção surgem da energia usada para a extração, fabrico, transporte e aplicação dos elementos constituintes do edifício [Grazieschi et al., 2021]. Esta energia denomina-se energia embebida e é um conceito fundamental para caracterizar os impactos ambientais provocados pela fase de construção do edifício. No fundo é a energia que foi necessário consumir para construir o edifício. Esta energia é um indicador da sustentabilidade dos materiais e dos equipamentos. Quanto menor for a energia embebida menor será o gasto de energia, logo menor será o seu impacto



ambiental. Porém, se a qualidade das soluções construtivas não for a ideal o consumo de energia para AVAC será maior, o que levará a um aumento do impacto ambiental.

Os impactos ambientais provocados na fase de uso surgem dos consumos de energia pelos equipamentos instalados no edifício. Neste estudo o foco é o consumo dos equipamentos AVAC uma vez que a energia consumida pelos restantes equipamentos (iluminação, equipamentos não AVAC, preparação de AQS, etc.) é constante e não irá variar nem com o tipo de clima nem com a qualidade das soluções construtivas do edifício.

De forma a caracterizar de modo mais preciso os impactos ambientais provocados na fase de uso foi programado na versão 601 do SEnergEd a contabilização da taxa de degradação energética dos edifícios. A taxa de degradação energética dos edifícios representa a degradação que ocorre tanto nos equipamentos AVAC como nas propriedades das soluções construtivas ao longo dos anos. Com o passar dos anos os equipamentos de AVAC vão-se degradando e vão sendo menos eficientes, consequentemente o consumo de energia tenderá a ser maior. Ora esta degradação é um fator fundamental para a análise de impacto ambiental. Para efeitos do presente estudo assumiu-se que a taxa de degradação é de 1%/ano.

O consumo energético global foi um outro conceito introduzido na versão 601 do software SEnergEd, este é a soma do consumo dos equipamentos AVAC (fase de uso) com a energia embebida nas soluções construtivas do edifício (fase de construção). O consumo energético global é calculado para um período de análise de 50 anos tendo em conta a taxa de degradação anual referida anteriormente. Apresenta-se na Figura 2.3 um esquema que resume o descrito anteriormente.

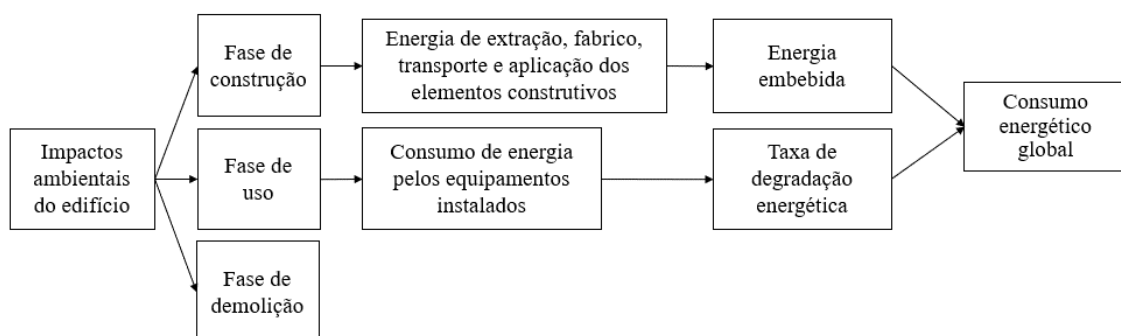


Figura 2.3 - Esquema dos impactos ambientais de um edifício

Face á versão 508, a versão 601 do SEnergEd precisa que sejam fornecidos alguns dados adicionais, sendo estes a energia embebida em kWh por m<sup>2</sup> para cada solução construtiva da envolvente do edifício em estudo (paredes, pilares, envidraçados, etc.) e a taxa de degradação anual. Com estes dados adicionais o SEnergEd\_v601 faz o cálculo e devolve valores para a energia embebida total por solução construtiva, a energia embebida total no edifício e o consumo energético global. Na Figura 2.4 encontra-se o esquema global de cálculo da versão 601 deste software, sendo de destacar a componente de avaliação do impacto ambiental do edifício em simulação.

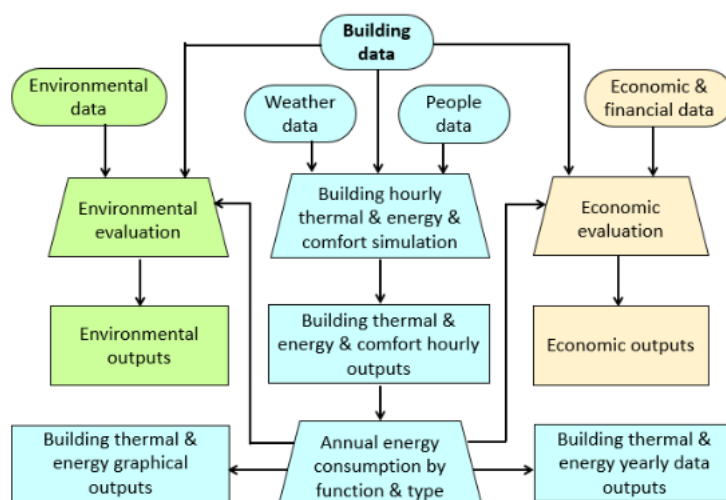


Figura 2.4 - Esquema do algoritmo global de cálculo da versão 601 do SEnergEd

### 2.3. Relações energéticas e ambientais

No presente estudo há relações energéticas e ambientais que facilitam a análise dos resultados devolvidos pela versão 601 do SEnergEd, a qual fornece valores dos consumos de energia final para aquecimento e para arrefecimento. Porém, esta energia final pode ser de vários tipos, pelo que é necessário proceder à sua uniformização através da sua conversão para uma base de referência em termos de energia primária.

Segundo Silva (2012), a energia primária é a energia correspondente aos recursos energéticos que se encontram na natureza. Estes recursos podem ser renováveis, como a energia hídrica, energia solar e energia eólica, ou não-renováveis, como o petróleo e o gás natural. A energia final (ou secundária) é energia num estado que permite que a mesma possa ser utilizada na alimentação de equipamentos, a qual pode corresponder exatamente à energia primária (como é o caso do gás natural, entre outros), resultar de um processo de refinação de energia primária (gasolina, gasóleo, etc.) ou de um processo de transformação desta energia (energia elétrica, gás de petróleo liquefeito, energia térmica, etc.). A energia útil (ou terciária) é energia capaz de servir diretamente as pessoas (calor introduzido ou retirado de um espaço para o manter confortável, calor contido nas águas quentes sanitárias, energia sob a forma luminosa, etc.), sendo produzida por equipamentos alimentados com energia final.

Para efetuar uma análise de impacto ambiental é necessário estabelecer o tipo de energia primária a considerar como referência e conhecer os fatores de conversão de energia final para a energia primária considerada como referência. Em Portugal estes parâmetros encontram-se definidos num documento conhecido por “Manual SCE” (Manual do Sistema Nacional de Certificação Energética dos edifícios), o qual foi publicado através do Despacho nº 6476-H/2021, de 1 de julho [DGEG, 2021]. Este regulamento do SCE especifica como energia primária de referência o kWh<sub>EP</sub> (quilo-watt-hora equivalente de petróleo), e como fatores de conversão de energia final para a energia primária de referência os indicados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Fatores de conversão de energia final para a energia primária de referência [DGEG, 2021].

Tipo de energia	$F_{pu}$ [kWh <sub>EP</sub> /kWh]
Eletricidade, independentemente da origem (renovável ou não renovável)	2,5
Combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos não renováveis	1,0
Energia térmica de origem renovável	1,0
Energia proveniente da rede urbana de frio e calor da Climaespaço, Parque das Nações, Lisboa	1,06
Energia proveniente de sistemas de cogeração no edifício de referência	1,86
Energia proveniente de sistemas de trigeriação no edifício de referência	1,70

Segundo o relatório do IPCC (sigla em inglês do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) sobre a mitigação das alterações climáticas [IPCC, 2014], as emissões de CO<sub>2</sub> devidas à queima de combustíveis e a processos industriais correspondem a cerca de 78% de todas as emissões de gases com efeitos de estufa, no período entre 1970 e 2010. Este relatório estima que nos países industrializados grande parte das emissões de CO<sub>2</sub> são devidas à queima de carvão, gás e petróleo. Adicionalmente, no seu comunicado à imprensa de 9 de agosto de 2021, o IPCC informou que existem relatórios que comprovam que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o principal responsável pelas mudanças climáticas [IPCC, 2014].

Para fazer uma avaliação de impacto ambiental é necessário fazer a ligação entre consumo de energia primária e as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Para Portugal, o “Manual SCE”, publicado através do Despacho nº 6476-H/2021, de 1 de julho [DGEG, 2021], especifica, para conversão da energia primária (em kWh<sub>EP</sub>) para emissões de quilogramas de CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>), os fatores indicados na Tabela 2.2

Tabela 2.2 - Fatores de conversão da energia primária para emissões de CO<sub>2</sub> [DGEG, 2021]

<b>Tipo de energia</b>	<b>Fator de conversão [kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>EP</sub>]</b>
Eletricidade	0,144
Gasóleo	0,267
Gás Natural	0,202
GPL canalizado (propano)	0,170
GPL garrafas	
Renovável	0
Energia proveniente da rede urbana de frio e calor da Climaespaço, Parque das Nações, Lisboa	0,006

Importa realçar que os fatores de conversão de energia final para energia primária de referência e os fatores de conversão de energia primária para emissões de CO<sub>2</sub>, apresentados anteriormente, são válidos para a República Portuguesa. Estes fatores poderão ter valores diferentes noutros países, porém, no presente estudo será assumido que é adequado aplicar os fatores indicados nas Tabelas 2.1 e 2.2 também no caso dos outros países europeus envolvidos.

### **3. MATERIAIS**

Este capítulo tem como objetivo mostrar o material que serve como base para o presente estudo. Mais especificamente, faz-se a caracterização dos edifícios em estudo, dos sistemas de climatização, dos vãos envidraçados, dos elementos opacos, dos parâmetros económico-financeiros e das condições climáticas.

Relativamente aos elementos opacos será feita uma descrição das soluções construtivas sem isolamento térmico, apresentam-se os materiais isolantes térmicos mais utilizados no continente europeu e quais as espessuras a testar. Neste âmbito, o primeiro passo é identificar o isolante térmico mais viável em termos económicos, energéticos e ambientais. Na realização da análise económica e energética é explicado como foi obtido o custo do material e o custo da sua aplicação. Na análise ambiental é esclarecido como foi calculada a energia embebida no mesmo.

Neste capítulo são também especificados quais os parâmetros económico-financeiros assumidos. Estes serão divididos em gerais (preço da energia, período de análise, taxa de inflação, etc.) e específicos de cada edifício (enquadramento fiscal do detentor do mesmo, IVA, poupanças fiscais, etc.). Por fim, são expostas as condições climáticas em estudo e é fundamentada a sua escolha.

#### **3.1. Edifícios – Layout e Perfis de Ocupação e de Funcionamento**

De modo a ter uma boa representação das várias tipologias de edifícios usadas no continente europeu, foram selecionados seis edifícios característicos. Devido ao presente estudo ser um trabalho de continuação, optou-se por selecionar edifícios já considerados em estudos anteriores [Saraiva, 2017; Costa, 2018; Raimundo et al., 2020; e Pina, 2021], aproveitando assim a informação disponível sobre os mesmos.

Os edifícios considerados são dois edifícios residenciais (apartamento e moradia), três edifícios de serviços (clínica, agência bancária e escola) e um edifício de comércio (supermercado). O apartamento, a moradia e a clínica são edifícios com ocupação permanente e a escola, a agência bancária e o supermercado são edifícios com ocupação intermitente.

### 3.1.1. Apartamento

O apartamento, descrito em Raimundo et al. (2011a), é de tipologia T3 e encontra-se no 2º piso de um edifício com 5 andares. O apartamento tem um pé-direito de 2.60 m e uma área útil de pavimento dos espaços climatizados de 109.40 m<sup>2</sup>: sala, cozinha, 2 instalações sanitárias, 3 quartos, circulação comum, arrumo e 3 varandas.

Este edifício tem uma área total de envidraçados de 21.06 m<sup>2</sup> e a sua planta encontra-se representada na Figura 3.1. Considera-se que moram quatro pessoas no apartamento, apresentando-se no Anexo A os detalhes do mesmo.



Figura 3.1 - Planta do apartamento [Raimundo et al., 2011a]

### 3.1.2. Moradia

A moradia encontra-se descrita em Raimundo et al. (2011b). Trata-se de uma moradia isolada onde, tal como no apartamento, moram quatro pessoas. Este edifício tem uma tipologia T3, estando dividida por 3 pisos, sendo estes uma cave (pisso -1), o piso 0 e um sótão (pisso 1). O pé-direito médio deste edifício é de 2.62 m e a área útil de pavimento dos espaços climatizados é de 167.13 m<sup>2</sup>.

Na cave (pisso inferior) situa-se a lavandaria, arrumos, adega e zona técnica, todos estes espaços são considerados não climatizados. O piso 0 tem uma área útil de pavimento de 140 m<sup>2</sup> e divide-se em: cozinha, sala, escritório, duas instalações sanitárias, dois quartos

e dois vestíbulos (Figura 3.2). No piso 1 (sótão) encontra-se um espaço de leitura que tem uma área útil de 27.13 m<sup>2</sup>. Encontram-se no Anexo A mais detalhes sobre esta moradia.

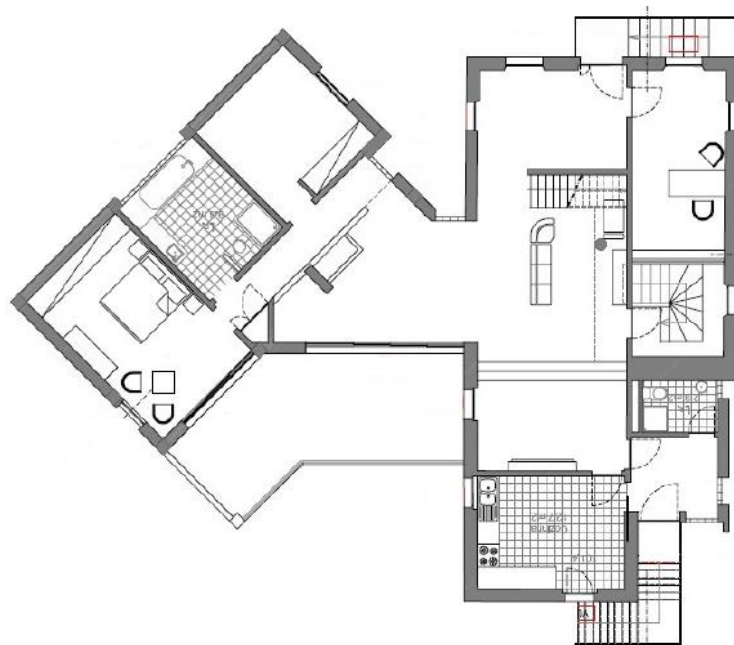


Figura 3.2 - Planta da moradia [Raimundo et al., 2011b]

### 3.1.3. Clínica

O edifício da clínica, descrito por Raimundo et al. (2011c), é constituído por dois pisos que perfazem uma área útil de pavimento dos espaços climatizados de 926.7 m<sup>2</sup>, com um pé-direito médio de 3.73 m. A clínica pertence a um edifício com duas frações autónomas de serviços (Figura 3.3), sendo estas uma farmácia e uma clínica com internamento. A farmácia encontra-se no canto Nordeste/Sudeste do piso 0, sendo a restante área do edifício pertença da clínica com internamento.

O piso 0 da clínica divide-se em 3 alas: Nordeste, Sudeste e Sudoeste. Na ala Nordeste situam-se a receção, os espaços exclusivos para funcionários, instalações sanitárias, a lavandaria, a cozinha, uma sala de jantar e uma sala comum. Na ala Sudeste localizam-se as salas de terapia, salas de tratamentos e desinfeção, os armazéns, um posto de enfermagem, um gabinete médico e um ginásio para fisioterapia. Por fim, na ala Sudoeste encontram-se 8 quartos equipados com instalações sanitárias próprias e a rouparia. No piso 1 estão os espaços relacionados com a direção e com os serviços

administrativos. Este piso é essencialmente composto por gabinetes, um átrio, uma sala de jogos, uma sala de reuniões e instalações sanitárias.

A clínica tem uma ocupação máxima de 192 pessoas. Os respetivos perfis de utilização e outros detalhes deste edifício encontram-se no anexo A.



Figura 3.3 - Representação da clínica privada [Raimundo et. al., 2011c]

#### 3.1.4. Escola

A escola, descrita em Claro (2015), é composta por 7 blocos (A, B, C, C1, C2, D, E), que perfazem uma área útil de pavimento dos espaços climatizados de 11 246 m<sup>2</sup> e tem um pé-direito médio de 3 m. Sendo que 7 669 m<sup>2</sup> da área útil de pavimento são salas de aulas, 406 m<sup>2</sup> estão ocupados pelos balneários e 3 171 m<sup>2</sup> pelos corredores.

Os blocos A e B são constituídos por três pisos onde se encontram as salas de aulas. Nos quatro pisos do bloco C situam-se a biblioteca, o salão polivalente, a sala dos diretores de turma e a cozinha. O bloco D é apenas um piso onde funciona a sala de professores e os balneários. Por fim, o bloco E é um campo coberto usado para a prática de atividades desportivas, sem equipamentos de AVAC e que tem parte das suas fachadas parcialmente abertas ao exterior.



A escola tem uma população estudantil de 1 100 alunos e a sua planta é semelhante à da escola secundária de Avelar Brotero, localizada na cidade de Coimbra, como é possível observar na Figura 3.4. Encontram-se no Anexo A mais detalhes sobre esta escola.

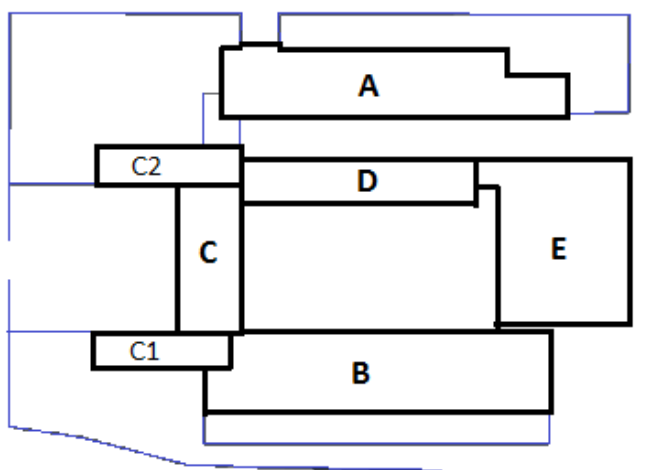


Figura 3.4 – Representação esquemática da implantação da escola [Claro, 2015]

### 3.1.5. Agência bancária

A agência bancária, descrita em Raimundo et al. (2007), situa-se no rés-de-chão de um edifício com 2 pisos sem cave, logo, a fração autónoma em estudo assenta diretamente sobre o solo. A fachada Sul do edifício está em contacto com um edifício adjacente sendo que as restantes fachadas estão em contacto com o exterior. Importante também referir que as paredes orientadas a este e oeste estão semienterradas.

A agência bancária tem uma área útil de pavimento dos espaços climatizados de 111.33 m<sup>2</sup> e tem um pé-direito médio de 2.6 m. A área útil é em grande parte ocupada pelo espaço destinado à agência, porém também tem uma de sala de reuniões, um arquivo, um espaço de circulação comum, um gabinete para o gerente, instalações sanitárias, uma sala de ATM/cofre e um hall de entrada (Figura 3.5). Este edifício tem uma ocupação máxima de doze pessoas, e os seus perfis de utilização e outros detalhes encontram-se no anexo A.

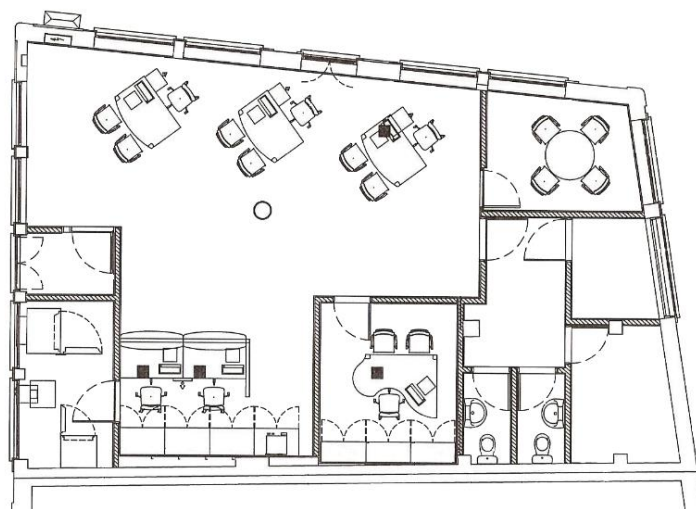


Figura 3.5 - Planta da agência bancária [Raimundo et al., 2007]

### 3.1.1. Supermercado

O supermercado, descrito em Vidigueira (2013), tem uma área útil de pavimento de 1 142 m<sup>2</sup> e um pé-direito médio de 3 m. Desta área, 1 060 m<sup>2</sup> são climatizados e 82 m<sup>2</sup> não são climatizados. A representação da respetiva planta encontra-se na Figura 3.6.

A área de pavimento divide-se em diversas secções: zona de exposição de produtos do supermercado, quatro lojas, uma cafetaria, um escritório, zona de apoio ao supermercado, que contém instalações sanitárias e vestiários, zona técnica e armazém. Este edifício tem uma área total de envidraçados de aproximadamente 98 m<sup>2</sup>.

A capacidade máxima de ocupação é de 194 pessoas, encontrando-se no Anexo A os perfis de ocupação e outros detalhes.

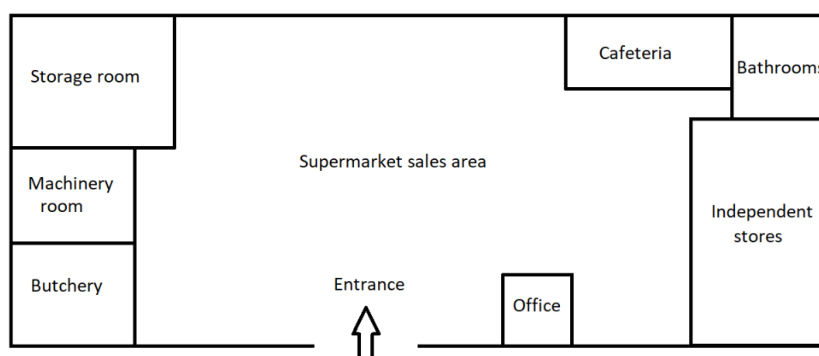


Figura 3.6 - Representação esquemática do supermercado [Vidigueira, 2013].

