



**Hugo de Azevedo Leal**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Avaliação do impacte dos solários no  
desempenho energético de edifícios  
residenciais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Daniel Aelenei, Professor Auxiliar, UNL-FCT

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Arguente: Professora Doutora Maria da Glória Almeida Gomes

Vogal: Professor Doutor Daniel Aelenei



**“Copyright” Hugo Leal, FCT/UNL e UNL**

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







## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Daniel Aelenei por ter colaborado na escolha e orientação deste tema, assim como por toda a disponibilidade demonstrada no decorrer da elaboração desta dissertação. Agradeço o apoio, a partilha de conhecimento e as valiosas contribuições que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À minha família, e em especial aos meus pais, pelo apoio, motivação e incentivos constantes que me proporcionaram ao longo dos anos, fundamentais para a realização deste trabalho e de todo o curso.

Gostaria também de agradecer aos meus amigos, Andreia Santos, Daniela Matos, Fernando Jorne, Hélder Parreira, Hugo Andrade, Ivanildo Gomes, Luís Gomes, Pedro Freire, Pedro Tempera e Ricardo Preguiça, pela amizade.

E à Tânia, por tudo.





## RESUMO

Actualmente a energia desempenha um papel preponderante no bem-estar económico e social. Porém, os seus custos cada vez mais elevados e a debilidade no seu abastecimento motivaram a implementação de políticas com vista a redução do consumo energético em vários sectores. O sector residencial representa 17% do consumo de energia final do país, dos quais cerca de 25% são alusivos à utilização de equipamentos de climatização.

Uma das políticas para a redução do consumo de energia é a reabilitação térmica de edifícios com baixa eficiência energética. Em Portugal Continental, 65% do edificado é anterior à primeira regulamentação térmica, pelo que estes edifícios apresentam baixos níveis de conforto térmico e elevados consumos energéticos. A aplicação de sistemas solares passivos neste tipo de edifícios é bastante apelativa, uma vez que estes sistemas contribuem para o aquecimento e arrefecimento natural.

Este estudo apresenta o desempenho energético da aplicação de um sistema solar passivo de ganho isolado, o solário, aplicado a uma fracção autónoma de um edifício multifamiliar em várias cidades com climas distintos. Esta análise foi realizada recorrendo a duas ferramentas de análise do comportamento térmico de edifícios em regime dinâmico, EnergyPlus e TRNSYS, que permitem um estudo rigoroso do comportamento térmico dos edifícios.

Os resultados obtidos na sequência das análises realizadas indicam que a aplicação do sistema solar passivo do tipo solário está associado a um aumento da eficiência energética da habitação em análise, assim como pode superar o desempenho térmico do sistema ETICS, que é habitualmente aplicado em obras de reabilitação.

**Termos Chave:** Edifícios, Desempenho energético, Solário, Simulação, EnergyPlus, TRNSYS



## ABSTRACT

Nowadays, energy has a fundamental role in social and economic well fare. However, inherent costs and debilities in the supply chain lead to the implementation of guidelines with the purpose of energy consumption reduction in several sectors. The residential sector represents 17% of the final energy consumption in Portugal, with nearly 25% of it being spent on air conditioning equipments.

One of the guidelines to the reduction of energy consumption related to residential buildings is the thermal rehabilitation. In Portugal, 65% of the residential buildings were built before the implementation of the first thermal regulation, so these buildings have low energy efficiency. The usage of solar passive systems in these types of buildings is very attractive since these systems contribute to the natural heating and cooling.

This study presents the energetic performance of an isolated gain solar passive system application – the sunspace – applied to a residence of a multi storey building in several cities with distinct climates. This analysis was carried out using two different tools that allow a study of a building's thermal behavior, EnergyPlus and TrnSys. This software provided an accurate study of the building's thermal performance.

The application of sunspaces resulted in an increase of the residence's energy efficiency. It also proved to have a better thermal behavior than the ETICS system, which is commonly used in thermal rehabilitation works.