### 3.2. Sistemas de Climatização

Os sistemas de climatização que se encontram instalados nos edifícios dividem-se globalmente em dois tipos: sistema tipo A (para os climas quente, moderado e frio); e tipo B (para os climas muito e extremamente frio).

Para os climas quente, moderado e frio foi assumido que o sistema de climatização aplicado é um sistema do tipo chiller/bomba-de-calor por ciclo de compressão-expansão de classe A+. Pina (2021) fez um estudo em que comparou o custo de conforto térmico usando sistemas de climatização deste tipo da classe A+ com o custo do conforto térmico usando sistemas de climatização de classe A+++.

Este autor concluiu que o uso do sistema de climatização mais eficiente (classe A+++)

só compensa para os edifícios residenciais (moradia e apartamento). Para os restantes edifícios (clínica, escola, supermercado e agência bancária) constatou que, salvo raras exceções, a classe A+ é a mais vantajosa. Assim, no presente estudo foi considerado que os sistemas de climatização serão da classe energética A+ para todos os edifícios localizados em climas quentes, moderados e frios.

Na Tabela 3.1 estão indicados os valores mínimo, máximo e médio da eficiência energética sazonal para arrefecimento (*ESEER*) e para aquecimento (*ES COP*) definidos pelos regulamentos e diretivas da União Europeia para os sistemas de ar condicionado [European Commission, 2011]. Os valores médios são os que se usaram no software do SEnergEd para caracterizar os sistemas de climatização do edifício em apreço.

Tabela 3.1 – Eficiências sazonais europeias dos sistemas de ar condicionado da classe A+ [European Commission, 2011].

Eficiência de Arrefecimento	<i>ESEER</i> <sub>min</sub>	5.60
	<i>ESEER</i> <sub>max</sub>	6.10
	<i>ESEER</i> <sub>média</sub>	5.85
Eficiência de Aquecimento	<i>ES COP</i> <sub>min</sub>	4.00
	<i>ES COP</i> <sub>max</sub>	4.60
	<i>ES COP</i> <sub>média</sub>	4.30

Para os climas muito frios e extremamente frios as bombas-de-calor apresentam claras dificuldades em manter eficiências para aquecimento aceitáveis. Tendo isto em consideração é necessário considerar um sistema de climatização diferente para os edifícios nestes climas mais extremos. Assim, o sistema de climatização considerado é um sistema chiller/caldeira a gás natural sendo que para aquecimento é usado a caldeira a gás natural com uma eficiência de 95%.

Por fim, a ventilação do edifício é assegurada por unidades de tratamento de ar (UTA), como referido em Saraiva (2017), a qual é garantida por ventiladores com uma eficiência de 70%. É considerado que não existe freecooling nem recuperação de calor do ar rejeitado para o exterior.

### 3.3. Vãos Envidraçados

Os vãos envidraçados usados nos edifícios do presente estudo foram os identificados por Rebelo (2016) como os economicamente mais interessantes para os edifícios portugueses. Estes vãos são constituídos por uma janela que é protegida pelo exterior por um estore elétrico de réguas horizontais, com isolamento térmico no interior das réguas.

O trabalho desta autora consistiu em avaliar o ponto ótimo de rentabilidade económica dos envidraçados aplicados em edifícios localizados em Portugal, para isso foi avaliado o custo anual equivalente (CAE) de edifícios ao aplicar janelas com diferentes subclasses energéticas. Rebelo (2016) concluiu que as janelas da subclasse energética C- são as mais rentáveis. Estas janelas são constituídas por caixilho em alumínio com corte térmico e vidro duplo incolor. Na Tabela 3.2 é possível ver as características térmicas destas janelas.

Tabela 3.2 - Características técnicas dos envidraçados [Rebelo, 2016]

Subclasse energética	$U_{wdn}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$g_{\perp\text{vidro}}$	$g_{\perp 100}$
C-	2.465	0.786	0.05

Pina (2021), no seu estudo, dividiu o coeficiente de transmissão térmica médio dia/noite dos envidraçados para conseguir avaliar de modo mais preciso a energia térmica transmitida durante o dia e durante a noite. Assim, as características térmicas das janelas usadas no presente estudo encontram-se na Tabela 3.3. O coeficiente de transmissão térmica para o dia é  $U_d$  e o para a noite é  $U_n$ .

Tabela 3.3 - Características técnicas gerais dos envidraçados

$U_{wdn}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$U_d$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$U_n$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$g_{\perp\text{vidro}}$	$g_{\perp 100}$
2.465	3.4	1.6	0.786	0.05

### 3.4. Elementos Opacos

#### 3.4.1. Isolamentos térmicos mais utilizados na Europa

Para a realização da análise económica, energética e ambiental da aplicação de isolamento térmico aos edifícios do continente europeu é fundamental fazer a escolha acertada relativamente ao material a utilizar como isolamento térmico. Fazer uma análise detalhada dos isolamentos térmicos que se encontram no mercado de forma a escolher qual o isolamento térmico ideal é de grande importância, pois este é um grande fator no custo ambiental, energético e ambiental do edifício.

Segundo Pavel e Blagoeva (2018), a lã mineral representa 58% de todo o mercado de materiais de isolamento térmico usados na União Europeia. Em segundo lugar encontram-se os derivados de plástico (XPS, EPS, PUR, PIR), que correspondem a cerca de 41%.

A lã mineral (MW) é muito usada como isolamento térmico principalmente devido às suas excelentes propriedades térmicas. Para além disto, este material tem outras propriedades que o tornam muito vantajoso, como, por exemplo, a sua excelente resistência ao fogo e a sua boa capacidade de funcionar também como isolamento acústico.

O poliestireno expandido (EPS) é um material com cada vez mais uso como isolamento térmico dos edifícios. Este material tem excelentes propriedades térmicas, tem uma grande durabilidade, é impermeável à água e é um dos isolamentos térmicos com o custo económico mais baixo.

O poliestireno extrudido (XPS) é o material com melhores propriedades térmicas do que os dois referidos anteriormente, a sua durabilidade e a sua impermeabilidade são semelhantes às do EPS, visto que ambos são derivados de plástico. Todavia, o XPS é mais caro do que o EPS e do que a MW, sendo esta a sua grande desvantagem.

No âmbito deste estudo foram considerados os três materiais de isolamento térmico mais utilizados e mais competitivos do mercado europeu. Deste modo, os materiais que serão considerados para fazer a análise económica, energética e ambiental da aplicação de isolamento térmico aos edifícios do continente europeu são o EPS, o XPS e a MW.

### 3.4.2. Custos económico e ambiental do isolamento térmico

Com o propósito de seleccionar qual o melhor material de isolamento térmico é necessário fazer comparações relevantes entre os diversos materiais, de forma a seleccionar o melhor material de isolamento térmico. Estas comparações devem ter em conta perspetivas económica e ambiental.

Para avaliar as vertentes económica e ambiental seguiu-se a metodologia utilizada nos trabalhos de Saraiva (2017) e de Raimundo et al. (2020). Saraiva (2017) usou o conceito de Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (*CEEIT*). Este autor descreveu este conceito como sendo o custo monetário que será preciso investir em isolamento térmico de forma a reduzir as perdas térmicas de um edifício em 1 Watt por cada grau Kelvin de diferença entre as temperaturas do ar no interior e no exterior. Para o efeito utilizou a seguinte relação:

$$CEEIT = \frac{P}{U_{m\acute{a}x} - U} \quad (3.1)$$

em que  $P$  é o preço por  $m^2$  do elemento construtivo em apreço,  $U$  é o valor do seu coeficiente global de transmissão de calor e  $U_{m\acute{a}x}$  é o valor máximo que esse coeficiente pode ter. No caso de uma parede vertical da envolvente exterior  $U_{m\acute{a}x} = 5.882 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  [Saraiva, 2017; Raimundo et al., 2020]. Apresenta-se na Tabela 3.4 os valores, obtidos por Raimundo et al. (2020), do coeficiente global de transmissão de calor ( $U$ ) e do preço de compra praticado em Portugal no caso dos materiais isolantes térmicos EPS, XPS e MW, na qual é constatável que o EPS tem o preço mais baixo e que o XPS tem o preço mais alto. Por outro lado, o XPS tem as melhores propriedades térmicas em relação aos outros materiais de isolamento

térmico. O *CEEIT*, neste contexto, é calculado para compreender se o benefício das propriedades térmicas compensa o aumento de preço de compra.

Tabela 3.4 - Coeficiente global de transmissão de calor e preço em Portugal dos materiais de isolamento térmico [Raimundo et al., 2020]

Espessura [cm]	EPS		XPS		MW	
	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Preço [€/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Preço [€/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Preço [€/m <sup>2</sup> ]
1.00	2.45	0.75	2.27	2.61	2.38	1.15
2.00	1.55	1.43	1.41	5.22	1.49	2.30
4.00	0.89	3.00	0.80	10.43	0.85	4.49
6.00	0.63	4.50	0.56	15.65	0.60	6.87
8.00	0.48	5.99	0.43	20.86	0.46	9.20
10.00	0.39	7.50	0.35	26.10	0.37	11.50
12.00	0.33	9.00	0.29	31.32	0.32	13.80

Usando os valores presentes na Tabela 3.4, recorrendo à equação (3.1) e considerando uma parede vertical composta por uma única camada do material em questão, Raimundo et al. (2020) calculou o *CEEIT* e obteve o gráfico representado na Figura 3.7. Com o auxílio deste gráfico é possível concluir que o EPS tem o Custo da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (*CEEIT*) mais baixo dos três materiais de isolamento térmico. Assim, segundo a vertente económica, o EPS é claramente o material mais recomendado para usar como isolamento térmico.

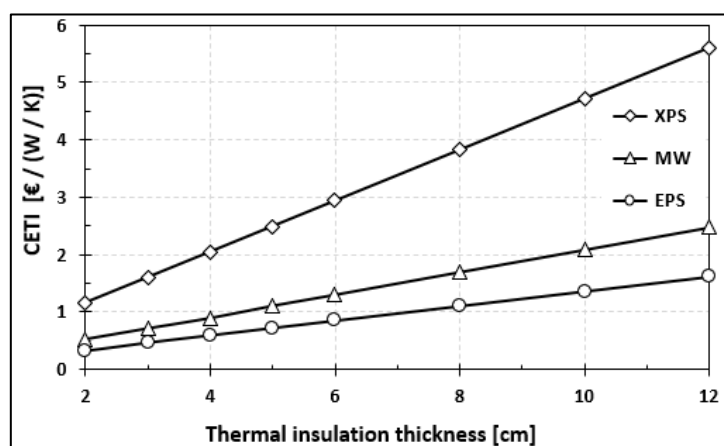


Figura 3.7 – *CEEIT* dos materiais de isolamento térmico EPS, MW e XPS [Raimundo et al., 2020]

Para a vertente ambiental é usado um conceito semelhante ao descrito por Saraiva (2017), o conceito de Custo Ambiental da Eficiência Energética do Isolamento Térmico (*CAEEIT*). Para o seu cálculo recorre-se a uma expressão equivalente à de obtenção do *CEEIT*, porém, em vez do custo monetário, é considerado um parâmetro representativo do impacto ambiental do material de isolamento térmico em questão. Assim, o *CAEEIT* representa o custo ambiental do material de isolamento térmico que é necessário aplicar para reduzir as perdas térmicas de um edifício em 1 Watt por cada grau Kelvin de diferença entre as temperaturas do ar no interior e no exterior.

O custo ambiental do material, de forma a ser realista e completo, terá de ter em consideração as emissões ou energia consumida pelos processos de extração, produção, transporte e instalação do material. Assim, o custo ambiental pode ser caracterizado alternativamente pelas emissões de gases com efeito de estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ , etc.) e através da energia embebida. Sendo a energia embebida um conceito que é possível definir de modo mais objetivo do que as emissões, foi este o custo ambiental selecionado. A relação usada para calcular o *CAEEIT* é, assim, a seguinte:

$$CAEEIT = \frac{E_{embebida}}{U_{m\acute{a}x} - U} \quad (3.2)$$

Para obter os valores da energia embebida para os materiais de isolamento térmico selecionados foi consultado o estudo de Anastaselos et al. (2009). Neste estudo é feita uma avaliação económica, energética e ambiental aos materiais usados no isolamento térmico. Para a realização do seu estudo os autores tabelaram as emissões de vários gases com efeito de estufa e a energia embebida dos diversos materiais usados nas soluções construtivas opacas de um edifício. Estes valores tabelados têm em consideração todos os processos envolvidos (extração, produção, transporte e instalação do material). Os valores retirados da publicação de Anastaselos et al. (2009) para a energia embebida dos materiais de isolamento térmico são: 80.79 MJ/kg para o EPS, 87.10 MJ/kg para o XPS e 24.61 MJ/kg para a MW. Todavia, para efeitos do presente estudo, é necessário fazer a conversão dos valores anteriores para MJ/m<sup>2</sup> por cada centímetro de espessura de material de isolamento térmico.

Assim, recorreu-se à folha de cálculo CalProTerm [Raimundo, 2014] para obter os valores das densidades dos materiais de isolamento térmico os quais são 14 kg/m<sup>3</sup> para o EPS, 32 kg/m<sup>3</sup> para o XPS e 65 kg/m<sup>3</sup> para o MW. Apresentam-se na Tabela 3.5 os valores



da massa específica, da energia embebida por kg de material e da energia embebida numa placa desse material com 1 m<sup>2</sup> de área e um centímetro (cm) de espessura.

Tabela 3.5 – Massa específica e energia embebida dos materiais de isolamento térmico.

Material isolante	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Energia embebida [MJ/kg]	Energia embebida [MJ/(m <sup>2</sup> .cm)]
MW	65	24.61	16.00
XPS	32	87.10	27.87
EPS	14	80.76	11.30

A Tabela 3.5 revela que o EPS tem uma energia embebida por quilograma semelhante à do XPS, contudo, devido à sua baixa densidade, este é o material que tem menos energia embebida no caso de uma placa com um metro quadrado de área e um centímetro de espessura. Tendo em consideração os valores da energia embebida por cada centímetro de espessura, é calculada a energia embebida para as várias espessuras. Estes valores encontram-se na Tabela 3.6. Usando agora a relação representada pela equação (3.2) e os valores da Tabela 3.6 é possível calcular o valor do *CAEEIT*.

Tabela 3.6 - Coeficiente global de transmissão de calor e energia embebida, em função da espessura dos materiais de isolamento térmico considerados.

Espessura [cm]	EPS		XPS		MW	
	<i>U</i> [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Energia embebida [MJ/m <sup>2</sup> ]	<i>U</i> [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Energia embebida [MJ/m <sup>2</sup> ]	<i>U</i> [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Energia embebida [MJ/m <sup>2</sup> ]
1.00	2.45	11.31	2.27	27.87	2.38	16.00
2.00	1.55	22.61	1.41	55.74	1.49	31.99
4.00	0.89	45.23	0.80	111.49	0.85	63.99
6.00	0.63	67.84	0.56	167.23	0.60	95.98
8.00	0.48	90.45	0.43	222.98	0.46	127.97
10.00	0.39	113.06	0.35	278.72	0.37	159.97
12.00	0.33	135.68	0.29	334.46	0.32	191.96

No gráfico da Figura 3.8 estão os resultados obtidos para o *CAEEIT*. Ao analisar estes resultados facilmente se percebe que o EPS tem um custo ambiental mais baixo que os restantes materiais em apreço. Assim, apesar de as propriedades térmicas do EPS não serem as melhores, o aumento do custo ambiental que surge como consequência da escolha dos outros materiais de isolamento térmico em estudo não compensa.

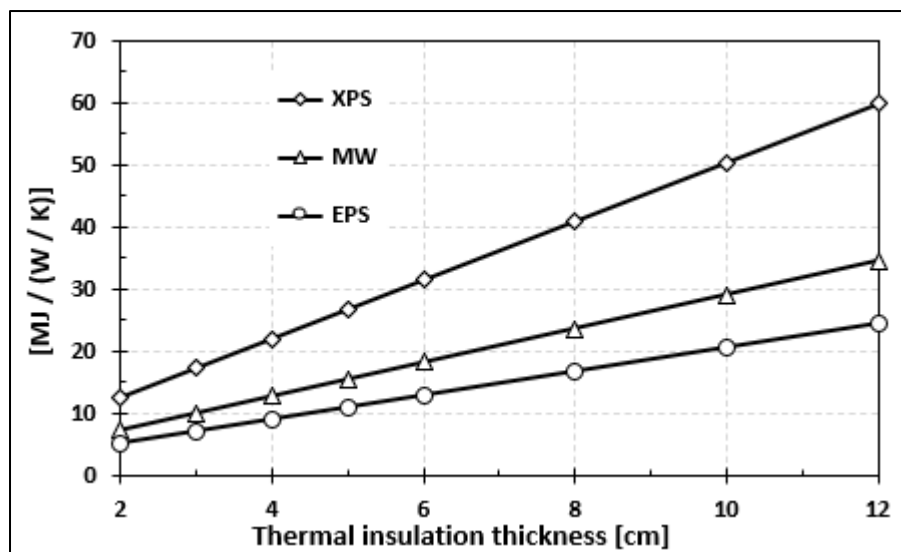


Figura 3.8 - CAEEIT para materiais de isolamento térmico considerados.

Importa realçar as semelhanças entre o gráfico do CEEIT, Figura 3.7, e o gráfico do CAEEIT, Figura 3.8. Em ambos o EPS é claramente o mais eficiente, seguido do MW, sendo que menos eficiente é o XPS. Deste modo, conclui-se que o EPS é o melhor material de isolamento térmico tendo em consideração as perspetivas económica, energética e ambiental. Logo, entre os três materiais analisados (EPS, XPS e MW), o EPS é, simultaneamente em termos económicos e em termos ambientais, o material mais indicado para o isolamento térmico dos elementos opacos da envolvente dos edifícios.

### 3.4.3. Soluções construtivas opacas sem isolamento térmico

Para o presente estudo, de modo a realizar uma análise comparativa, é considerado que as soluções construtivas opacas base (ou seja, sem incorporação de isolamento térmico) são as mesmas para todos os edifícios e todos os climas. A descrição dos elementos construtivos base da envolvente opaca exterior encontram-se na Tabela 3.7. A descrição dos elementos construtivos base da envolvente opaca interior, de compartimentação interior e dos elementos em contacto com o solo encontra-se no Anexo B.

Apresentam-se na Tabela 3.8 os coeficientes globais de transmissão de calor ( $U$ ) e as massas superficiais úteis ( $M_{si}$ ) dos elementos construtivos base da envolvente opaca exterior. Estes valores foram obtidos com auxílio da folha de cálculo CalProTerm [Raimundo, 2014]. Os coeficientes globais de transmissão de calor e as massas superficiais úteis dos elementos

construtivos base da envolvente opaca interior, dos elementos de compartimentação interior e dos elementos em contacto com o solo encontram-se no Anexo B.

Tabela 3.7 - Elementos construtivos base da Envolvente opaca exterior [Saraiva, 2017]

Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Parede exterior	38	Reboco tradicional com 2 cm, Tijolo furado normal de 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional com 2cm.
Pilar/Viga exterior	38	Reboco tradicional com 2 cm, Betão armado (volume de ferro < 1%) de inertes com 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional com 2 cm.
Caixa de estore	35	Reboco tradicional com 2 cm, Caixa de estore com 31 cm de Poliestireno expandido moldado (EPS), Reboco tradicional com 2 cm.
Pavimento sobre o exterior	55	Reboco tradicional com 2cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2cm.
Cobertura plana sob o exterior	33.3	Seixo (inerte) calcário com 4 cm, Feltro betuminoso com 0.3 cm, Betonilha com 4 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 23 cm (cerâmico 1 furo de 20 cm + 3 cm de betão), Reboco tradicional com 2cm.

Tabela 3.8 - Propriedades dos elementos construtivos base da Envolvente opaca exterior

Elementos construtivos	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
Parede exterior	150	0.88
Pilar/viga exterior	150	1.52
Caixa de estore	38	1.01
Pavimento exterior	150	1.17
Cobertura exterior	150	2.40

#### 3.4.4. Isolamento térmico das soluções construtivas opacas

Para efeitos do presente estudo foi considerado que o isolamento térmico se encontra aplicado nas soluções construtivas opacas pela face exterior. Esta técnica é vantajosa, visto que permite realizar a correção das pontes térmicas planas e lineares, influenciando assim o

comportamento energético do edifício. O isolamento pela face exterior é energeticamente mais eficaz do que as técnicas alternativas, isolamento pela face interior e isolamento no meio da solução construtiva, mas é também substancialmente mais oneroso [Saraiva, 2017].

A aplicação na face exterior facilita a aplicação de isolamento térmico em edifícios em restauro ou em reabilitação. A reabilitação de edifícios é altamente relevante no panorama da construção no continente europeu dado que esta é normalmente mais sustentável e conduz a reduzidos impactos ambientais quando comparada com a construção de raiz.

A aplicação do isolamento térmico pelo exterior é diferente conforme a solução construtiva em questão [Saraiva, 2017]. Para as paredes, pilares, vigas e caixas de estore da envolvente opaca exterior usa-se normalmente uma técnica conhecida por sistema ETICS, em que o material isolante é aplicado pela face exterior e protegido do ambiente exterior através da aplicação de uma massa/tinta apropriada. Para os pavimentos térreos a aplicação é feita diretamente pelo exterior não sendo necessário acabamento. Nos pavimentos sobre espaços não úteis é colocado um teto falso resguardado por 1 cm de gesso cartonado com o objetivo de proteger o material isolamento térmico. Nas coberturas exteriores o isolamento térmico é aplicado diretamente entre o seixo calcário e o feltro betuminoso. Por fim, as coberturas sob espaços não úteis são isoladas entre o pavimento e a laje.

Relativamente ao preço do material de isolamento térmico, Saraiva (2017) identificou que o preço médio do EPS em Portugal é de 0.91 €/m<sup>2</sup> por centímetro de espessura. Para efeitos do presente estudo foi admitido que este preço varia linearmente com a espessura e que é igual para todos os países em estudo. As espessuras de isolamento térmico testadas foram de 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 20 centímetros. Todavia, para os climas mais severos (Varsóvia e Reykjavik) foi necessário considerar espessuras adicionais sendo estas de 25, 30, 35 e 40 centímetros.

O custo da aplicação do isolamento térmico nas soluções construtivas é a soma entre o custo do material adicional característico do sistema de aplicação e o custo de mão-de-obra. Este custo varia conforme o sistema de aplicação, isto é, nos elementos em que é utilizado o sistema ETICS (paredes, pilares, vigas e caixas de estore da envolvente exterior) o custo é superior aos elementos em que é usado um sistema alternativo (elementos da envolvente interior, pavimentos exteriores e térreos e coberturas exteriores).

No entanto, os custos de aplicação do isolamento térmico obtidos por Saraiva (2017) só são válidos para edifícios situados em Portugal, assim sendo foi necessário obter uma

relação que permita relacionar os preços da sua aplicação de Portugal com os dos restantes países em estudo. Pina (2021), perante uma situação semelhante, optou por usar o ordenado mínimo de cada país para relacionar o custo de mão-de-obra em Portugal com o seu custo nos restantes países em apreço. No presente estudo foi usada uma abordagem similar, porém foi considerado que o custo de aplicação total (custo de material adicional + custo de mão-de-obra) está diretamente relacionado com o ordenado mínimo do país em questão.

Os ordenados mínimos para os países em estudo, presentes na Tabela 3.9, foram retirados do site do Eurostat [Eurostat, 2021], encontrando-se normalizados para uma base de 12 ordenados mensais em cada ano.

Tabela 3.9 - Ordenados mínimos por país para o ano 2020 [Eurostat, 2021].

País	Ordenado mínimo [€]
Portugal	740.83
Espanha	1 050.00
Polónia	610.79
Islândia	2 070.00

A partir dos valores dos ordenados mínimos, o preço total das soluções construtivas para cada país ( $PT_R$ ) foi obtido através da seguinte relação:

$$PT_R = P_{IT} \times E_{IT} + (P_{MA} + P_{MO}) \times \frac{OM_R}{OM_P} \quad (3.3)$$

em que  $P_{IT}$  é o preço do material de isolamento térmico por  $m^2$  e por centímetro de espessura,  $E_{IT}$  é a espessura de isolamento em centímetros,  $P_{MA}$  é o preço do material adicional necessário à correta aplicação de isolamento térmico para Portugal por  $m^2$ ,  $P_{MO}$  é o preço de mão-de-obra para Portugal,  $OM_R$  é ordenado mínimo do país que se pretende obter o preço da solução construtiva e  $OM_P$  é o ordenado mínimo em Portugal no ano 2020, o qual foi tomado como referência.

No presente estudo consideram-se as mesmas soluções construtivas base para todos os edifícios e situações climáticas. No caso dos elementos opacos, testa-se a influência da aplicação de várias espessuras de poliestireno expandido (EPS) aplicadas pela face exterior. Tendo em conta que nos objetivos deste trabalho não está incluída a análise do impacto ambiental dos edifícios, mas sim da aplicação de isolamento térmico aos seus elementos

opacos, é viável considerar nula a energia embebida nos edifícios no caso das suas soluções construtivas opacas não possuírem isolamento térmico. Os valores da energia embebida em função da espessura para o EPS encontram-se na Tabela 3.6, contudo, de modo a inserir os valores na versão 601 do software SEnergyEd foi necessário fazer a conversão dos valores anteriores para kWh/m<sup>2</sup>.

Na Tabela 3.10 apresentam-se os custos para os diferentes casos considerados e o valor da energia embebida em função da espessura de isolamento térmico para a parede exterior. No Anexo C encontram-se Tabelas com os custos e com a energia embebida, em função da espessura de isolamento térmico aplicado, para as restantes soluções construtivas. Importa referir que o preço da solução construtiva é nulo quando não existe isolamento térmico aplicado porque o custo do material isolante térmico e o custo correspondente à sua aplicação nas soluções construtivas opacas são os únicos custos associados à construção da solução construtiva.

Tabela 3.10 – Custos totais e energia embebida para a parede exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> . K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.54	30.88	42.62	25.94	81.38	9.42
4	150	0.48	31.79	43.53	26.85	82.29	12.56
5	150	0.43	32.70	44.44	27.76	83.20	15.70
6	150	0.39	33.61	45.35	28.67	84.11	18.84
8	150	0.33	35.43	47.17	30.49	85.93	25.12
10	150	0.28	37.25	48.99	32.31	87.75	31.41
12	150	0.25	39.07	50.81	34.13	89.57	37.69
14	150	0.22	40.89	52.63	35.95	91.39	43.97
16	150	0.20	42.71	54.45	37.77	93.21	50.25
20	150	0.17	46.35	58.09	41.41	96.85	62.81
25	150	0.14	50.90	62.64	45.96	101.40	78.52
30	150	0.12	55.45	67.19	50.51	105.95	94.22
35	150	0.11	60.00	71.74	55.06	110.50	109.92
40	150	0.09	64.55	76.29	59.61	115.05	125.63

### 3.5. Parâmetros económico-financeiros

Para definir os parâmetros económico-financeiros a considerar no presente estudo seguiu-se, sempre que viável, os pressupostos e os valores utilizados por Raimundo et al. (2020).

Raimundo et al. (2020) consideraram um período de análise económica de 50 anos visto que este é o tempo estimado até que o edifício precise de uma intervenção profunda nas suas soluções construtivas. Os custos associados a intervenções de manutenção dos elementos opacos do edifício são estimados como sendo de 1%/ano do custo inicial de construção dessa solução construtiva.

A avaliação económica assenta numa análise a preços constantes com uma taxa de atualização igual à taxa média de inflação. Para efeitos do presente estudo assumiu-se que estas taxas são de 5%/ano. Estes valores são superiores aos assumidos por Raimundo et al. (2020), em consequência da inflação que se tem verificado no continente europeu no decurso do primeiro semestre de 2022 (altura em que foram realizados os cálculos relativos a este trabalho).

O preço da energia para edifícios residenciais e para edifícios de serviços e comércio apresentam-se na Tabela 3.11, os quais foram retirados do site do Eurostat [Eurostat, 2022a; Eurostat, 2022b]. Os valores apresentados nesta tabela não incluem o IVA e são relativos ao 2º semestre do ano 2021, que era o último semestre com valores disponibilizados neste site na altura em que foram realizados os cálculos relativos a este trabalho (1º semestre de 2022).

Tabela 3.11 - Custo de energia (em €/kWh) no 2º semestre de 2021 para os casos em estudo [Eurostat, 2022] (valores sem IVA).

Edifício	País	Eletricidade [€/kWh]	Gás natural [€/kWh]
Residencial	Portugal	0.181	0.079
	Espanha	0.252	0.111
	Polonia	0.128	0.040
	Islândia	0.112	0.112
Serviços e comércio	Portugal	0.119	0.058
	Espanha	0.146	0.057
	Polonia	0.110	0.075
	Islândia	0.072	0.072

De forma a definir os parâmetros económico-financeiros para cada edifício é fundamental estabelecer a sua tipologia de uso e os seus titulares. Deste modo, o apartamento e a moradia são considerados edifícios residenciais cujos titulares são pessoas singulares. A escola, o supermercado, a clínica e a agência bancária são admitidos como sendo edifícios de serviços e comércio pertencentes a entidades empresariais.

Em termos de impostos foi importante considerar 3 tipos: imposto municipal sobre imóveis (IMI), imposto sobre o valor acrescentado (IVA) e poupança fiscal anual associada aos gastos em cada ano e ao investimento inicial com o edifício em questão.

O imposto municipal sobre imóveis (IMI) é calculado aplicando uma taxa de 0.4% ao valor fiscal do edifício, o qual é atribuído ao edifício pela autoridade tributária. O valor fiscal do edifício depende do tipo de uso e não do tipo de proprietário. No presente estudo o valor do imposto municipal sobre imóveis foi assumido igual para Portugal, Espanha, Polónia e Islândia. Esta simplificação tem impacto residual nos resultados desta análise, visto o valor a pagar de IMI não estar relacionado com a espessura de isolamento térmico incluída nos elementos opacos.

O imposto sobre o valor acrescentado (IVA) é aplicado a vendas e a prestações de serviços. Os investimentos e os gastos com os edifícios estão sujeitos à taxa máxima de IVA em vigor, a qual é de 21% em Espanha, de 23% em Portugal e na Polónia e de 24% na Islândia.

Os edifícios residenciais (apartamento e moradia), à custa dos seus titulares serem assumidos como consumidores finais, não conseguem recuperar o valor de IVA que pagaram. Logo, o valor do IVA deve ser adicionado a todos os investimentos e gastos.

As atividades praticadas pela escola e pela clínica estão isentas de IVA. Visto que o IVA não é coletado pela prestação de serviços ou pela venda de produtos, também não existe a possibilidade de recuperação deste imposto. Assim, o IVA tem de ser adicionado a todos os investimentos e gastos relacionados com estes edifícios.

Dado que o preço dos produtos vendidos nos supermercados tem IVA incluído, o supermercado tem a possibilidade de recuperar o IVA que pagou. Assim, a entidade responsável pela exploração do supermercado tem a capacidade de recuperar o IVA que paga. Deste modo, para efeitos desta análise, os investimentos e os gastos relativos ao supermercado no incluem o valor do IVA. O mesmo se verifica para a situação da agência bancária.



A poupança fiscal anual é a quantia monetária de impostos que uma entidade consegue diminuir ao valor a pagar pelos rendimentos da sua atividade devido aos investimentos e aos gastos com o edifício. As entidades empresariais pagam imposto sobre o lucro obtido, logo têm a oportunidade de realizar uma poupança fiscal à custa do investimento inicial e dos gastos com o edifício, caso estes estejam associados à sua atividade. Como se assumiu que a escola, a clínica, a agência bancária e o supermercado são explorados por entidades empresariais, na análise económica destes edifícios é considerada a existência de uma poupança fiscal associada ao investimento inicial e aos gastos com o edifício. As pessoas singulares pagam imposto sobre o seu rendimento anual, pelo que não está associada qualquer poupança fiscal devida aos gastos com os edifícios. Assim, no caso dos edifícios residenciais não existe uma poupança fiscal associada ao investimento inicial e aos gastos com o edifício.

### **3.6. Condições Climáticas**

As condições climáticas no continente europeu são altamente diversificadas. Estas influenciam imensamente o comportamento energético dos edifícios pelo que para o efeito do presente estudo é crucial considerar esta diversidade. De modo a caracterizar os diversos climas do continente europeu foi utilizado o conceito de graus-dias.

Giuseppina et al. (2015) definiram o conceito de graus-dias como sendo um indicador climático usado para fazer a análise da influência dos climas no consumo de energia pelos edifícios. O número de graus-dias é obtido fazendo as somas das diferenças entre a temperatura no exterior e a temperatura de referência ao longo de um período de duração específico. Fundamentalmente, um clima com elevado número de graus-dias de arrefecimento apresenta elevadas necessidades de energia para arrefecimento, assim, um clima é tão mais quente quanto mais graus-dias de arrefecimento tiver.

Para Portugal, o “Manual SCE”, publicado através do Despacho nº 6476-H/2021, de 1 de julho [DGEG, 2021], considera o número de graus-dias para caracterizar a estação de aquecimento (inverno) e considera a temperatura exterior média para caracterizar a estação de arrefecimento (verão). Porém, tal como exposto por Pina (2021), a temperatura exterior média da estação de arrefecimento não é o indicador mais adequado para representar o clima de uma região.

Pina (2021) considerou mais correto utilizar o número de graus-dia de arrefecimento ( $GD_{ar}$ ) e o número de Watts-hora-dia ( $WhD_{ar}$ ) para representar o clima durante a estação de arrefecimento. O valor de Watts-hora-dia é pertinente dado que a necessidade de arrefecimento surge do sobreaquecimento que acontece no interior de edifícios devido à entrada de radiação solar através dos envidraçados e aos ganhos térmicos internos. Este valor é obtido através da relação usada para calcular os graus-dias, porém usa-se a radiação global horizontal e o valor de radiação base que serve como referência, valor esse que o autor assumiu como  $400 \text{ Wh/m}^2$ .

Para efeitos deste trabalho, o número de graus-dia/ano para aquecimento ( $GD_{aq}$ ) e para arrefecimento ( $GD_{ar}$ ) são obtidos usando as seguintes relações [Pina, 2021]:

$$GD_{aq} = \frac{\sum_{i=1}^{n=8760} \max[0; (T_b - T_e)]}{24} \quad (3.4)$$

$$GD_{ar} = \frac{\sum_{i=1}^{n=8760} \max[0; (T_e - T_b)]}{24} \quad (3.5)$$

em que  $T_b$  é o valor base assumido como referência para a temperatura do ar no interior do edifício ( $18^\circ\text{C}$  para a função aquecimento e  $24^\circ\text{C}$  para a de arrefecimento) e  $T_e$  é a temperatura exterior em cada uma das 8 760 horas do ano. Os valores de  $GD_{aq}$ , de  $GD_{ar}$  e de  $WhD_{ar}$  foram obtidos recorrendo aos ficheiros climáticos associados ao software SEnegEd.

Tendo estabelecidos os critérios de caracterização das estações de aquecimento e arrefecimento procedeu-se à seleção de 5 climas que caracterizam os diversos climas do continente europeu. Sendo o presente estudo um trabalho de continuação, optou-se por seleccionar climas considerados em estudos anteriores [Pina, 2021]. O autor categorizou os climas como quente, moderado, frio, muito frio e extremamente frio, admitindo os valores de 1 000, 1 250, 2 500, 3 750, 5 000 graus-dia/ano de aquecimento e de 200, 150, 100, 50, 0 graus-dia/ano de arrefecimento, respetivamente. A Tabela 3.12 contém a informação referente à latitude, graus-dia de aquecimento ( $GD_{aq}$ ), graus-dia de arrefecimento ( $GD_{ar}$ ) e Watts-hora-dia de arrefecimento ( $WhD_{ar}$ ) para cada um dos climas considerados neste estudo.

Na Figura 3.9 encontram-se representadas as cidades seleccionadas e a sua localização no mapa do continente europeu.

Tabela 3.12 - Dados climáticos para as cidades em estudo [Pina, 2021].

Tipo de Clima	Cidade	Latitude [ ° norte]	$GD_{aq}$ [°C.dia/ano]	$GD_{ar}$ [°C.dia/ano]	$WhD_{ar}$ [Wh.dia/ano]
Quente	Málaga	36.72	906	202	20 810
Moderado	Lisboa	38.73	1 254	142	19 134
Frio	Valladolid	41.66	2 565	126	17 061
Muito frio	Varsóvia	53.23	3 697	23	6 187
Extremamente frio	Reykjavik	64.14	4 917	0	2 680

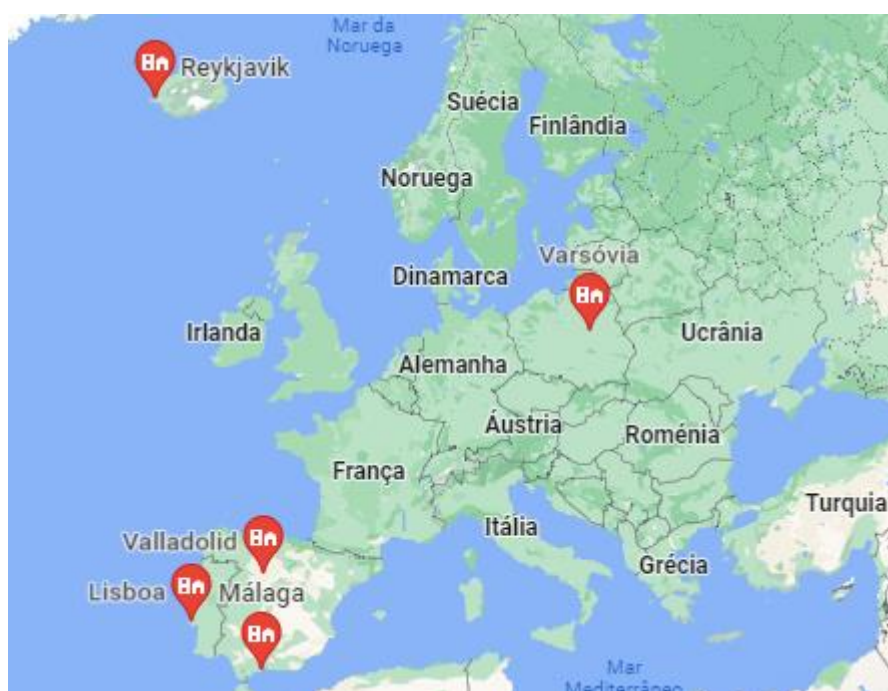


Figura 3.9 - Mapa europeu com as cidades selecionadas [Google Maps, 2022].

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo apresenta-se e discute-se a influência que o isolamento térmico tem nos parâmetros energéticos, económicos e ambientais dos edifícios localizados no continente europeu. De modo a representar tanto o edificado do continente europeu como a diversidade de condições climáticas foram selecionadas 6 tipologias de edifícios e 5 climas com características distintas. As tipologias de edifício selecionadas são: apartamento, moradia, clínica, escola, supermercado e agência bancária. As condições climáticas consideradas dividem-se em clima quente (Málaga, Espanha), moderado (Lisboa, Portugal), frio (Valladolid, Espanha), muito frio (Varsóvia, Polónia) e extremamente frio (Reykjavik, Islândia). Foram avaliadas 10 espessuras de isolamento térmico (EPS) aplicado às soluções construtivas pelo exterior. Para Varsóvia e Reykjavik foi necessário considerar espessuras adicionais. Para obter os resultados apresentados no presente capítulo usou-se a versão “melhorada” do software SEnergEd [Raimundo, 2021], como ferramenta de cálculo para a realização da simulação do comportamento energético, económico e ambiental do ciclo de vida dos edifícios. Para o efeito foi necessário realizar 360 simulações.

Os parâmetros energéticos foram definidos através do custo energético do conforto térmico, que representa a quantidade de energia necessária para manter um espaço em condições de conforto térmico. Este custo é caracterizado através do consumo de energia primária por parte dos equipamentos de AVAC, pois é o único que depende da qualidade das soluções construtivas. Ao analisar a Figura 3.9 é expectável que, do posto de vista energético, as necessidades de energia estejam fortemente relacionadas com a severidade do clima e que estas sejam altamente influenciadas com a aplicação de isolamento térmico. Adicionalmente, à semelhança do constatado no estudo de Pina (2021), espera-se que, com exceção do supermercado, as necessidades de energia para aquecimento sejam significativamente superiores às de arrefecimento.

A vertente económica é analisada através do custo económico do conforto térmico, que representa a quantia monetária que é necessário gastar para obter condições de conforto térmico no interior do edifício. O software SEnergEd [Raimundo, 2021] calcula o custo anual equivalente do ciclo de vida completo do edifício. Todavia, de modo a facilitar a análise da influência da aplicação de isolamento térmico nos parâmetros económicos achou-se mais pertinente considerar apenas o custo anual do conforto térmico. Este custo é, de

forma simplificada, a soma dos gastos anuais em energia para aquecimento e arrefecimento com a quantia despendida no investimento realizado na aplicação de isolamento térmico às soluções construtivas opacas do edifício. O preço da energia, os parâmetros económico-financeiros e o custo de aplicação variam conforme a localização do edifício. Deste modo, é expectável que estes fatores, aliados à tipologia de edifício, às condições climáticas e à qualidade das soluções construtivas, tenham grande influência no custo económico do conforto térmico.

O impacto ambiental de assegurar condições de conforto térmico no interior dos edifícios é avaliado recorrendo ao conceito de “custo anual ambiental do conforto térmico”. Neste trabalho, este custo é representado através das emissões anuais equivalentes de CO<sub>2</sub>, as quais ocorrem durante o funcionamento do edifício, mas também durante a fase de construção do mesmo. As emissões de CO<sub>2</sub> associadas à fase de construção foram contabilizadas a partir do consumo de energia relativo à extração, fabrico, transporte e aplicação do material de isolamento térmico. Os impactos ambientais provocados pelos restantes elementos construtivos não são considerados visto que estes não variam em função da espessura de isolamento térmico aplicado. Os impactos provocados pela fase de exploração do edifício foram definidos através das emissões de CO<sub>2</sub> que surgem dos consumos de energia pelos equipamentos AVAC instalados, para as funções de aquecimento e de arrefecimento.

#### **4.1. Custo Energético do Conforto Térmico**

Apresentam-se na Figura 4.1 gráficos com os resultados para o custo energético do conforto térmico, para as diversas tipologias de edifício quando localizadas nas condições climáticas consideradas. No Anexo D encontram-se tabelas com os valores que auxiliaram na realização destes gráficos.

Os resultados apresentados na Figura 4.1 revelam que a aplicação de isolamento térmico nas soluções construtivas opacas da envolvente exterior dos edifícios é uma forma eficiente de diminuir o consumo de energia primária por parte dos equipamentos AVAC. Esta diminuição no consumo de energia conduz a uma diminuição do custo energético do conforto térmico.

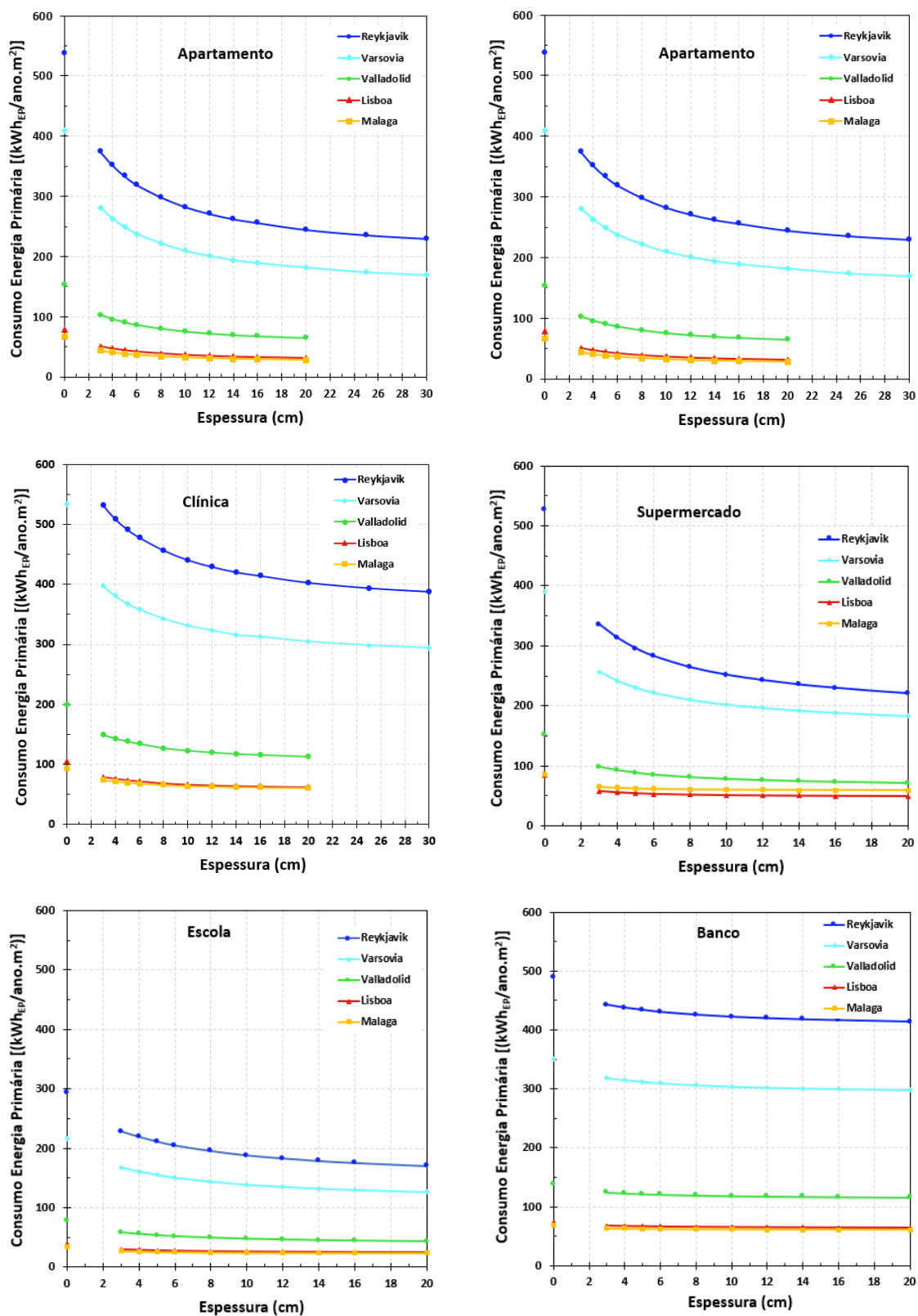


Figura 4.1 - Consumo anual de energia primária pelos edifícios, por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Tal como era esperado, o consumo de energia primária tem uma evolução proporcional dos climas mais moderados para os mais severos. Num panorama geral, é visível que o custo energético do conforto térmico é grandemente influenciado pela espessura de isolamento térmico aplicado. Esta influência é mais significativa para os climas severos, nomeadamente devido às elevadas necessidades de energia para aquecimento características destas regiões. Importa realçar que o sistema de AVAC considerado para climas severos (Varsóvia e Reykjavik) tem uma eficiência energética significativamente mais baixa do que o assumido para climas moderados (Málaga, Lisboa e Valladolid). Esta desigualdade na eficiência dos equipamentos amplia a diferença nos consumos de energia primária entre os diversos climas.

Os edifícios localizados em Lisboa e em Málaga apresentam consumos de energia primária muito semelhantes. Em todas as tipologias em estudo, com exceção do supermercado, o consumo de energia primária em Lisboa é ligeiramente superior ao consumo de energia em Málaga. O supermercado, devido às suas elevadas cargas térmicas internas, tem elevadas necessidades de arrefecimento, o que leva a que o seu consumo de energia primária em climas quentes seja superior ao consumo em climas moderados.

Os edifícios residenciais, à conta da sua ocupação permanente, possuem custos energéticos do conforto térmico elevados. A moradia apresenta, para todos os climas respetivamente, consumos de energia primária superiores ao apartamento sendo esta diferença proporcional à severidade do clima, quanto mais severo o clima maior é a diferença entre os consumos destas duas tipologias. Adicionalmente, para a situação de o edifício não se encontrar isolado termicamente, a moradia é a tipologia que apresenta maiores custos energéticos do conforto térmico. A sua ocupação permanente e as suas baixas cargas térmicas internas são fatores que mais contribuem para este facto. Em ambos os edifícios residenciais a aplicação de isolamento térmico é uma forma extremamente eficaz de reduzir os custos energéticos. Estes edifícios são as tipologias onde o aumento da espessura de EPS tem maior impacto sobre o consumo de energia para aquecimento e para arrefecimento.

A clínica, devido ao seu perfil de ocupação, pode ser comparada com as tipologias residenciais. Repare-se que para o caso em que este edifício não é isolado termicamente, ele apresenta custos energéticos inferiores à moradia e superiores ao apartamento, todavia, esta é a tipologia de serviços e comércio com custos energéticos mais elevados. Adicionalmente, a aplicação de isolamento térmico na clínica não é tão eficaz a reduzir o consumo de energia primária como nos edifícios residenciais. Para os casos em que os edifícios se encontram

isolados termicamente, a clínica é o edifício com ocupação permanente com custos energéticos mais elevados.

A agência bancária é a tipologia em que a aplicação de isolamento térmico é menos vantajosa em termos energéticos. A aplicação de isolamento térmico aos elementos opacos deste edifício leva a uma redução do custo energético do conforto térmico para todos os climas em estudo, porém, para os climas menos severos (Málaga, Lisboa e Valladolid) essa redução é muito pouco significativa. Adicionalmente, a clínica e a agência bancária têm custos energéticos muito semelhantes para os casos em que os edifícios se encontram isolados termicamente com 20 cm de EPS. Por outro lado, visto que para a situação de o edifício não se encontrar isolado a clínica tem custos consideravelmente mais altos que a agência bancária. Conclui-se assim que a aplicação de isolamento térmico é energeticamente mais benéfica para a clínica do que para a agência bancária.

O supermercado é um edifício de altas cargas térmicas internas, sendo a tipologia de uso com maiores necessidades de energia para arrefecimento para todos os climas em estudo. Assim, as necessidades de energia para arrefecimento são consideravelmente superiores às necessidades de energia para aquecimento quando esta tipologia se situa em Málaga ou em Lisboa. O aumento da espessura de EPS aplicado amplia essa diferença. Adicionalmente, em Varsóvia e Reykjavik as necessidades de energia para aquecimento mantêm-se elevadas, muito á custa da severidade do clima, mantendo o custo energético em níveis elevados. Nestes climas, a aplicação de isolamento térmico mostrou-se uma forma altamente eficiente de diminuir o custo energético do conforto térmico.

A escola, devido ao seu elevado número de ocupantes e ao seu período de funcionamento diurno, apresenta baixas necessidades de energia para aquecimento e e para arrefecimento, sendo estas últimas significativas apenas em Málaga e em Lisboa. Este comportamento energético influencia grandemente o custo, fazendo da escola a tipologia com menores custos energéticos do conforto térmico em todas as situações consideradas no presente estudo. À semelhança dos edifícios anteriores, a aplicação de isolamento térmico é especialmente vantajosa quando esta tipologia de edifício se situa em Varsóvia ou em Reykjavik.

Os resultados discutidos na presente secção permitiram concluir que o custo energético do conforto térmico está fortemente relacionado com a tipologia de edifício, as condições climáticas e a espessura de EPS aplicado nas soluções construtivas opacas da envolvente



exterior dos edifícios. A aplicação de isolamento térmico levou a uma diminuição do custo de conforto térmico para todos os casos considerados, sendo esta diminuição proporcional ao decréscimo da severidade do clima. Em termos gerais, as tipologias com ocupação permanente são as que mais beneficiam energeticamente com a aplicação de isolamento térmico. A escola é a tipologia que apresenta custos energéticos mais baixos para todas as condições climáticas em análise.

## 4.2. Custo Económico do Conforto Térmico

A Tabela 4.1 contém a espessura ótima de EPS (em centímetros) do ponto de vista económico, para todos os casos considerados no presente estudo. Para identificar as espessuras economicamente ótimas recorreu-se aos gráficos da Figura 4.2 e os valores que figuram nas tabelas do Anexo D.

Tabela 4.1 - Espessura de EPS economicamente ótima

	Málaga	Lisboa	Valladolid	Varsóvia	Reykjavik
Apartamento	5	5	10	12	25
Moradia	8	8	14	16	25
Clínica	0	0	6	14	20
Escola	0	0	0	10	16
Supermercado	0	0	6	14	16
Banco	0	0	0	6	0

Apresentam-se na Figura 4.2 os resultados obtidos para o custo económico do conforto térmico, para as diversas tipologias de edifício e condições climáticas. No Anexo D encontram-se tabelas com os valores utilizados na realização destes gráficos.

Em termos gerais, a espessura de EPS economicamente ótima aumenta com a severidade do clima para todas as tipologias com exceção da agência bancária. As elevadas necessidades de energia podem ser minimizadas através da aplicação de isolamento térmico nas soluções construtivas opacas. Porém, existe um balanço entre os gastos com a energia e os custos relativos à aplicação de isolamento térmico. Deste modo, a espessura ótima de EPS é a espessura que minimiza os gastos com a energia sem provocar um aumento do investimento associado à aplicação de isolamento térmico nas soluções construtivas opacas da envolvente dos edifícios.

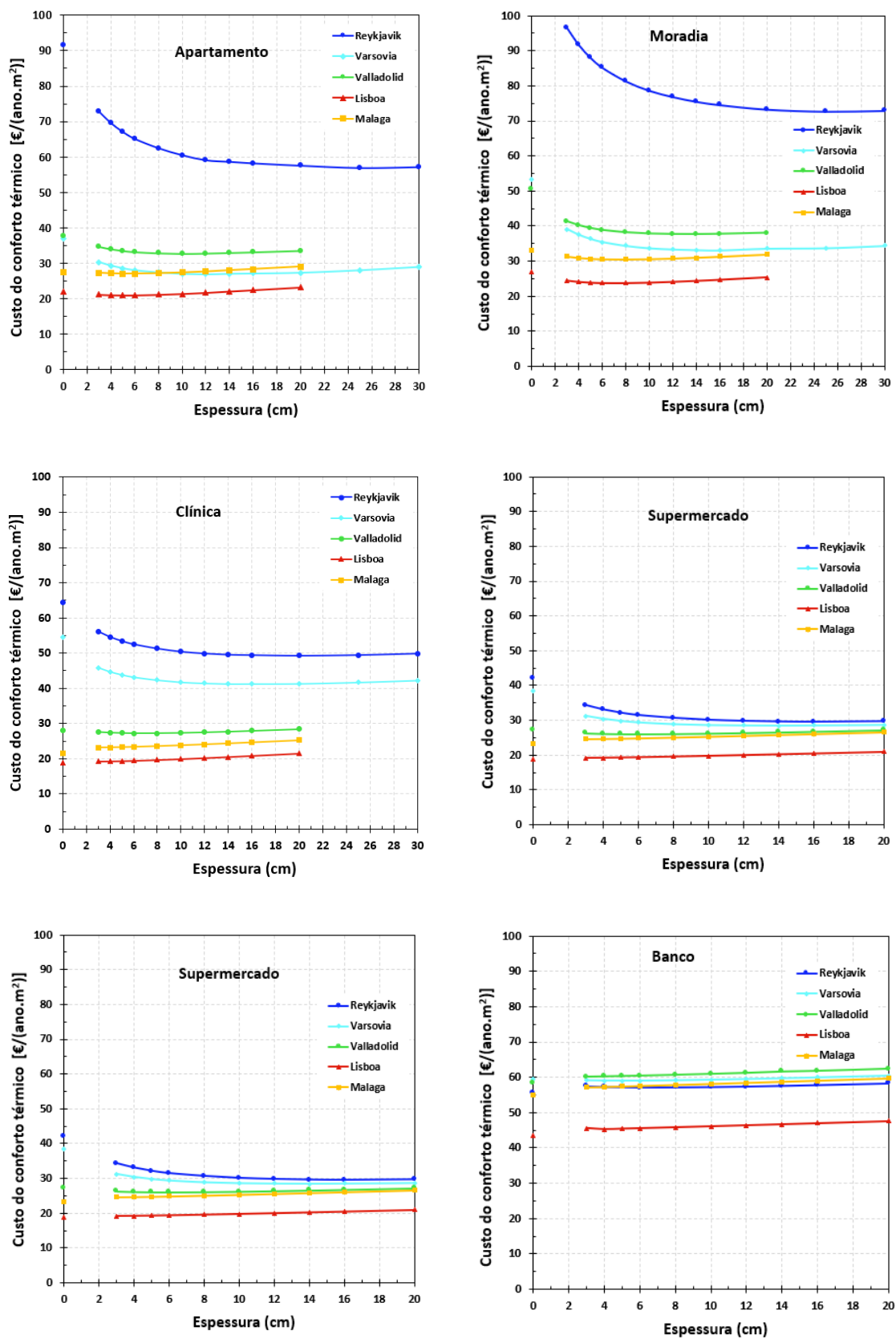


Figura 4.2 - Custo anual equivalente do conforto térmico, por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Os resultados apresentados na Figura 4.2 revelam que Reykjavik tem o custo económico de conforto térmico mais elevado para todas as tipologias em estudo, com exceção do caso da agência bancária. Este elevado custo surge tanto das grandes necessidades de energia para aquecimento, que são consequência da severidade do clima, como do elevado custo de mão-de-obra que é praticado na Islândia. Este país, à custa do seu elevado salário mínimo, apresenta os custos de mão-de-obra mais elevados de todos países e, conseqüentemente os custos de aplicação de isolamento térmico mais elevados.

Lisboa tem o custo económico de conforto térmico mais baixo para todas as tipologias de edifício. Devido ao seu clima moderado, Lisboa apresenta necessidades de energia para aquecimento e para arrefecimento relativamente baixas, as quais se repercutem sobre o consumo de energia por parte dos equipamentos AVAC. Adicionalmente, Portugal tem um dos ordenados mínimos mais baixos de entre os países considerados. Logo, este país apresenta custos de mão-de-obra e custos de aplicação de EPS inferiores a Espanha e Islândia, mas mais altos do que na Polónia.

No caso dos edifícios residências e de estes estarem convenientemente isolados termicamente, o custo económico do conforto térmico em Varsóvia é inferior ao verificado em Valladolid. Embora em Varsóvia os consumos de energia para aquecimento sejam consideravelmente superiores a Valladolid, o custo da energia para edifícios residenciais situados na Polónia é significativamente mais baixo do que em Espanha. Adicionalmente, entre os quatro países considerados, o salário mínimo na Polónia é o mais baixo de todos. Deste modo, os custos de mão-de-obra e conseqüentemente os custos de aplicação do EPS são mais baixos na Polónia do que nos restantes países considerados.

É visível na Figura 4.2 que a aplicação do EPS nas soluções construtivas opacas de ambos os edifícios residenciais (apartamento e moradia) é vantajosa economicamente para todas as condições climáticas testadas. Para a mesma espessura de EPS, o custo económico do conforto térmico para a moradia é sempre superior ao do apartamento. As espessuras ótimas de EPS para edifícios residenciais localizados em Lisboa e Málaga são iguais, para o apartamento esta espessura é de 5 cm e para a moradia é de 8 cm.

A aplicação de isolamento térmico nos edifícios de serviços e comércio não é economicamente vantajosa quando estes se localizam em Málaga e em Lisboa. Logo, para estes casos é mais benéfico suportar os custos de energia do que realizar o investimento de aplicar EPS às soluções construtivas opacas do edifício.

Comparando as três tipologias de edifício com ocupação permanente, a clínica tem custos económicos de conforto térmico inferiores aos dos edifícios residenciais, com exceção do caso de Varsóvia. Esta diferença deve-se à discrepância existente entre os custos de energia praticados para edifícios residenciais e para edifícios de serviços e comércio e ao facto de os proprietários dos edifícios residenciais serem pessoas singulares, logo sem capacidade de recuperar o IVA e sem possibilidade de beneficiar de qualquer poupança fiscal. De realçar que, com exceção da Polónia, o custo da energia para edifícios residenciais é significativamente superior ao seu custo para tipologias de serviços e comércio. Adicionalmente, como são pessoas coletivas (empresas), os proprietários dos quatro edifícios de comércio e serviços têm a capacidade de recuperar o IVA e todos os gastos com o edifício levam a uma diminuição dos impostos a pagar relacionados com a sua atividade empresarial.

Verifica-se que, no caso da agência bancária, a evolução do custo do conforto térmico em função do aumento da espessura de EPS tem um comportamento bastante diferente do apresentado nas restantes tipologias. Neste tipo de edifício, a aplicação do isolamento térmico leva a um aumento do custo económico do conforto térmico para as diversas condições climáticas, sendo Varsóvia a exceção. Adicionalmente, a agência bancária é a única tipologia localizada em Reykjavik em que é economicamente vantajoso não aplicar isolamento térmico.

No caso do supermercado verifica-se uma particularidade interessante. Na situação em que esta tipologia se encontra isolada termicamente com 20 cm de EPS é visível que os custos económicos de conforto térmico para todas as condições climáticas apresentam valores próximos uns dos outros. Adicionalmente, a clínica e o supermercado apresentam custos económicos semelhantes para climas moderados (Málaga, Lisboa e Valladolid). Já para climas severos, a clínica apresenta um custo económico do conforto térmico superior. Estas duas tipologias de edifício têm a mesma espessura ótima de EPS para todas as condições climáticas, com exceção de Reykjavik. Repare-se que, no caso do supermercado, a aplicação de isolamento térmico é uma medida extremamente eficiente de diminuição do custo económico do conforto térmico. Ao comparar este custo na situação de o edifício não estar isolado termicamente com a situação de este ter aplicada a espessura ótima de EPS, verifica-se uma diminuição no custo económico do conforto térmico de 26% para Varsóvia e de 30% para Reykjavik.

A escola é a tipologia que apresenta custos económicos do conforto térmico mais baixos. Os baixos consumos de energia que surgem tanto da sua ocupação intermitente e diurna, como do seu elevado número de ocupantes, são os grandes responsáveis por estes baixos custos, fazendo com que aplicação de EPS não seja vantajosa para algumas situações. A aplicação de isolamento térmico à escola quando esta se encontra situada em climas menos frios (Málaga, Lisboa e Valladolid) provoca um aumento do custo do conforto térmico. Deste modo, é vantajoso do ponto de vista económico não realizar o investimento de aplicar EPS nas soluções construtivas opacas das escolas localizadas nestes tipos de climas.

No caso de a escola se situar em Reykjavik repare-se que a aplicação de EPS só compensa se a espessura aplicada for superior a 6 cm. O baixo custo da energia e o elevado custo da mão-de-obra são os principais responsáveis por esta situação. Assim, a poupança feita em energia com o aumento da espessura aplicada só é vantajosa quando são aplicadas espessuras elevadas. As espessuras mais baixas não permitem realizar uma poupança em energia que compense o custo de material e de aplicação do isolamento térmico.

Os resultados revelam que a tipologia de edifício e a sua localização têm grande influência na espessura ótima de EPS e no custo económico do conforto térmico. Nos edifícios residenciais, a aplicação de EPS leva a uma diminuição do custo do conforto térmico em todas as localizações. De um modo geral, a espessura ótima de EPS está diretamente relacionada com a intensidade das condições climáticas, ou seja, quanto mais severa for o clima de uma região maior será a espessura ótima de EPS. Nas tipologias de serviços e comércios a aplicação de isolamento térmico não é vantajosa economicamente para edifícios localizados em Lisboa, Málaga e em algumas tipologias também em Valladolid. A espessura ótima de EPS para edifícios de comércio e serviços quando localizados em climas severos (Varsóvia e Reykjavik) é inferior á espessura ótima para edifícios residenciais localizados nesses mesmos climas.

### **4.3. Custo Ambiental do Conforto Térmico**

Na Tabela 4.2 são apresentadas as espessuras ótimas de EPS de acordo com a perspetiva ambiental para todos os casos considerados no presente estudo. A identificação das espessuras ambientais ótimas foi efetuada com recurso aos gráficos da Figura 4.3 e aos valores presentes nas tabelas do Anexo D. Realça-se que, tendo em conta as espessuras de EPS testadas, não foi possível identificar em concreto a espessura ambientalmente ótima no

caso de os edifícios estarem localizados em Varsóvia e em Reykjavik e no caso dos edifícios com ocupação permanente quando localizados em Valladolid. Mesmo assim, foi possível constatar que essas espessuras são superiores a 20 cm.

Tabela 4.2 – Espessura de EPS ambientalmente ótima [cm].

	Málaga	Lisboa	Valladolid	Varsóvia	Reykjavik
Apartamento	12	14	> 20	> 30	> 30
Moradia	14	16	> 20	> 30	> 30
Clínica	12	14	> 20	> 30	> 30
Escola	5	8	14	> 20	> 20
Supermercado	6	8	16	> 20	> 20
Banco	3	5	8	> 20	> 20

Apresentam-se na Figura 4.3 gráficos dos resultados obtidos para o custo ambiental do conforto térmico, para as diversas tipologias de edifício e condições climáticas consideradas. No Anexo D encontram-se tabelas com os valores utilizados para a realização destes gráficos.

Os resultados expostos na Figura 4.3 revelam que a aplicação de EPS nas soluções construtivas opacas da envolvente dos edifícios leva a uma diminuição das emissões poluentes (CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NSO<sub>3</sub>, etc.) e conseqüentemente do custo ambiental do conforto térmico (representado neste trabalho pela CO<sub>2</sub> equivalente emitido). Repare-se que o comportamento do custo energético e do custo ambiental em função do aumento da espessura de EPS é muito similar. Esta semelhança deve-se a que o consumo de energia primária por parte dos equipamentos AVAC influencia grandemente as emissões de poluentes. Deste modo, o custo energético tem grande influência no custo ambiental do conforto térmico.

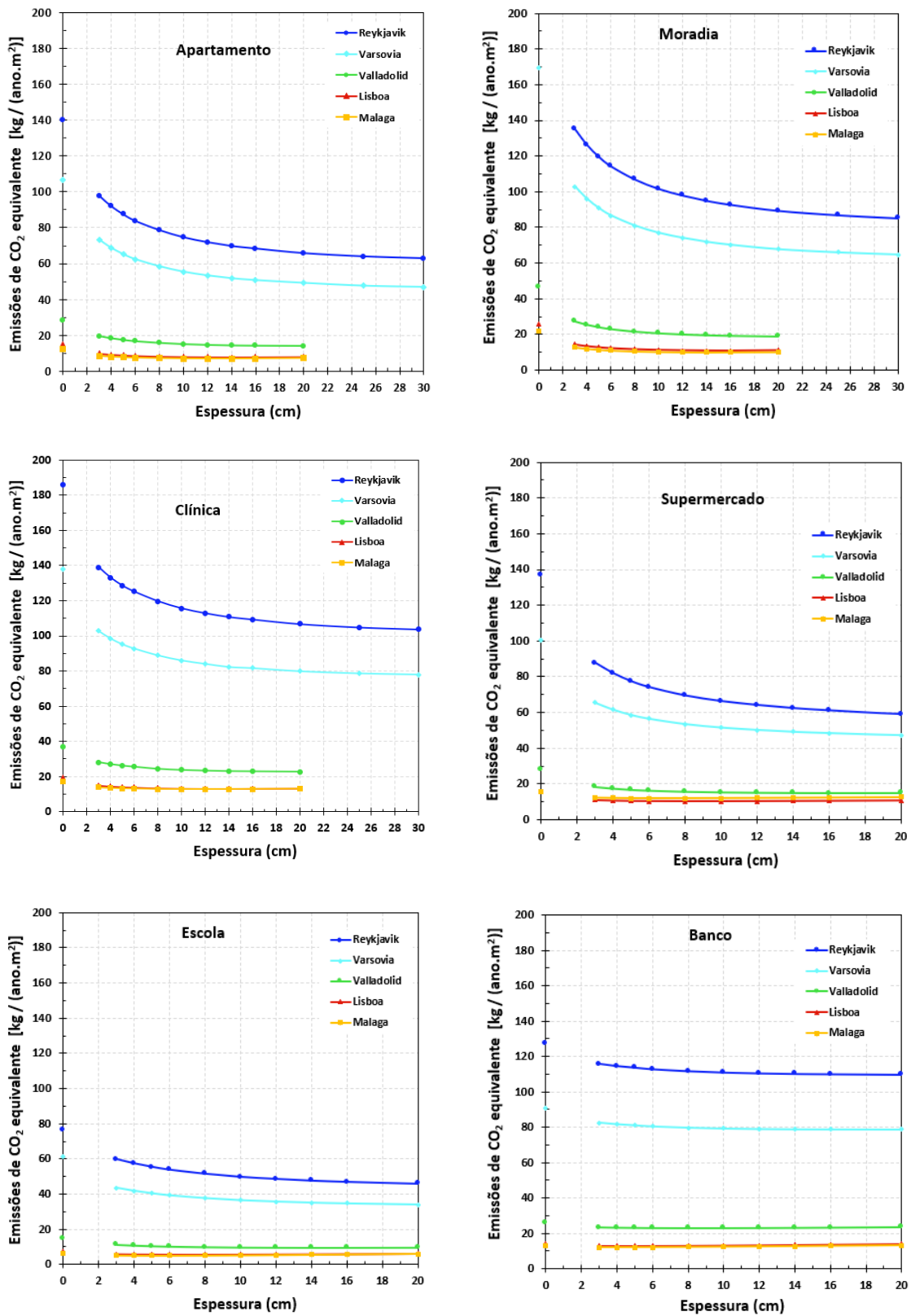


Figura 4.3 - Custo anual ambiental equivalente do conforto térmico, por m<sup>2</sup> de área climatizada

Os resultados obtidos não permitiram identificar a espessura ambiental ótima de EPS quando os edifícios estão localizados em Varsóvia e em Reykjavik. Todavia, a Figura 4.3 revela que o valor das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente diminui em função do aumento da espessura de EPS. Para estes dois climas observa-se que o aumento da energia embebida associado ao aumento da espessura de EPS é ambientalmente vantajoso para todas as espessuras testadas. Adicionalmente, as elevadas necessidades de energia para aquecimento que são características destas duas regiões conduzem a elevados consumos de energia, o que tira relevância à energia embebida no isolamento térmico. Importa referir que esta situação também acontece para todas as tipologias de uso com ocupação permanente (apartamento, moradia, clínica) quando localizadas em Valladolid.

Ao analisar a Tabela 4.2 verifica-se que as espessuras de EPS ambientalmente ótimas em climas moderados são maiores para o caso dos edifícios com ocupação permanente do que para os com ocupação intermitente. De um modo genérico, os edifícios de ocupação permanente apresentam consumos de energia totais superiores aos de ocupação intermitente. Assim, a aplicação de espessuras de EPS elevadas é mais vantajosa ambientalmente para edifícios de ocupação permanente.

O apartamento é a tipologia com ocupação permanente que apresenta menores valores de emissões de CO<sub>2</sub> para todos os casos considerados. Por outro lado, para o caso de o edifício não se encontrar isolado termicamente, a moradia é o aquele com maiores emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e conseqüentemente é o que tem maior custo ambiental. Estas observações são similares ao que foi verificado na Secção 4.1, demonstrando assim a influência que o consumo de energia primária tem no custo ambiental.

Para o caso da clínica, observa-se que as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente, à semelhança do consumo de energia primária, diminuem significativamente com a aplicação de isolamento térmico, sendo esta diminuição mais significativa para os climas severos. As espessuras ótimas de isolamento térmico para climas moderados são as mesmas para a clínica e para o apartamento. Esta similaridade demonstra a influência que o perfil de ocupação tem nos impactos ambientais de um edifício. Adicionalmente, como consequência da sua ocupação permanente, as espessuras ótimas para a clínica são as maiores de todas as tipologias de serviços e comércio.



A agência bancária, à semelhança do constatado nas Secções 4.1 e 4.2, é a tipologia de edifício em que a aplicação de EPS é menos vantajosa. Para os casos em que esta tipologia de uso se situa em Valladolid, Málaga e Lisboa a aplicação de EPS leva a uma redução pouco significativa das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente. As espessuras ambientalmente ótimas de isolamento térmico para estes três casos são 3 cm para Málaga, 5 cm para Lisboa e 8 cm para Valladolid, as quais são as mais baixas de todas as tipologias situadas nestes climas.

Para climas moderados, o supermercado e a escola apresentam espessuras ambientalmente ótimas de EPS semelhantes. Para ambas estas tipologias de edifício quando situadas em Málaga e em Lisboa, o aumento da espessura de EPS leva a uma redução pouco significativa das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente.

As condições climáticas e a espessura de EPS aplicado nas soluções construtivas opacas dos edifícios têm grande influência nas emissões anuais de CO<sub>2</sub> equivalente e, consequentemente, no custo ambiental do conforto térmico. Os resultados obtidos permitiram identificar a espessura ambientalmente ótima de EPS para todas as tipologias de edifício quando localizadas em Málaga e em Lisboa (climas quente e moderado, respetivamente). No caso do clima frio (Valladolid) conseguiu-se identificar em concreto a espessura de EPS ambientalmente ótima para os edifícios com ocupação intermitente (supermercado, escola e banco) e constatou-se que para os edifícios com ocupação permanente (apartamento, moradia e clínica) a mesma é superior a 20 cm. Nos climas severos (Varsóvia e Reykjavik), os resultados obtidos não permitiram identificar em concreto a espessura de EPS ambientalmente ótima, mas indicando que a mesma é superior a 20 cm. Todavia, nestes últimos dois casos, as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente diminuem significativamente com o aumento da espessura de EPS. Adicionalmente, constatou-se que o consumo de energia primária pelos equipamentos de AVAC, para aquecimento e para arrefecimento, tem grande influência no custo ambiental do conforto térmico.

#### **4.4. Espessuras Ótimas de Isolamento Térmico**

A espessura ótima de isolamento térmico depende da perspetiva segundo a qual ela é avaliada. Neste sentido, segue-se uma análise comparativa da espessura ótima de EPS, quando aplicado na face exterior dos elementos opacos da envolvente de edifícios, segundo as perspetivas: energética, económica e ambiental. Apresentam-se na Tabela 4.3 os valores desta espessura ótima, segundo as três perspetivas anteriores, para as cinco tipologias de

edifício consideradas (apartamento, moradia, clínica, escola, supermercado e agência bancária) quando supostamente localizadas em cinco locais distintos (Málaga, Lisboa, Valladolid, Varsóvia e Reykjavik) com condições climáticas representativas do continente europeu (clima quente, moderado, frio, muito frio e extremamente frio, respetivamente).

Tabela 4.3 - Espessuras de EPS (em cm) ótimas para os parâmetros em estudo.

Tipologia de edifício	Clima	Quente	Moderado	Frio	Muito frio	Extremamente frio
	Parâmetro	Málaga	Lisboa	Valladolid	Varsóvia	Reykjavik
Apartamento	Energético	>20	>20	>20	>30	>30
	Económico	5	5	10	12	25
	Ambiental	12	14	>20	>30	>30
Moradia	Energético	>20	>20	>20	>30	>30
	Económico	8	8	14	16	25
	Ambiental	14	16	>20	>30	>30
Clínica	Energético	>20	>20	>20	>30	>30
	Económico	0	0	6	14	20
	Ambiental	12	14	>20	>30	>30
Escola	Energético	>20	>20	>20	>20	>20
	Económico	0	0	0	10	16
	Ambiental	5	8	14	>20	>20
Supermercado	Energético	>20	>20	>20	>20	>20
	Económico	0	0	6	14	16
	Ambiental	6	8	16	>20	>20
Agência bancária	Energético	>20	>20	>20	>20	>20
	Económico	0	0	0	6	0
	Ambiental	3	5	8	>20	>20

Ao analisar os resultados expostos na Tabela 4.3 contata-se que, dentro da gama de espessuras de EPS consideradas, do ponto de vista energético não se obteve um valor em concreto para a espessura ótima de isolamento térmico. No entanto, os resultados claramente sugerem que ela é superior a 20 cm. Para além disto, é provável que ela exista na situação

---

de alguns climas e algumas tipologias de edifício, visto que aumentar a espessura de isolamento térmico da envolvente opaca dos edifícios leva a menores necessidades de energia para aquecimento e a maiores necessidades de energia para arrefecimento [Raimundo et al., 2020]. Logo, tudo depende da taxa de variação de cada uma das necessidades de energia anteriores com o aumento da espessura de EPS, as quais dependem do tipo de uso do edifício e das condições climáticas [Raimundo et al., 2020].

Mais uma vez, tendo em conta as espessuras de EPS testadas, não foi possível identificar em concreto a espessura ambientalmente ótima no caso de os edifícios estarem localizados em Varsóvia e em Reykjavik e no caso dos edifícios com ocupação permanente quando localizados em Valladolid. Mesmo assim, foi possível constatar que essas espessuras são superiores a 20 cm. É expetável que essas espessuras de EPS ambientalmente ótimas existam, pelo menos para algumas tipologias de edifício.

Os parâmetros económicos e ambientais apresentam tendências similares. Verifica-se que, segundo ambas estas perspetivas, a espessura ótima de EPS está fortemente relacionada com as condições climáticas e com a tipologia de edifício. De forma genérica, constata-se que climas severos e tipologias de ocupação permanente apresentam as maiores espessuras ótimas de isolamento térmico. Para estes parâmetros a espessura ótima de EPS aumenta proporcionalmente com a severidade do clima. É de realçar que esta proporcionalidade é significativamente mais direta para a vertente ambiental, visto que a vertente económica ser também afetada por fatores económico-financeiros.

O custo do conforto térmico sob os pontos de vista energético e ambiental depende fortemente da espessura de EPS, das condições climáticas e da tipologia de edifício, apresentando forte proporcionalidade com a severidade do clima. Por outro lado, a perspetiva económica é influenciada também por fatores adicionais, sendo este um parâmetro de maior complexidade. À semelhança das restantes abordagens, também na abordagem económica, o custo do conforto térmico apresenta um certo nível de proporcionalidade em função da severidade do clima, todavia, o preço da energia, os parâmetros económico-financeiros, o custo do material isolante e o custo da aplicação variam de país para país. O caso da agência bancária é exemplo desta complexidade dado que a aplicação de EPS é vantajosa quando esta se situa em Varsóvia, porém, quando esta se situa em Reykjavik o mesmo não se verifica. Reykjavik apresenta consumos de energia substancialmente superiores a Varsóvia. Deste modo, se os parâmetros económicos fossem

exclusivamente proporcionais às condições climáticas e à tipologia de edifício este comportamento não fazia sentido. Assim, concluiu-se que o preço da energia, os custos de aplicação e os parâmetros económico-financeiros são fatores determinantes para o custo económico do conforto térmico.

As espessuras de EPS ambientalmente e energeticamente ótimas são superiores às espessuras economicamente ótimas, isto para todos os casos estudados. Este facto leva a concluir que, de forma geral, a aplicação de isolamento térmico é mais benéfica em termos energéticos e ambientais do que em termos económicos. Independentemente do tipo de edifício e das condições climáticas, a aplicação de EPS na envolvente opaca dos edifícios é sempre benéfica segundo as perspetivas energética e ambiental. Por outro lado, em termos económicos existem situações em que isso não se verifica.

A aplicação de EPS em tipologias de serviços e comércio situadas em Málaga e em Lisboa conduz a um aumento do custo económico do conforto térmico, sendo nestes casos mais vantajoso suportar os gastos com energia do que realizar o investimento de aumentar a qualidade das soluções construtivas opacas.

Para efeitos do presente estudo seria interessante terminar o presente capítulo com a apresentação de uma espessura ótima global que minimizasse, em simultâneo, o custo do conforto térmico segundo as três perspetivas (energética, económica e ambiental). Todavia, dado que não foi viável identificar a espessura ótima para um elevado número de casos, tornou-se impossível obter uma ponderação que não simplificasse em demasia uma situação complexa e dependente de tantos fatores. Não obstante, conclui-se que de modo a aumentar a qualidade das soluções construtivas e consequentemente aumentar a eficiência energética de edifícios é necessário suportar custos económicos superiores aos valores ótimos.

Em resumo, a espessura ótima de isolamento térmico a aplicar às soluções construtivas opacas da envolvente de edifícios situados no continente europeu depende da perspetiva segundo a qual este assunto é abordado.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo focou-se na análise da influência do isolamento térmico no comportamento energético, ambiental e económico de edifícios localizados no continente europeu. Para tal propósito tentou-se relacionar o custo energético, económico e ambiental do conforto térmico com a tipologia de edifício, a condição climática e a espessura de isolamento térmico aplicado nas soluções construtivas opacas.

O software SEnergEd [Raimundo, 2021] foi a ferramenta de cálculo utilizada para realizar a simulação energética, económica e ambiental dos edifícios. No entanto, a versão fornecida (a v508) não realiza a análise ambiental, pelo que foi necessário melhorar este software, criando assim uma versão (a v601), na qual foi implementado o cálculo de impactos ambientais, adicionando ao software os algoritmos necessários.

Através de uma análise autónoma foi possível verificar que o poliestireno expandido (EPS) é o material mais viável em termos económico e ambiental para ser utilizado como isolante térmico dos elementos opacos dos edifícios. Como tal, foi o material selecionado para realizar o presente estudo.

De modo a representar o parque edificado do continente europeu selecionaram-se seis tipologias de edifício (apartamento, moradia, clínica, supermercado, escola e agência bancária). Para representar o clima do continente europeu selecionaram-se cinco cidades (Málaga – Espanha, Lisboa – Portugal, Valladolid – Espanha, Varsóvia – Polónia e Reykjavik – Islândia), as quais apresentam, respetivamente, clima quente, moderado, frio, muito frio e extremamente frio.

Os resultados obtidos com recurso ao software SEnergEd revelaram que as condições climáticas, a tipologia de edifício e a espessura do material de isolamento influenciam grandemente os custos energéticos, económicos e ambientais do conforto térmico no interior dos edifícios. Concluiu-se que as tipologias de edifício com ocupação permanente (apartamento, moradia e clínica) apresentam sempre os custos mais elevados. Adicionalmente, os custos ambientais e energéticos aumentam proporcionalmente com a severidade do clima.

De um modo geral, os edifícios com ocupação permanente (apartamento, moradia e clínica) apresentaram valores do custo energético do conforto térmico superiores aos correspondentes valores apresentados pelos edifícios com ocupação intermitente (supermercado, escola e agência bancária). Como consequência disto, em termos

energéticos, a aplicação de isolamento térmico é mais vantajosa no caso dos edifícios com ocupação permanente do que nos com ocupação intermitente. No entanto, verificou-se que, em termos energéticos, todos os casos em estudo beneficiaram com a aplicação de isolamento térmico nas soluções construtivas opacas dos edifícios. Este benefício é mais significativo para os climas mais frios, observando-se assim uma relação direta entre a severidade do clima e o benefício energético obtido com a aplicação de isolamento térmico.

A nível económico identificou-se que a tipologia de edifício e as condições climáticas influenciam fortemente a espessura ótima de EPS e o custo económico do conforto térmico. As tipologias residenciais apresentaram valores do custo económico do conforto térmico e de espessura ótima de EPS superiores aos correspondentes valores apresentados pelos edifícios de serviços e comércio. Este facto está relacionado com a diferença entre o preço de aquisição da energia, que é substancialmente superior no caso dos edifícios residenciais, e ao diferente enquadramento fiscal entre o proprietário assumido para os edifícios residenciais (pessoa singular – indivíduo) e o proprietário dos edifícios de comércio e serviços (pessoa coletiva – empresa). Adicionalmente, à semelhança da perspetiva energética, observou-se uma relação entre a severidade do clima e o benefício económico com a aplicação de isolamento térmico. No entanto, esta relação não é tão direta visto que o custo económico é fortemente afetado por fatores que nada têm a ver com condições climáticas (preço da energia, diferença de preços entre países, enquadramento fiscal do proprietário do edifício, capacidade de recuperação do IVA pago, etc.). Ainda assim, a tendência geral é que climas mais frios têm custos económicos do conforto térmico e espessuras ótimas de isolamento térmico mais elevadas, porém, estes beneficiam mais com a aplicação de isolamento térmico.

Na vertente ambiental verificou-se relações semelhantes às observadas na perspetiva energética. Isto é, tipologias de ocupação permanente e climas frios beneficiam mais com a aplicação de isolamento térmico do que tipologias de ocupação intermitente e climas moderados e quentes. Constatou-se que os parâmetros energéticos têm grande influência sobre os ambientais, uma vez que o consumo de energia primária é um fator com grande preponderância na emissão de poluentes (representada neste trabalho pela emissão de CO<sub>2</sub> equivalente) e, conseqüentemente, no custo ambiental do conforto térmico. À semelhança da vertente económica, as tipologias residenciais apresentam espessuras ambientalmente ótimas de isolamento térmico superiores às tipologias de serviços e comércio.

Genericamente, os climas frios apresentam custos ambientais do conforto térmico e espessuras ótimas de EPS superiores aos climas moderados e quentes. Por outro lado, quanto mais frio é o clima mais vantajoso é aumentar a espessura de isolamento térmico aplicado na envolvente opaca dos edifícios localizados no continente europeu.

A realização do presente estudo permitiu concluir que a aplicação de isolamento térmico nas soluções construtivas opacas da envolvente dos edifícios do continente europeu é uma forma altamente eficiente de diminuir os seus consumos energéticos e impactos ambientais. Esta aplicação, de forma geral, é mais benéfica em termos energéticos e ambientais do que sob a perspetiva económica. A aplicação de isolamento térmico é mais vantajosa para os edifícios com ocupação permanente do que para os com ocupação intermitente e é mais eficaz quanto mais frio for o clima.

## 6. REFERÊNCIAS

Anastaselos, D., Papadopoulos, A., Giama, E. (2009), An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings* – November 2009 DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.06.003

Azari, R. (2014), Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes. *Energy and Buildings* 82 156-162 Elsevier. College of Architecture, University of Texas at San Antonio. 1 July 2014

Bastos, J., Batterman, S., A., Freire, F., (2014), Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon. *Elsevier Energy and Buildings* 69 (2014) 344-353 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.010>

Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M., D. (2017), Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation. Department of Mechanical Engineering and Construction, Universitat Jaume I, Av. Sos Baynat s/n, 12071 Castellón, Spain. *Elsevier Energy and Buildings* 150 (2017) 527-545 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.005>

Claro, J., (2015), Viabilidade da instalação em escolas secundárias de sistemas de geração em regime de produção para autoconsumo. Tese de MiEM (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, julho de 2015

Costa, L. (2018), Custo do conforto térmico em edifícios localizados em Portugal. Tese de MiEM (Mestrado Integrado Em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, setembro de 2018

Cype (2017), Gerador de Preços Cype, Versão livre do gerador de preços de soluções construtivas e de sistemas de edifícios. Acedido em abril de 2017, a partir do site: <http://www.geradordeprecos.info/>

DGEG (2021), Direção Geral de Energia e Geologia, Manual SCE – Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios, Aprovado pelo Despacho nº6476-H/2021, de 1 de julho

Dylewski, R., Adamczyk, J., (2011), Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.023> . Elsevier, *Building and Environment* 46 (2011) 2615-2623

European Commission (2011), Consolidated text of Commission Delegated Regulation (EU) 626/2011 of 4 May 2011 supplementing Directive 2010/30/EU with regard to energy labelling of air conditioners, *Offic. J. European Union* L178 (2011) 1-72, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02011R0626-20200809>.



- 
- Eurostat. (2021) – Monthly minimum wages - bi-annual data. Acedido em abril de 2021. [https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-datasets/-/EARN\\_MW\\_CUR](https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-datasets/-/EARN_MW_CUR)
- Eurostat (2022a) – Electricity prices by type of user, NRG\_PC\_204, NRG\_PC\_205. Online data code: TEN00117
- Eurostat (2022b) – Gas prices by type of user, NRG\_PC\_202, NRG\_PC\_203. Online data code: TEN00118
- Giuseppina, C., Moreci, E., Lo Brano, V. (2015) – Degree Days and Building Energy Demand. Conference Paper, April 2015. Dipartimento di Energia, ingegneria dell'Informazione e Modelli matematici, University of Palermo
- Grazieschi, G., Asdrubali, F., Thomas, G. (2021) – Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. Cleaner Environmental Systems 2 100032 Department of Engineering, Roma the University and ESIREM, 27 March 2021 <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100032>
- IPCC (2014) - Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- IPCC press release (2021), Climate change widespread, rapid, and intensifying - IPCC, Press Release, 9 august 2021
- ISO 7730 (2005), Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices, International Organization for Standardization, 2005.
- ISO 13790 (2006). Energy performance of buildings - calculation of energy use for space heating and cooling, International Standard Organization
- Pavel, C. C. and Blagoeva, D. T. (2018), Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings, EUR 28816 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-96383-4, doi:10.2760/750646, PUBSY No. JRC108692
- Pina, J. (2021) – Influência do tipo de clima no custo do conforto térmico no interior dos edifícios. Tese de MiEM (Mestrado Integrado Em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, junho 2021
- Pruitt, L., Kramer, S. (2017) – How Historical Solutions to Thermal Comfort Influenced Modern Construction Efforts. Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia. Elsevier Procedia Engineering 196 (2017) 880-887
- Raimundo, A. M., Lamas, F. B., & Simões, N. V. (2007). Grande remodelação de fração autónoma destinada a agência bancária localizada no interior da zona urbana de

Bragança, Cursos de Formação de Formadores do SCE, Agência para a Energia (ADENE), Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG).

Raimundo, A. M. (2008) – Cálculo do comportamento térmico de edifícios através do modelo dinâmico horário monozona 5R1C, II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Universidade de Aveiro, 8-9 de maio de 2008

Raimundo, A. M., Gaspar, A. R., & Lamas, F. B. (2011a). Projeto RCCTE de um apartamento (caso prático). Cursos de Formação Sobre o SCE, DEM-FCTUC, Universidade de Coimbra.

Raimundo, A. M., Gaspar, A. R., & Lamas, F. B. (2011b). Projeto RCCTE de uma moradia (caso prático). Cursos de Formação Sobre o SCE, DEM-FCTUC, Universidade de Coimbra

Raimundo, A. M., Gaspar, A. R., & Lamas, F. B. (2011c). Projeto RSECE de um edifício de serviços (caso prático). Cursos de Formação Sobre o SCE, DEM-FCTUC, Universidade de Coimbra.

Raimundo, A.M. (2014), CalProTerm – folha de cálculo das propriedades termofísicas das soluções construtivas dos edifícios, DEM, FCTUC, Universidade de Coimbra.

Raimundo, A. M., (2018). Elementos de apoio à disciplina Economia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.

Raimundo, A. M., Saraiva, N. B., & Oliveira, A. V. M. (2020). Thermal insulation cost optimality of opaque constructive solutions of buildings under Portuguese temperate climate. *Building and Environment*, 182 (2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107107>

Raimundo, A.M. (2021), SEnergEd – software de simulação energética dinâmica monozona de edifícios e de cálculo do custo económico do seu ciclo de vida, DEM, FCTUC, Universidade de Coimbra.

Rebelo, A. C. (2016) – Ponto ótimo de rentabilidade económica dos envidraçados aplicados em edifícios localizados em Portugal, Dissertação de MiEM, Universidade de Coimbra, fevereiro de 2016.

Saraiva, N. (2017) – Ponto ótimo de rentabilidade económica das soluções construtivas opacas de edifícios localizados em Portugal. Dissertação de MiEM, Universidade de Coimbra, julho de 2017

Silva, M. (2012) – Factores de Sustentabilidade em Energias Renováveis. Tese de MEM (Mestado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, dezembro de 2012

Totland et al. (2019) - M Totland et al 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 323 012033

União Europeia (2018) - Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética, Jornal Oficial da União Europeia, L 156/75 – L156/91.

União Europeia (2021) - Proposta de Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação), 2021/0426(COD).

Vidigueira, V., (2013) - Influência da estratégia de ventilação no consumo energético dos edifícios de serviços com utilização intermitente e elevadas cargas térmicas internas. Tese de MiEM (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, janeiro de 2013

## ANEXO A – LAYOUT E PERFIS DE OCUPAÇÃO E DE FUNCIONAMENTO

### Apartamento



Figura A.0.1 – Planta do Piso 2 do apartamento [Raimundo et al., 2011a].

Perfil de ocupação					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	100	0 - 1	100	0 - 1	100
1 - 2	100	1 - 2	100	1 - 2	100
2 - 3	100	2 - 3	100	2 - 3	100
3 - 4	100	3 - 4	100	3 - 4	100
4 - 5	100	4 - 5	100	4 - 5	100
5 - 6	100	5 - 6	100	5 - 6	100
6 - 7	100	6 - 7	100	6 - 7	100
7 - 8	75	7 - 8	100	7 - 8	100
8 - 9	50	8 - 9	100	8 - 9	100
9 - 10	25	9 - 10	75	9 - 10	50
10 - 11	25	10 - 11	75	10 - 11	50
11 - 12	25	11 - 12	100	11 - 12	100
12 - 13	50	12 - 13	100	12 - 13	100
13 - 14	50	13 - 14	100	13 - 14	100
14 - 15	25	14 - 15	50	14 - 15	25
15 - 16	25	15 - 16	50	15 - 16	25
16 - 17	25	16 - 17	50	16 - 17	25
17 - 18	50	17 - 18	50	17 - 18	25
18 - 19	75	18 - 19	50	18 - 19	25
19 - 20	100	19 - 20	100	19 - 20	100
20 - 21	100	20 - 21	100	20 - 21	100
21 - 22	100	21 - 22	100	21 - 22	100
22 - 23	100	22 - 23	100	22 - 23	100
23 - 24	100	23 - 24	100	23 - 24	100

Perfil de equipamentos (não incluindo os de AVAC)					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	20	0 - 1	20	0 - 1	20
1 - 2	10	1 - 2	10	1 - 2	10
2 - 3	5	2 - 3	5	2 - 3	5
3 - 4	5	3 - 4	5	3 - 4	5
4 - 5	5	4 - 5	5	4 - 5	5
5 - 6	5	5 - 6	5	5 - 6	5
6 - 7	20	6 - 7	20	6 - 7	20
7 - 8	20	7 - 8	20	7 - 8	20
8 - 9	20	8 - 9	20	8 - 9	20
9 - 10	5	9 - 10	30	9 - 10	30
10 - 11	5	10 - 11	30	10 - 11	30
11 - 12	5	11 - 12	30	11 - 12	30
12 - 13	25	12 - 13	30	12 - 13	30
13 - 14	25	13 - 14	30	13 - 14	30
14 - 15	5	14 - 15	30	14 - 15	30
15 - 16	5	15 - 16	30	15 - 16	30
16 - 17	5	16 - 17	30	16 - 17	30
17 - 18	40	17 - 18	40	17 - 18	40
18 - 19	50	18 - 19	50	18 - 19	50
19 - 20	60	19 - 20	60	19 - 20	60
20 - 21	60	20 - 21	60	20 - 21	60
21 - 22	60	21 - 22	60	21 - 22	60
22 - 23	60	22 - 23	60	22 - 23	60
23 - 24	40	23 - 24	40	23 - 24	40

Figura A.0.2 - Perfil de ocupação e perfil de equipamentos não AVAC no apartamento.

### Moradia

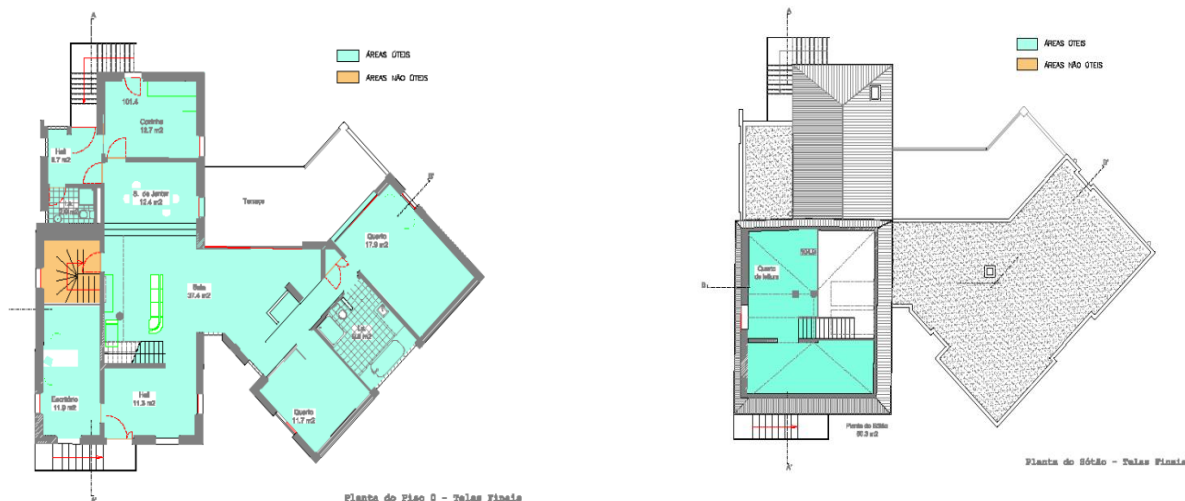


Figura A.0.3 - Planta do Piso 0 e sótão da moradia [Raimundo et al., 2011b].

Perfil de ocupação Para o edifício a funcionar a 100%						Perfil de equipamentos (não incluindo os de AVAC) Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos		2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	100	0 - 1	100	0 - 1	100	0 - 1	20	0 - 1	20	0 - 1	20
1 - 2	100	1 - 2	100	1 - 2	100	1 - 2	10	1 - 2	10	1 - 2	10
2 - 3	100	2 - 3	100	2 - 3	100	2 - 3	5	2 - 3	5	2 - 3	5
3 - 4	100	3 - 4	100	3 - 4	100	3 - 4	5	3 - 4	5	3 - 4	5
4 - 5	100	4 - 5	100	4 - 5	100	4 - 5	5	4 - 5	5	4 - 5	5
5 - 6	100	5 - 6	100	5 - 6	100	5 - 6	5	5 - 6	5	5 - 6	5
6 - 7	100	6 - 7	100	6 - 7	100	6 - 7	20	6 - 7	20	6 - 7	20
7 - 8	75	7 - 8	100	7 - 8	100	7 - 8	20	7 - 8	20	7 - 8	20
8 - 9	50	8 - 9	100	8 - 9	100	8 - 9	20	8 - 9	20	8 - 9	20
9 - 10	25	9 - 10	75	9 - 10	50	9 - 10	5	9 - 10	30	9 - 10	30
10 - 11	25	10 - 11	75	10 - 11	50	10 - 11	5	10 - 11	30	10 - 11	30
11 - 12	25	11 - 12	100	11 - 12	100	11 - 12	5	11 - 12	30	11 - 12	30
12 - 13	50	12 - 13	100	12 - 13	100	12 - 13	25	12 - 13	30	12 - 13	30
13 - 14	50	13 - 14	100	13 - 14	100	13 - 14	25	13 - 14	30	13 - 14	30
14 - 15	25	14 - 15	50	14 - 15	25	14 - 15	5	14 - 15	30	14 - 15	30
15 - 16	25	15 - 16	50	15 - 16	25	15 - 16	5	15 - 16	30	15 - 16	30
16 - 17	25	16 - 17	50	16 - 17	25	16 - 17	5	16 - 17	30	16 - 17	30
17 - 18	50	17 - 18	50	17 - 18	25	17 - 18	40	17 - 18	40	17 - 18	40
18 - 19	75	18 - 19	50	18 - 19	25	18 - 19	50	18 - 19	50	18 - 19	50
19 - 20	100	19 - 20	100	19 - 20	100	19 - 20	60	19 - 20	60	19 - 20	60
20 - 21	100	20 - 21	100	20 - 21	100	20 - 21	60	20 - 21	60	20 - 21	60
21 - 22	100	21 - 22	100	21 - 22	100	21 - 22	60	21 - 22	60	21 - 22	60
22 - 23	100	22 - 23	100	22 - 23	100	22 - 23	60	22 - 23	60	22 - 23	60
23 - 24	100	23 - 24	100	23 - 24	100	23 - 24	40	23 - 24	40	23 - 24	40

Figura A.0.4 - Perfil de ocupação e perfil de equipamentos não AVAC na moradia.

## Clínica

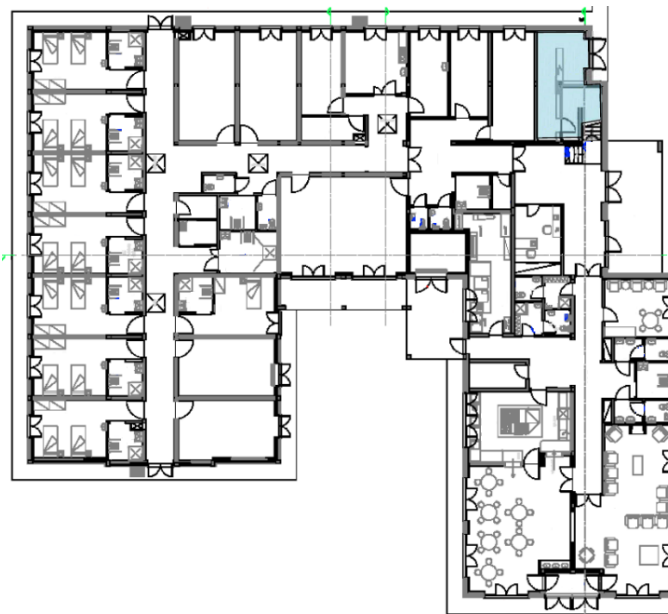


Figura A.0.5 - Planta da clínica [Raimundo et al., 2011c].

Perfil de ocupação Para o edifício a funcionar a 100%						Perfil de equipamentos (não incluindo os de AVAC) Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos		2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0-1	50	0-1	50	0-1	50	0-1	35	0-1	35	0-1	35
1-2	50	1-2	50	1-2	50	1-2	35	1-2	35	1-2	35
2-3	50	2-3	50	2-3	50	2-3	35	2-3	35	2-3	35
3-4	50	3-4	50	3-4	50	3-4	35	3-4	35	3-4	35
4-5	50	4-5	50	4-5	50	4-5	35	4-5	35	4-5	35
5-6	50	5-6	50	5-6	50	5-6	35	5-6	35	5-6	35
6-7	50	6-7	50	6-7	50	6-7	35	6-7	35	6-7	35
7-8	50	7-8	50	7-8	50	7-8	50	7-8	50	7-8	50
8-9	100	8-9	100	8-9	100	8-9	100	8-9	100	8-9	100
9-10	100	9-10	100	9-10	100	9-10	100	9-10	100	9-10	100
10-11	100	10-11	100	10-11	100	10-11	100	10-11	100	10-11	100
11-12	100	11-12	100	11-12	100	11-12	100	11-12	100	11-12	100
12-13	100	12-13	100	12-13	100	12-13	100	12-13	100	12-13	100
13-14	100	13-14	100	13-14	100	13-14	100	13-14	100	13-14	100
14-15	100	14-15	100	14-15	100	14-15	100	14-15	100	14-15	100
15-16	100	15-16	100	15-16	100	15-16	100	15-16	100	15-16	100
16-17	100	16-17	100	16-17	100	16-17	100	16-17	100	16-17	100
17-18	50	17-18	50	17-18	50	17-18	100	17-18	100	17-18	100
18-19	50	18-19	50	18-19	50	18-19	50	18-19	50	18-19	50
19-20	50	19-20	50	19-20	50	19-20	35	19-20	35	19-20	35
20-21	50	20-21	50	20-21	50	20-21	35	20-21	35	20-21	35
21-22	50	21-22	50	21-22	50	21-22	35	21-22	35	21-22	35
22-23	50	22-23	50	22-23	50	22-23	35	22-23	35	22-23	35
23-24	50	23-24	50	23-24	50	23-24	35	23-24	35	23-24	35

Figura A.0.6 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para a clínica.

## Supermercado

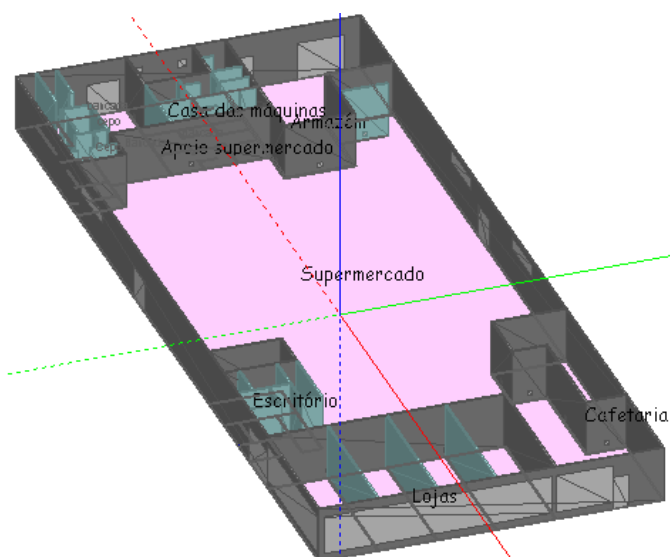


Figura A.0.7 - Representação da planta do supermercado [Vidigueira, 2013].

Perfil de ocupação						Perfil de equipamentos (não incluindo os de AVAC)					
Para o edifício a funcionar a 100%						Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos		2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0-1	0	0-1	0	0-1	0	0-1	20	0-1	20	0-1	20
1-2	0	1-2	0	1-2	0	1-2	20	1-2	20	1-2	20
2-3	0	2-3	0	2-3	0	2-3	20	2-3	20	2-3	20
3-4	0	3-4	0	3-4	0	3-4	20	3-4	20	3-4	20
4-5	0	4-5	0	4-5	0	4-5	20	4-5	20	4-5	20
5-6	0	5-6	0	5-6	0	5-6	20	5-6	20	5-6	20
6-7	0	6-7	0	6-7	0	6-7	20	6-7	20	6-7	20
7-8	0	7-8	0	7-8	0	7-8	20	7-8	20	7-8	20
8-9	10	8-9	10	8-9	10	8-9	20	8-9	20	8-9	20
9-10	30	9-10	30	9-10	30	9-10	20	9-10	20	9-10	20
10-11	60	10-11	50	10-11	50	10-11	40	10-11	50	10-11	50
11-12	60	11-12	80	11-12	80	11-12	70	11-12	80	11-12	80
12-13	60	12-13	80	12-13	80	12-13	70	12-13	80	12-13	80
13-14	60	13-14	80	13-14	80	13-14	70	13-14	80	13-14	80
14-15	60	14-15	80	14-15	80	14-15	70	14-15	80	14-15	80
15-16	60	15-16	80	15-16	80	15-16	70	15-16	80	15-16	80
16-17	60	16-17	80	16-17	80	16-17	70	16-17	80	16-17	80
17-18	70	17-18	90	17-18	90	17-18	80	17-18	90	17-18	90
18-19	80	18-19	100	18-19	100	18-19	90	18-19	100	18-19	100
19-20	60	19-20	70	19-20	70	19-20	70	19-20	80	19-20	80
20-21	50	20-21	60	20-21	60	20-21	60	20-21	70	20-21	70
21-22	30	21-22	40	21-22	40	21-22	40	21-22	50	21-22	50
22-23	0	22-23	0	22-23	0	22-23	20	22-23	20	22-23	20
23-24	0	23-24	0	23-24	0	23-24	20	23-24	20	23-24	20

Figura A.0.8 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para o supermercado.

## Escola



Figura A.0.9 - Vista da escola.

Perfil de ocupação Para o edifício a funcionar a 100%						Perfil de equipamentos (não incluindo os de AVAC) Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos		2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0-1	0	0-1	0	0-1	0	0-1	0	0-1	0	0-1	0
1-2	0	1-2	0	1-2	0	1-2	0	1-2	0	1-2	0
2-3	0	2-3	0	2-3	0	2-3	0	2-3	0	2-3	0
3-4	0	3-4	0	3-4	0	3-4	0	3-4	0	3-4	0
4-5	0	4-5	0	4-5	0	4-5	0	4-5	0	4-5	0
5-6	0	5-6	0	5-6	0	5-6	0	5-6	0	5-6	0
6-7	0	6-7	0	6-7	0	6-7	0	6-7	0	6-7	0
7-8	40	7-8	0	7-8	0	7-8	0	7-8	0	7-8	0
8-9	60	8-9	0	8-9	0	8-9	0	8-9	0	8-9	0
9-10	100	9-10	0	9-10	0	9-10	100	9-10	0	9-10	0
10-11	100	10-11	0	10-11	0	10-11	100	10-11	0	10-11	0
11-12	90	11-12	0	11-12	0	11-12	100	11-12	0	11-12	0
12-13	80	12-13	0	12-13	0	12-13	100	12-13	0	12-13	0
13-14	100	13-14	0	13-14	0	13-14	80	13-14	0	13-14	0
14-15	100	14-15	0	14-15	0	14-15	80	14-15	0	14-15	0
15-16	100	15-16	0	15-16	0	15-16	100	15-16	0	15-16	0
16-17	70	16-17	0	16-17	0	16-17	100	16-17	0	16-17	0
17-18	60	17-18	0	17-18	0	17-18	90	17-18	0	17-18	0
18-19	40	18-19	0	18-19	0	18-19	70	18-19	0	18-19	0
19-20	7	19-20	0	19-20	0	19-20	60	19-20	0	19-20	0
20-21	0	20-21	0	20-21	0	20-21	0	20-21	0	20-21	0
21-22	0	21-22	0	21-22	0	21-22	0	21-22	0	21-22	0
22-23	0	22-23	0	22-23	0	22-23	0	22-23	0	22-23	0
23-24	0	23-24	0	23-24	0	23-24	0	23-24	0	23-24	0

Figura A.0.10 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para a escola.



## Agência bancária



Figura A.0.11 - Alçada lateral, posterior e poente da agência bancária [Raimundo et al., 2007].

Perfil de ocupação						Perfil de equipamentos (não incluindo os de AVAC)					
Para o edifício a funcionar a 100%						Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos		2ª a 6ª feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0-1	0	0-1	0	0-1	0	0-1	30	0-1	30	0-1	30
1-2	0	1-2	0	1-2	0	1-2	30	1-2	30	1-2	30
2-3	0	2-3	0	2-3	0	2-3	30	2-3	30	2-3	30
3-4	0	3-4	0	3-4	0	3-4	30	3-4	30	3-4	30
4-5	0	4-5	0	4-5	0	4-5	30	4-5	30	4-5	30
5-6	0	5-6	0	5-6	0	5-6	30	5-6	30	5-6	30
6-7	0	6-7	0	6-7	0	6-7	30	6-7	30	6-7	30
7-8	0	7-8	0	7-8	0	7-8	30	7-8	30	7-8	30
8-9	60	8-9	0	8-9	0	8-9	100	8-9	30	8-9	30
9-10	100	9-10	0	9-10	0	9-10	100	9-10	30	9-10	30
10-11	100	10-11	0	10-11	0	10-11	100	10-11	30	10-11	30
11-12	100	11-12	0	11-12	0	11-12	100	11-12	30	11-12	30
12-13	60	12-13	0	12-13	0	12-13	100	12-13	30	12-13	30
13-14	100	13-14	0	13-14	0	13-14	100	13-14	30	13-14	30
14-15	100	14-15	0	14-15	0	14-15	100	14-15	30	14-15	30
15-16	100	15-16	0	15-16	0	15-16	100	15-16	30	15-16	30
16-17	70	16-17	0	16-17	0	16-17	100	16-17	30	16-17	30
17-18	60	17-18	0	17-18	0	17-18	90	17-18	30	17-18	30
18-19	40	18-19	0	18-19	0	18-19	80	18-19	30	18-19	30
19-20	0	19-20	0	19-20	0	19-20	60	19-20	30	19-20	30
20-21	0	20-21	0	20-21	0	20-21	30	20-21	30	20-21	30
21-22	0	21-22	0	21-22	0	21-22	30	21-22	30	21-22	30
22-23	0	22-23	0	22-23	0	22-23	30	22-23	30	22-23	30
23-24	0	23-24	0	23-24	0	23-24	30	23-24	30	23-24	30

Figura A.0.12 - Perfil de ocupação e de equipamentos não AVAC para a agência bancária.

## ANEXO B – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS OPACAS SEM ISOLAMENTO TÉRMICO

### Envolvente opaca interior

Tabela B.1 - Descrição dos elementos construtivos da envolvente opaca interior. [Saraiva, 2017]

Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Paredes em contacto com outros espaços interiores	27	Reboco tradicional com 2 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional com 2cm.
Pilares e Vigas em contato com espaços interiores	38	Reboco tradicional com 2 cm, Betão armado (volume de ferro < 1%) de inertes com 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional com 2 cm.
Pavimento sobre espaço interior	55	Reboco tradicional com 2cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2cm.
Cobertura sob interior	55	Madeira de carvalho com 2cm, Betonilha com 5.5 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm (betão leve com 1 furo, 35 + betão 3 cm, base 16-30 cm), Reboco tradicional com 2 cm

Tabela B.2 - Propriedades dos elementos construtivos da Envolvente Opaca Interior.

Elementos construtivos	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
Parede com espaços interiores	150	1.02
Pilar/viga com espaços interiores	150	1.34
Pavimento sobre espaço interior	150	1.02
Cobertura sob espaço interior	150	1.22

### Elementos de compartimentação interior

Tabela B.3 - Descrição dos elementos de compartimentação interior [Saraiva, 2017].

Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Parede fina	15	Reboco tradicional com 2 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional com 2 cm
Parede grossa	27	Reboco tradicional com 2 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional com 2 cm
Pilar/Viga exterior	38	Reboco tradicional com 2 cm, Betão armado (volume de ferro < 1%) de inertes com 22 cm, Espaço de ar fracamente ventilado com 1 cm, Tijolo furado normal de 11 cm, Reboco tradicional com 2 cm.
Pavimento de compartimentação	55	Reboco tradicional com 2cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2 cm.
Cobertura de compartimentação	55	Madeira de carvalho com 2 cm, Betonilha com 5.5 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm (betão leve 1 furo, 35 cm + betão 3 cm, base 16-30 cm), Reboco tradicional com 2 cm.

Tabela B.4 - Propriedades dos elementos de compartimentação interior.

Elementos construtivos	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
Parede fina	172	-
Parede grossa	268	-
Pilar/viga	300	-
Pavimento de compartimentação	300	-
Cobertura de compartimentação	300	-

### Elementos em contato com o solo

Tabela B.5 - Descrição dos elementos em contato com o solo [Saraiva, 2017].

Elemento Construtivo	Espessura [cm]	Descrição (do exterior para o interior)
Pavimento sobre o exterior	55	Reboco tradicional com 2cm, Laje aligeirada a 1 vigota com 38 cm, Betão isolante só com areia leve com 7.5 cm, Betonilha com 5.5 cm, Madeira de carvalho com 2 cm.

Tabela B.6 - Propriedades dos elementos em contacto com o solo.

Elementos construtivos	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
Pavimento sobre o solo	150	1.17

## ANEXO C – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS OPACAS COM ISOLAMENTO TÉRMICO

### Pilar/viga exterior

Tabela C.1 - Custos totais e energia embebida para o pilar/viga exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	1.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.69	30.88	42.62	25.94	81.38	9.42
4	150	0.60	31.79	43.53	26.85	82.29	12.56
5	150	0.52	32.70	44.44	27.76	83.20	15.70
6	150	0.46	33.61	45.35	28.67	84.11	18.84
8	150	0.38	35.43	47.17	30.49	85.93	25.12
10	150	0.32	37.25	48.99	32.31	87.75	31.41
12	150	0.28	39.07	50.81	34.13	89.57	37.69
14	150	0.25	40.89	52.63	35.95	91.39	43.97
16	150	0.22	42.71	54.45	37.77	93.21	50.25
20	150	0.18	46.35	58.09	41.41	96.85	62.81
25	150	0.15	50.90	62.64	45.96	101.40	78.52
30	150	0.13	55.45	67.19	50.51	105.95	94.22
35	150	0.11	60.00	71.74	55.06	110.50	109.92
40	150	0.10	64.55	76.29	59.61	115.05	125.63

## Caixa de estore

Tabela C.2 - Custos totais e energia embebida para a caixa de estore, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	38	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	38	0.59	30.88	42.62	25.94	81.38	9.42
4	38	0.52	31.79	43.53	26.85	82.29	12.56
5	38	0.46	32.70	44.44	27.76	83.20	15.70
6	38	0.41	33.61	45.35	28.67	84.11	18.84
8	38	0.35	35.43	47.17	30.49	85.93	25.12
10	38	0.30	37.25	48.99	32.31	87.75	31.41
12	38	0.26	39.07	50.81	34.13	89.57	37.69
14	38	0.24	40.89	52.63	35.95	91.39	43.97
16	38	0.21	42.71	54.45	37.77	93.21	50.25
20	38	0.17	46.35	58.09	41.41	96.85	62.81
25	38	0.14	50.90	62.64	45.96	101.40	78.52
30	38	0.12	55.45	67.19	50.51	105.95	94.22
35	38	0.11	60.00	71.74	55.06	110.50	109.92
40	38	0.10	64.55	76.29	59.61	115.05	125.63

### Pavimento exterior

Tabela C.3 - Custos totais e energia embebida para o pavimento exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.64	11.33	14.91	9.82	26.75	9.42
4	150	0.55	12.24	15.82	10.73	27.66	12.56
5	150	0.49	13.15	16.73	11.64	28.57	15.70
6	150	0.44	14.06	17.64	12.55	29.48	18.84
8	150	0.36	15.88	19.46	14.37	31.30	25.12
10	150	0.31	17.70	21.28	16.19	33.12	31.41
12	150	0.27	19.52	23.10	18.01	34.94	37.69
14	150	0.24	21.34	24.92	19.83	36.76	43.97
16	150	0.21	23.16	26.74	21.65	38.58	50.25
20	150	0.18	26.80	30.38	25.29	42.22	62.81
25	150	0.15	31.35	34.93	29.84	46.77	78.52
30	150	0.13	35.90	39.48	34.39	51.32	94.22
35	150	0.11	40.45	44.03	38.94	55.87	109.92
40	150	0.10	45.00	48.58	43.49	60.42	125.63

## Cobertura exterior

Tabela C.4 - Custos totais e energia embebida para a cobertura exterior, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.88	6.37	7.89	5.73	12.90	9.42
4	150	0.73	7.28	8.80	6.64	13.81	12.56
5	150	0.62	8.19	9.71	7.55	14.72	15.70
6	150	0.54	9.10	10.62	8.46	15.63	18.84
8	150	0.43	10.92	12.44	10.28	17.45	25.12
10	150	0.36	12.74	14.26	12.10	19.27	31.41
12	150	0.31	14.56	16.08	13.92	21.09	37.69
14	150	0.27	16.38	17.90	15.74	22.91	43.97
16	150	0.24	18.20	19.72	17.56	24.73	50.25
20	150	0.19	21.84	23.36	21.20	28.37	62.81
25	150	0.16	26.39	27.91	25.75	32.92	78.52
30	150	0.13	30.94	32.46	30.30	37.47	94.22
35	150	0.11	35.49	37.01	34.85	42.02	109.92
40	150	0.10	40.04	41.56	39.40	46.57	125.63



### Parede em contato com outros espaços interiores

Tabela C.5 - Custos totais e energia embecida para a parede em contato com outros espaços interiores, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	134	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.59	10.49	13.73	9.13	24.42	9.42
4	150	0.52	11.40	14.64	10.04	25.33	12.56
5	150	0.46	12.31	15.55	10.95	26.24	15.70
6	150	0.42	13.22	16.46	11.86	27.15	18.84
8	150	0.35	15.04	18.28	13.68	28.97	25.12
10	150	0.30	16.86	20.10	15.50	30.79	31.41
12	150	0.26	18.68	21.92	17.32	32.61	37.69
14	150	0.23	20.50	23.74	19.14	34.43	43.97
16	150	0.21	22.32	25.56	20.96	36.25	50.25
20	150	0.17	25.96	29.20	24.60	39.89	62.81
25	150	0.14	30.51	33.75	29.15	44.44	78.52
30	150	0.12	35.06	38.30	33.70	48.99	94.22
35	150	0.11	39.61	42.85	38.25	53.54	109.92
40	150	0.10	44.16	47.40	42.80	58.09	125.63

### Pilar/viga em contacto com outros espaços interiores

Tabela C.6 - Custos totais e energia embebida para o pilar/viga em contato com outros espaços interiores, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.65	10.51	13.75	9.14	24.46	9.42
4	150	0.57	11.42	14.66	10.05	25.37	12.56
5	150	0.50	12.33	15.57	10.96	26.28	15.70
6	150	0.45	13.24	16.48	11.87	27.19	18.84
8	150	0.37	15.06	18.30	13.69	29.01	25.12
10	150	0.31	16.88	20.12	15.51	30.83	31.41
12	150	0.27	18.70	21.94	17.33	32.65	37.69
14	150	0.24	20.52	23.76	19.15	34.47	43.97
16	150	0.22	22.34	25.58	20.97	36.29	50.25
20	150	0.18	25.98	29.22	24.61	39.93	62.81
25	150	0.15	30.53	33.77	29.16	44.48	78.52
30	150	0.13	35.08	38.32	33.71	49.03	94.22
35	150	0.11	39.63	42.87	38.26	53.58	109.92
40	150	0.10	44.18	47.42	42.81	58.13	125.63

### Pavimento sobre espaço interior

Tabela C.7 - Custos totais e energia embebida para o pavimento sobre espaço interior, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.59	10.50	13.74	9.14	24.44	9.42
4	150	0.52	11.41	14.65	10.05	25.35	12.56
5	150	0.46	12.32	15.56	10.96	26.26	15.70
6	150	0.41	13.23	16.47	11.87	27.17	18.84
8	150	0.35	15.05	18.29	13.69	28.99	25.12
10	150	0.30	16.87	20.11	15.51	30.81	31.41
12	150	0.26	18.69	21.93	27.33	32.63	37.69
14	150	0.23	20.51	23.75	19.15	34.45	43.97
16	150	0.21	22.33	25.57	20.97	36.27	50.25
20	150	0.17	25.97	29.21	24.61	39.91	62.81
25	150	0.14	30.52	33.76	29.16	44.46	78.52
30	150	0.12	35.07	38.31	33.71	49.01	94.22
35	150	0.11	39.62	42.86	38.26	53.56	109.92
40	150	0.10	44.17	47.41	42.81	58.11	125.63

### Cobertura sob espaço interior

Tabela C.8 - Custos totais e energia embebida para a cobertura sob espaço interior, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.65	4.83	5.71	4.46	8.60	9.42
4	150	0.56	5.74	6.62	5.37	9.51	12.56
5	150	0.50	6.65	7.53	6.28	10.42	15.70
6	150	0.45	7.56	8.44	7.19	11.33	18.84
8	150	0.37	9.38	10.26	9.01	13.15	25.12
10	150	0.31	11.20	12.08	10.83	14.97	31.41
12	150	0.27	13.02	13.90	12.65	16.79	37.69
14	150	0.24	14.84	15.72	14.47	18.61	43.97
16	150	0.22	16.66	17.54	16.29	20.43	50.25
20	150	0.18	20.30	21.18	19.93	24.07	62.81
25	150	0.15	24.85	25.73	24.48	28.62	78.52
30	150	0.13	29.40	30.28	29.03	33.17	94.22
35	150	0.11	33.95	34.83	33.58	37.72	109.92
40	150	0.10	38.50	39.38	38.13	42.27	125.63

### Pavimento térreo

Tabela C.9 - Custos totais e energia embebida para o pavimento térreo, em função da espessura isolamento térmico aplicado.

Espessura [cm]	$M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Custo [€/m <sup>2</sup> ]				Energia Embebida [kWh/m <sup>2</sup> ]
			Portugal	Espanha	Polónia	Islândia	
0	150	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	150	0.64	11.33	14.91	9.82	26.75	9.42
4	150	0.55	12.24	15.82	10.73	27.66	12.56
5	150	0.49	13.15	16.73	11.64	28.57	15.70
6	150	0.44	14.06	17.64	12.55	29.48	18.84
8	150	0.36	15.88	19.46	14.37	31.30	25.12
10	150	0.31	17.70	21.28	16.19	33.12	31.41
12	150	0.27	19.52	23.10	18.01	34.94	37.69
14	150	0.24	21.34	24.92	19.83	36.76	43.97
16	150	0.21	23.16	26.74	21.65	38.58	50.25
20	150	0.18	26.80	30.38	25.29	42.22	62.81
25	150	0.15	31.35	34.93	29.84	46.77	78.52
30	150	0.13	35.90	39.48	34.39	51.32	94.22
35	150	0.11	40.45	44.03	38.94	55.87	109.92
40	150	0.10	45.00	48.58	43.49	60.42	125.63

## ANEXO D – CUSTO ENERGÉTICO, ECONÓMICO E AMBIENTAL

### Apartamento

Figura D.0.1 - Resultados obtidos para o apartamento por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valleadolid (frio)			Varsavia (muito frio)			Reikiavik (extremamente frio)		
	CQE (€/ano)   Energia embudida /an	CO2 Eq Global /ano	CQE (€/ano)   Energia embudida /an	CO2 Eq Global /ano	CQE (€/ano)   Energia embudida /an	CO2 Eq Global /ano	CQE (€/ano)   Energia embudida /an	CO2 Eq Global /ano	CQE (€/ano)   Energia embudida /an	CO2 Eq Global /ano	CQE (€/ano)   Energia embudida /an	CO2 Eq Global /ano			
0	27,44	0,00	12,33	21,91	0,00	14,62	37,81	0,00	28,52	36,98	0,00	106,41	91,69	140,23	
1	27,30	0,65	8,45	21,17	0,65	9,71	34,64	0,65	19,37	30,28	0,65	73,28	67,77	97,91	
3	27,14	0,87	8,00	21,04	0,87	9,12	33,98	0,87	18,19	29,30	0,87	68,73	69,55	92,03	
4	27,07	1,08	7,67	20,99	1,08	8,70	33,52	1,08	17,31	28,58	1,08	65,22	67,09	91,08	
5	27,10	1,30	7,43	21,01	1,30	8,38	33,19	1,30	16,61	28,05	1,30	62,40	65,14	89,28	
6	27,18	1,73	7,16	21,16	1,73	8,00	32,86	1,73	15,70	27,42	1,73	58,47	62,51	87,62	
8	27,37	2,17	6,99	21,98	2,17	7,75	32,70	2,17	15,09	27,03	2,17	55,43	60,54	86,65	
10	27,64	2,60	6,94	21,88	2,60	7,64	32,80	2,60	14,92	26,90	2,60	53,55	59,10	85,20	
12	28,00	3,04	6,94	22,05	3,04	7,60	32,96	3,04	14,94	27,05	3,04	51,78	58,67	84,71	
14	28,34	3,47	7,01	22,41	3,47	7,64	33,14	3,47	14,21	27,34	3,47	50,75	58,24	84,29	
16	29,04	4,34	7,20	23,14	4,34	7,79	33,54	4,34	14,10	27,34	4,34	49,21	57,57	83,89	
20															
25															
30															
35															
40															
MAXIMO	29,04		12,33	23,14		14,62	37,81		28,52	36,98		106,41	91,69	140,23	
MEIA	27,60		7,83	21,63		8,91	33,74		17,09	28,69		60,74	64,38	81,30	
MINIMO	27,07		6,94	20,99		7,80	32,70		14,10	28,50		48,96	58,92	82,84	

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valleadolid (frio)			Varsavia (muito frio)			Reikiavik (extremamente frio)		
	Consumo aquecimento	Consumo Primaria	Energia embudida /an	Consumo aquecimento	Consumo Primaria	Energia embudida /an	Consumo aquecimento	Consumo Primaria	Energia embudida /an	Consumo aquecimento	Consumo Primaria	Energia embudida /an	Consumo aquecimento	Consumo Primaria	Energia embudida /an
0	22,35	4,21	66,40	29,62	1,89	78,77	60,47	0,97	153,60	407,48	0,62	409,03	538,46	538,46	
1	13,29	4,26	43,89	18,17	2,09	50,65	40,03	1,05	102,71	278,86	0,77	280,77	374,78	374,78	
3	12,06	4,31	40,91	16,62	2,17	46,96	37,23	1,10	95,83	260,93	0,81	262,96	351,82	351,82	
4	11,10	4,35	38,62	15,42	2,23	44,13	35,06	1,15	90,52	246,97	0,85	249,10	333,90	333,90	
5	10,33	4,38	36,78	14,45	2,29	41,87	33,30	1,19	86,24	235,69	0,89	237,90	319,38	319,38	
6	9,25	4,44	34,22	13,10	2,39	38,73	30,82	1,26	80,22	219,72	0,95	222,09	298,80	298,80	
8	8,40	4,49	32,24	12,05	2,48	36,32	28,88	1,33	75,52	207,20	1,00	209,71	282,62	282,62	
10	7,81	4,54	30,86	11,31	2,55	34,64	27,51	1,38	72,22	198,35	1,05	200,97	271,16	271,16	
12	7,35	4,57	29,80	10,74	2,60	33,96	26,44	1,42	69,66	191,49	1,08	194,19	265,24	265,24	
14	7,03	4,60	29,07	10,35	2,64	33,47	25,70	1,45	67,88	186,71	1,10	189,48	256,04	256,04	
16	6,53	4,64	27,93	9,73	2,71	31,10	24,53	1,51	65,09	178,19	1,15	182,07	244,59	244,59	
20															
25															
30															
35															
40															
MAXIMO	22,35		66,40	29,62		78,77	60,47		153,60	407,48		409,03	538,46	538,46	
MEIA	10,50		37,94	14,69		42,64	33,63		87,23	226,94		229,38	307,63	307,63	
MINIMO	6,53		27,93	9,73		31,10	24,53		65,09	166,53		169,60	229,69	229,69	

## Moradia

Figura D.0.2 - Resultados obtidos para a moradia por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsovia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq
0.00	33.16	0.00	21.81	26.92	0.00	25.83	50.43	0.00	46.80	53.40	0.00	169.68	119.69	0.00	219.19
1.00	31.32	0.61	12.76	24.36	0.61	14.41	41.33	0.61	27.25	39.10	0.61	102.76	96.50	0.61	135.03
3.00	30.92	0.82	11.97	24.02	0.82	13.42	40.19	0.82	25.39	37.50	0.82	95.90	91.64	0.82	126.24
4.00	30.69	1.02	11.42	23.82	1.02	12.72	39.39	1.02	24.02	36.35	1.02	90.71	87.99	1.02	119.57
5.00	30.55	1.23	11.01	23.72	1.23	12.21	38.81	1.23	22.97	35.48	1.23	86.65	85.16	1.23	114.33
6.00	30.49	1.64	10.51	23.71	1.64	11.55	38.13	1.64	21.56	34.39	1.64	80.98	81.27	1.64	106.96
8.00	30.58	2.05	10.22	23.83	2.05	11.14	37.76	2.05	20.61	33.73	2.05	76.95	78.58	2.05	101.69
10.00	31.00	2.46	10.06	24.05	2.46	10.92	37.63	2.46	19.99	33.40	2.46	74.14	76.79	2.46	97.99
12.00	31.00	2.87	9.96	24.30	2.87	10.78	37.61	2.87	19.54	33.22	2.87	71.92	75.44	2.87	95.06
14.00	31.28	3.27	10.07	24.60	3.27	10.72	37.69	3.27	19.24	33.14	3.27	70.26	74.49	3.27	92.84
16.00	31.91	4.09	10.15	25.26	4.09	10.95	38.00	4.09	18.85	33.74	4.09	67.75	73.20	4.09	89.44
20.00										33.74	5.11	65.99	72.61	5.11	86.98
25.00										34.38	6.14	64.78	72.83	6.14	85.25
30.00															
35.00															
40.00															
MÁXIMO	33.16	0.00	21.81	26.92	0.00	25.83	50.43	0.00	46.80	53.40	0.00	169.68	119.69	0.00	219.19
MÉDIA	31.15	0.00	11.81	24.42		13.15	39.73	0.00	24.20	36.26		86.03	83.55		113.12
MÍNIMO	30.49		9.96	23.71		10.72	37.61		18.85	33.14		64.78	72.61		85.25

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsovia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia
0	37.73	9.26	117.45	50.03	5.62	139.14	96.76	4.08	252.09	647.96	2.00	652.95	841.66	0.00	841.66
1	18.74	8.13	67.17	25.70	4.73	76.08	54.93	3.17	145.25	390.43	1.72	394.73	517.40	0.00	517.40
3	16.88	8.09	62.45	23.33	4.75	70.25	50.72	3.17	134.72	363.65	1.74	368.01	483.29	0.00	483.29
4	15.49	8.09	58.94	21.60	4.80	65.98	47.55	3.18	126.82	343.31	1.77	347.74	457.30	0.00	457.30
5	14.41	8.09	56.25	20.23	4.85	62.69	45.06	3.20	120.66	327.31	1.81	331.83	436.82	0.00	436.82
6	12.88	8.12	52.51	18.31	4.94	58.12	41.56	3.26	112.05	304.69	1.87	309.36	407.80	0.00	407.80
8	11.79	8.18	49.99	16.94	5.02	54.91	39.04	3.32	105.90	288.38	1.92	293.19	386.83	0.00	386.83
10	11.03	8.19	48.05	15.97	5.09	52.66	37.26	3.36	101.56	276.78	1.97	281.70	371.90	0.00	371.90
12	10.42	8.22	46.60	15.20	5.15	50.88	35.83	3.41	98.09	267.47	2.01	272.49	359.88	0.00	359.88
14	9.95	8.25	45.51	14.61	5.20	49.33	34.73	3.44	95.44	260.33	2.04	265.43	350.66	0.00	350.66
16	9.23	8.29	43.81	13.69	5.29	47.45	33.02	3.50	91.30	240.45	2.14	245.81	324.89	0.00	324.89
20										233.92	2.18	239.37	316.41	0.00	316.41
25															
30															
35															
40															
MÁXIMO	37.73		117.45	50.03		139.14	96.76		252.09	647.96		652.95	841.66		841.66
MÉDIA	15.32		58.97	21.42		66.13	46.95		125.81	322.60		327.46	430.07		430.07
MÍNIMO	9.23		43.81	13.69		47.45	33.02		91.30	233.92		239.37	316.41		316.41

## Clínica

Figura D.0.3 - Resultados obtidos para a clínica por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsovia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq /ano	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq /ano	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq /ano	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq /ano	CAE (€/ano) embebid/a	Energia /aGlobal /ano	CO2 Eq /ano
0,00	21,64	0,00	17,41	18,88	0,00	19,56	28,13	0,00	36,98	54,57	0,00	138,11	64,52	0,00	186,06
1,00															
3,00	23,16	0,57	13,97	19,29	0,57	14,91	27,63	0,57	28,01	45,80	0,57	102,81	56,17	0,57	138,86
4,00	23,19	0,76	13,63	19,32	0,76	14,43	27,43	0,76	26,94	44,66	0,76	98,55	54,62	0,76	133,05
5,00	23,26	0,91	13,37	19,39	0,91	14,08	27,31	0,91	26,13	43,82	0,91	95,27	53,45	0,91	128,55
6,00	23,34	1,14	13,21	19,47	1,14	13,84	27,25	1,14	25,52	43,17	1,14	92,84	52,54	1,14	125,18
8,00	23,57	1,52	12,92	19,69	1,52	13,40	27,26	1,52	24,37	42,34	1,52	88,95	51,32	1,52	119,77
10,00	23,82	1,90	12,82	19,94	1,90	13,21	27,34	1,90	23,75	41,76	1,90	86,08	50,44	1,90	115,74
12,00	24,10	2,28	12,80	20,23	2,28	13,13	27,50	2,28	23,37	41,46	2,28	84,13	49,92	2,28	112,96
14,00	24,39	2,66	12,84	20,52	2,66	13,13	27,70	2,66	23,11	41,30	2,66	82,34	49,58	2,66	110,80
16,00	24,70	3,04	12,91	20,83	3,04	13,17	27,95	3,04	22,99	41,31	3,04	81,67	49,46	3,04	109,38
20,00	25,32	3,80	13,09	21,46	3,80	13,29	28,45	3,80	22,79	41,35	3,80	79,91	49,29	3,80	106,78
25,00															
30,00															
35,00															
40,00															
MAXIMO	25,32	0,00	17,41	21,46	0,00	19,56	28,45	0,00	36,98	54,57	0,00	138,11	64,52	0,00	186,06
MEIA	23,68	0,00	13,54	19,91	0,00	14,20	27,63	0,00	25,81	43,50	0,00	91,34	52,36	0,00	122,75
MINIMO	21,64	0,00	12,80	18,88	0,00	13,13	27,25	0,00	22,79	41,30	0,00	78,02	49,29	0,00	103,76

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsovia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	Consumo aquecimento/refreesciment	Consumo Primária	Energia /aGlobal /ano	Consumo aquecimento/refreesciment	Consumo Primária	Energia /aGlobal /ano	Consumo aquecimento/refreesciment	Consumo Primária	Energia /aGlobal /ano	Consumo aquecimento/refreesciment	Consumo Primária	Energia /aGlobal /ano	Consumo aquecimento/refreesciment	Consumo Primária	Energia /aGlobal /ano
0,00	23,65	13,86	93,76	33,03	9,12	105,38	73,83	5,84	199,17	522,73	4,26	533,38	714,43	0,00	714,43
1,00															
3,00	14,85	14,69	73,84	21,33	10,22	78,88	53,20	6,57	149,44	384,50	5,19	397,47	532,18	0,00	532,18
4,00	13,76	14,84	71,50	19,92	10,42	75,84	50,58	6,71	143,23	367,52	5,36	380,92	509,54	0,00	509,54
5,00	12,93	14,97	69,73	18,84	10,58	73,55	48,56	6,83	138,47	354,39	5,50	368,15	491,98	0,00	491,98
6,00	12,26	15,07	68,33	17,97	10,72	71,72	46,92	6,93	134,64	344,44	5,62	358,50	478,64	0,00	478,64
8,00	11,01	15,30	65,77	16,36	11,00	68,39	43,85	7,14	127,47	328,48	5,82	343,04	457,19	0,00	457,19
10,00	10,28	15,44	64,28	15,39	11,18	66,43	42,00	7,27	123,17	316,48	5,99	331,45	441,02	0,00	441,02
12,00	9,76	15,54	63,27	14,72	11,31	65,09	40,71	7,37	120,18	308,09	6,11	323,37	429,67	0,00	429,67
14,00	9,37	15,63	62,49	14,20	11,42	64,05	39,69	7,44	117,83	300,35	6,21	315,88	420,72	0,00	420,72
16	9,09	15,69	61,96	13,84	11,50	63,34	38,99	7,50	116,23	296,96	6,29	312,67	414,58	0,00	414,58
20	8,60	15,81	61,01	13,19	11,64	62,06	37,70	7,61	113,28	288,60	6,43	304,67	403,23	0,00	403,23
25															
30															
35															
40															
MAXIMO	23,65	14,69	93,76	33,03	10,22	105,38	73,83	6,57	199,17	522,73	5,19	397,47	532,18	0,00	532,18
MEIA	12,32	15,44	68,72	18,07	11,18	72,25	46,91	7,27	134,83	336,32	6,43	304,67	403,23	0,00	403,23
MINIMO	8,60	15,81	61,01	13,19	11,64	62,06	37,70	7,61	113,28	277,63	6,62	294,19	388,27	0,00	388,27



### Supermercado

Figura D.0.4 - Resultados obtidos para o supermercado por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varecova (frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	CAE (lano)	Energia embaldado	CO2 Eq Global/lano	CAE (lano)	Energia embaldado	CO2 Eq Global/lano	CAE (lano)	Energia embaldado	CO2 Eq Global/lano	CAE (lano)	Energia embaldado	CO2 Eq Global/lano	CAE (lano)	Energia embaldado	CO2 Eq Global/lano
0,00	23,33	0,00	15,97	18,94	0,00	15,65	27,07	0,00	28,11	38,41	0,00	100,33	42,00	0,00	197,03
1,00	24,65	0,53	12,29	19,12	0,53	11,01	26,28	0,53	18,39	31,25	0,53	65,40	34,23	0,53	87,54
4,00	24,70	0,71	12,07	19,16	0,71	10,86	26,13	0,71	17,43	30,41	0,71	61,53	33,04	0,71	81,78
5,00	24,78	0,82	11,92	19,23	0,82	10,41	26,06	0,82	16,70	29,79	0,82	58,57	32,10	0,82	77,32
6,00	24,88	1,07	11,91	19,32	1,07	10,33	26,04	1,07	16,24	29,37	1,07	56,46	31,44	1,07	74,06
8,00	25,10	1,43	11,92	19,53	1,43	10,23	26,09	1,43	15,61	28,86	1,43	53,47	30,63	1,43	69,40
10,00	25,34	1,78	12,00	19,76	1,78	10,24	26,21	1,78	15,25	28,60	1,78	51,53	30,06	1,78	66,30
12,00	25,59	2,14	12,12	20,00	2,14	10,30	26,37	2,14	14,91	28,49	2,14	50,21	29,77	2,14	64,15
14,00	25,85	2,50	12,25	20,25	2,50	10,40	26,58	2,50	14,87	28,45	2,50	49,16	29,59	2,50	62,41
16,00	26,11	2,85	12,39	20,50	2,85	10,51	26,78	2,85	14,86	28,45	2,85	48,43	29,58	2,85	61,14
20,00	26,63	3,57	12,70	21,01	3,57	10,77	27,19	3,57	14,87	29,06	3,57	47,27	29,51	3,57	59,10
25,00		4,46			4,46			4,46		29,06	4,46	46,71	29,76	4,46	57,94
30,00		5,35			5,35			5,35		29,50	5,35	46,23	30,08	5,35	56,91
35,00															
40,00															
MAXIMO	26,63	0,00	15,97	21,01	0,00	15,65	27,19	0,00	28,11	38,41	0,00	100,33	42,00	0,00	197,03
MEIA	25,78	0,00	12,50	19,70	0,00	10,96	26,43	0,00	17,04	29,95	0,00	56,56	31,69	0,00	73,47
MINIMO	23,33		11,91	18,94		10,23	26,04		14,86	28,45		46,23	29,51		56,91

Espessura	Malaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varecova (frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	Consumo aquecimento	Consumo arefrescamento	Energia pimlaria	Consumo aquecimento	Consumo arefrescamento	Energia pimlaria	Consumo aquecimento	Consumo arefrescamento	Energia pimlaria	Consumo aquecimento	Consumo arefrescamento	Energia pimlaria	Consumo aquecimento	Consumo arefrescamento	Energia pimlaria
0	13,39	21,01	86,00	18,14	15,58	84,32	49,12	11,44	151,39	371,30	7,83	390,88	526,18	0,00	526,18
1	5,42	20,53	64,86	7,61	15,37	57,95	28,03	11,06	97,73	234,80	8,63	256,38	335,20	0,00	335,20
3	4,64	20,66	63,25	6,73	15,53	55,65	25,68	11,17	92,12	219,06	8,94	241,42	312,75	0,00	312,75
4	4,08	20,80	62,19	5,93	15,69	54,06	23,88	11,29	87,92	206,98	9,23	230,06	295,43	0,00	295,43
5	3,67	20,92	61,49	5,36	15,82	52,95	22,54	11,39	84,83	198,00	9,47	221,69	282,46	0,00	282,46
6	3,13	21,13	60,64	4,57	16,05	51,53	20,65	11,56	80,52	185,21	9,86	209,96	263,95	0,00	263,95
8	2,77	21,30	60,18	4,05	16,22	50,69	18,99	11,69	77,66	176,59	10,16	201,98	251,40	0,00	251,40
10	2,50	21,43	59,92	3,70	16,35	50,16	18,50	11,78	75,70	170,49	10,38	196,44	242,49	0,00	242,49
12	2,34	21,65	59,74	3,42	16,49	49,78	17,77	11,87	74,09	165,47	10,59	191,93	235,16	0,00	235,16
14	2,20	21,85	59,63	3,22	16,57	49,48	17,22	11,94	72,89	161,72	10,74	188,57	229,95	0,00	229,95
16	1,99	21,81	59,49	2,89	16,74	49,08	16,32	12,05	70,94	151,43	11,01	183,06	220,54	0,00	220,54
20										147,69	11,39	176,16	208,95	0,00	208,95
30															
35															
40															
MAXIMO	13,39		86,00	18,14		84,32	49,12		151,39	371,30		390,88	526,18		526,18
MEIA	4,20		63,40	5,98		55,06	23,55		87,80	195,71		220,61	278,96		278,96
MINIMO	1,99		59,49	2,89		49,08	16,32		70,94	147,69		176,16	208,95		208,95

Escola

Figura D.0.5 - Resultados obtidos para a escola por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Espessura	Málaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsóvia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	CAE (€/ano)/ embêda/a/Globoal/ano	Energia primária	CO2 Eq	CAE (€/ano)/ embêda/a/Globoal/ano	Energia primária	CO2 Eq	CAE (€/ano)/ embêda/a/Globoal/ano	Energia primária	CO2 Eq	CAE (€/ano)/ embêda/a/Globoal/ano	Energia primária	CO2 Eq	CAE (€/ano)/ embêda/a/Globoal/ano	Energia primária	CO2 Eq
0,00	9,87	0,00	6,35	8,19	0,00	7,16	11,87	0,00	14,57	21,22	0,00	61,54	30,25	0,00	76,23
1,00															
3,00	11,74	0,50	5,21	9,43	0,50	5,71	13,63	0,50	11,08	20,36	0,50	43,60	31,86	0,50	59,70
4,00	11,84	0,67	5,15	9,33	0,67	5,59	13,62	0,67	10,65	19,96	0,67	41,86	31,00	0,67	57,33
5,00	11,96	0,84	5,12	9,65	0,84	5,53	13,64	0,84	10,32	19,66	0,84	40,45	30,50	0,84	55,38
6,00	12,08	1,01	5,12	9,77	1,01	5,48	13,68	1,01	10,07	19,45	1,01	39,31	30,11	1,01	53,78
8,00	12,35	1,34	5,18	10,03	1,34	5,47	13,83	1,34	9,76	19,22	1,34	37,71	29,64	1,34	51,50
10,00	12,63	1,68	5,27	10,31	1,68	5,52	14,01	1,68	9,56	19,11	1,68	36,51	29,34	1,68	49,75
12,00	12,92	2,02	5,39	10,60	2,02	5,60	14,24	2,02	9,47	19,14	2,02	35,75	29,23	2,02	48,61
14,00	13,21	2,35	5,52	10,89	2,35	5,70	14,47	2,35	9,42	19,21	2,35	35,12	29,20	2,35	47,63
16,00	13,51	2,69	5,66	11,18	2,69	5,80	14,72	2,69	9,43	19,34	2,69	34,69	29,23	2,69	46,95
20,00	14,10	3,36	5,95	11,78	3,36	6,06	15,25	3,36	9,50	19,66	3,36	34,06	29,38	3,36	45,89
30,00															
35,00															
40,00															
MÁXIMO	14,10	0,00	6,35	11,78	0,00	7,16	15,25	0,00	14,57	21,22	0,00	61,54	31,86	0,00	76,23
MÉDIA	12,38	0,00	5,45	10,12	0,00	5,79	14,00	0,00	10,35	19,67	0,00	40,06	29,98	0,00	53,89
MÍNIMO	9,87		5,12	8,19		5,47	12,87		9,42	19,11		34,06	29,20		45,89
Espessura	Málaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsóvia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia primária	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia primária	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia primária	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia primária	Consumo aquecimento	Consumo primária	Energia primária
0	8,63	5,05	34,21	11,76	3,67	38,58	29,58	1,82	78,49	212,08	1,53	215,89	292,70	0,00	292,70
1															
3	5,01	5,72	26,83	7,44	4,36	29,50	21,15	2,21	58,40	163,29	1,81	167,81	228,33	0,00	228,33
4	4,54	5,89	26,06	6,84	4,53	28,44	19,97	2,31	55,69	156,18	1,89	160,91	218,94	0,00	218,94
5	4,16	6,04	25,49	6,40	4,68	27,71	18,99	2,40	53,49	150,32	1,97	155,25	211,16	0,00	211,16
6	3,86	6,17	25,07	5,96	4,83	26,98	18,20	2,49	51,70	145,48	2,05	150,59	204,69	0,00	204,69
8	3,44	6,38	24,55	5,40	5,05	26,12	17,06	2,62	49,19	138,53	2,17	143,96	195,37	0,00	195,37
10	3,12	6,57	24,21	4,97	5,24	25,52	16,18	2,73	47,27	133,12	2,29	138,84	188,05	0,00	188,05
12	2,91	6,70	24,01	4,68	5,37	25,13	15,58	2,81	45,98	129,45	2,38	135,40	183,05	0,00	183,05
14	2,73	6,81	23,85	4,43	5,49	24,82	15,06	2,89	44,88	126,26	2,46	132,42	178,70	0,00	178,70
16	2,60	6,90	23,75	4,20	5,61	24,54	14,68	2,95	44,07	123,92	2,53	130,24	175,47	0,00	175,47
20	2,40	7,05	23,62	3,97	5,74	24,26	14,07	3,04	42,78	120,10	2,64	126,70	170,21	0,00	170,21
25															
30															
35															
40															
MÁXIMO	8,63		34,21	11,76		38,58	29,58		78,49	212,08		215,89	292,70		292,70
MÉDIA	3,94		25,61	6,00		27,42	18,23		51,99	145,34		150,73	204,24		204,24
MÍNIMO	2,40		23,62	3,97		24,26	14,07		42,78	120,10		126,70	170,21		170,21

## Agência Bancária

Figura D.0.6 - Resultados obtidos para a agência bancária por m<sup>2</sup> de área climatizada.

Espessura	Málaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsóvia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	CAE (€/ano)   Energia embobida /a/Globa/ano	CO2 Eq	Consumo Energia primária	CAE (€/ano)   Energia embobida /a/Globa/ano	CO2 Eq	Consumo Energia primária	CAE (€/ano)   Energia embobida /a/Globa/ano	CO2 Eq	Consumo Energia primária	CAE (€/ano)   Energia embobida /a/Globa/ano	CO2 Eq	Consumo Energia primária	CAE (€/ano)   Energia embobida /a/Globa/ano	CO2 Eq	Consumo Energia primária
0,00	54,88	0,00	12,80	43,46	0,00	13,87	58,53	0,00	25,73	59,55	0,00	90,79	55,69	0,00	127,51
1,00	57,15	0,63	12,08	45,58	0,63	12,93	60,17	0,63	23,40	59,09	0,63	82,40	57,38	0,63	115,70
3,00	57,28	0,84	12,11	45,26	0,84	12,91	60,25	0,84	23,23	59,02	0,84	81,57	57,25	0,84	114,49
4,00	57,42	1,05	12,13	45,40	1,05	12,90	60,35	1,05	23,13	59,01	1,05	80,99	57,15	1,05	113,62
5,00	57,56	1,26	12,16	45,53	1,26	12,93	60,45	1,26	23,03	59,00	1,26	80,42	57,09	1,26	112,78
6,00	57,84	1,68	12,27	45,82	1,68	12,99	60,70	1,68	22,97	59,09	1,68	79,74	57,11	1,68	111,74
8,00	58,14	2,10	12,40	46,11	2,10	13,10	60,96	2,10	22,98	59,24	2,10	79,28	57,20	2,10	111,01
10,00	58,44	2,53	12,56	46,41	2,53	13,24	61,23	2,53	23,04	59,44	2,53	79,02	57,36	2,53	110,55
12,00	58,74	2,95	12,71	46,71	2,95	13,39	61,60	2,95	23,14	59,67	2,95	78,87	57,55	2,95	110,25
14,00	59,04	3,37	12,88	47,02	3,37	13,56	61,81	3,37	23,26	59,92	3,37	78,82	57,78	3,37	110,10
16,00	59,65	4,21	13,23	47,63	4,21	13,89	62,40	4,21	23,52	60,43	4,21	78,75	58,25	4,21	109,83
25,00															
30,00															
35,00															
40,00															
MÁXIMO	59,65	0,00	13,23	47,63	0,00	13,89	62,40	0,00	25,73	60,43	0,00	90,79	58,25	0,00	127,51
MÉDIA	57,83	0,00	12,48	45,90	0,00	13,25	60,75	0,00	23,40	59,41	0,00	80,97	57,25	0,00	113,42
MÍNIMO	54,88		12,08	43,46		12,90	58,53		22,97	59,00		78,75	55,69		109,83

Espessura	Málaga (quente)			Lisboa (moderado)			Valladolid (frio)			Varsóvia (muito frio)			Reykjavik (extremamente frio)		
	Consumo aquecimento/refrig. primária	Consumo Energia primária	Consumo Energia primária	Consumo aquecimento/refrig. primária	Consumo Energia primária	Consumo Energia primária	Consumo aquecimento/refrig. primária	Consumo Energia primária	Consumo Energia primária	Consumo aquecimento/refrig. primária	Consumo Energia primária	Consumo Energia primária	Consumo aquecimento/refrig. primária	Consumo Energia primária	Consumo Energia primária
0	16,18	11,40	68,94	21,35	8,53	74,69	49,79	5,65	138,58	341,11	4,21	351,64	489,62	0,00	489,62
1	13,44	12,00	63,60	18,22	8,99	68,03	43,78	6,01	124,47	307,09	4,60	318,58	443,12	0,00	443,12
3	13,16	12,07	63,08	17,89	9,05	67,36	43,14	6,06	123,01	303,43	4,65	315,05	438,11	0,00	438,11
4	12,95	12,13	62,70	17,65	9,10	66,87	42,68	6,10	121,95	300,74	4,69	312,46	434,41	0,00	434,41
5	12,75	12,18	62,34	17,41	9,15	66,40	42,22	6,13	120,89	298,12	4,73	309,93	430,81	0,00	430,81
6	12,49	12,26	61,87	17,10	9,21	65,78	41,18	6,18	119,52	294,66	4,78	306,61	426,05	0,00	426,05
8	12,30	12,31	61,52	16,87	9,26	65,32	41,18	6,22	118,51	292,08	4,82	304,13	422,50	0,00	422,50
10	12,16	12,35	61,28	16,71	9,30	65,01	40,87	6,25	117,80	290,28	4,85	302,40	420,00	0,00	420,00
12	12,06	12,38	61,10	16,58	9,32	64,77	40,63	6,27	117,26	288,90	4,87	301,08	418,10	0,00	418,10
14	11,98	12,41	60,98	16,50	9,34	64,60	40,47	6,29	116,88	287,92	4,89	300,14	416,75	0,00	416,75
20	11,85	12,45	60,74	16,33	9,38	64,28	40,15	6,31	116,17	286,10	4,92	298,40	414,24	0,00	414,24
25															
30															
35															
40															
MÁXIMO	16,18		68,94	21,35		74,69	49,79		138,58	341,11		351,64	489,62		489,62
MÉDIA	12,85		62,56	17,51		66,64	42,41		121,86	299,13		310,95	432,16		432,16
MÍNIMO	11,85		60,74	16,33		64,28	40,15		116,17	286,10		298,40	414,24		414,24