**Key Words:** Buildings, Energetic performance, Sunspace, Simulation, EnergyPlus, TRNSYS



## ÍNDICE

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 1.       | Introdução.....  | 1  |
| 1.1.     | Motivação e Enquadramento do Tema .....                          | 1  |
| 1.2.     | Objectivo.....   | 2  |
| 1.3.     | Metodologia de Trabalho.....                                     | 2  |
| 1.4.     | Organização da dissertação.....                                  | 3  |
| 2.       | Estado do Conhecimento .....                                     | 5  |
| 2.1.     | O Edificado Nacional .....                                       | 5  |
| 2.1.1.   | Caracterização Térmica do Parque Habitacional.....               | 5  |
| 2.1.2.   | A Evolução das Soluções Construtivas de Paredes Exteriores.....  | 6  |
| 2.1.3.   | Potencial da Reabilitação Térmica do Edificado.....              | 7  |
| 2.2.     | Sistemas Solares Passivos .....                                  | 8  |
| 2.2.1.   | Caracterização do sistema .....                                  | 9  |
| 2.2.2.   | Aplicação do sistema.....  | 11 |
| 2.2.3.   | Comportamento Térmico dos Solários.....                          | 13 |
| 2.2.3.1. | Trocas de calor por radiação.....                                | 13 |
| 2.2.3.2. | Armazenamento de Calor .....                                     | 14 |
| 2.2.3.3. | Trocas de Calor por condução .....                               | 15 |
| 2.2.3.4. | Trocas de Calor por convecção .....                              | 16 |
| 2.2.4.   | Estratégias de Utilização .....                                  | 17 |
| 2.2.4.1. | Aquecimento.....   | 17 |
| 2.2.4.2. | Arrefecimento .....  | 17 |
| 2.2.5.   | Exemplos de Aplicação na Reabilitação .....                      | 18 |
| 3.       | Metodologia do Trabalho.....                                     | 21 |
| 3.1.     | Considerações Iniciais.....                                      | 21 |
| 3.2.     | Análise do Comportamento Térmico com Recurso ao RCCTE.....       | 25 |
| 3.3.     | Análise do comportamento térmico com recurso ao EnergyPlus ..... | 26 |
| 3.3.1.   | Descrição da Ferramenta .....                                    | 27 |
| 3.3.2.   | Balanço Energético .....   | 29 |
| 3.3.3.   | Contabilização dos Ganhos solares.....                           | 30 |
| 3.3.4.   | Contabilização da Convecção.....                                 | 30 |
| 3.3.5.   | Contabilização da Ventilação Natural .....                       | 31 |
| 3.4.     | Análise do comportamento térmico com recurso ao TRNSYS .....     | 32 |
| 3.4.1.   | Descrição da Ferramenta .....                                    | 33 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.4.2. Contabilização dos Ganhos solares.....  | 34  |
| 3.5. Comparação das Ferramentas de Análise Dinâmica.....   | 35  |
| 4. Análise de Resultados.....  | 37  |
| 4.1. Modelos Iniciais.....   | 37  |
| 4.1.1. Modelo#1 – Varanda em toda a largura da fachada Sul.....  | 38  |
| 4.1.2. Modelo #2 – Varanda adjacente com largura de 4m na fachada Sul.....   | 40  |
| 4.1.3. Modelo #3 – Varanda semi-integrada com largura de 4m na fachada Sul.....  | 40  |
| 4.1.4. Modelo #4 – Varanda integrada com largura de 4m na fachada Sul.....   | 41  |
| 4.2. Comparação da Eficiência Energética da aplicação do solário com as Ferramentas de Análise Dinâmica.....   | 41  |
| 4.2.1. Necessidades Energéticas de Aquecimento.....  | 42  |
| 4.2.2. Necessidades Energéticas de Arrefecimento.....  | 43  |
| 4.2.3. Necessidades Energéticas Anuais de Climatização.....  | 45  |
| 4.3. Análise de Sensibilidade.....   | 46  |
| 4.3.1. Tipo e Área do Envidraçado.....   | 47  |
| 4.3.2. Tipo de Dispositivo de Sombreamento.....  | 50  |
| 4.3.3. Contribuição da Ventilação Natural.....   | 52  |
| 4.3.4. Planeamento das Estratégias de Arrefecimento.....   | 54  |
| 4.3.5. Orientação.....   | 55  |
| 4.4. Soluções Óptimas.....   | 57  |
| 4.4.1. Faro.....   | 57  |
| 4.4.2. Lisboa.....   | 59  |
| 4.4.3. Évora.....  | 60  |
| 4.4.4. Coimbra.....  | 62  |
| 4.4.5. Porto.....  | 63  |
| 4.4.6. Bragança.....   | 65  |
| 4.5. Comparação com Sistema ETICS.....   | 66  |
| 4.5.1. Modelo #4.....  | 67  |
| 4.5.2. Modelo #3.....  | 68  |
| 5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....  | 71  |
| BIBLIOGRAFIA.....  | 75  |
| Anexo A - Resultados das Necessidades Energéticas dos modelos Iniciais da Fracção Autónoma...  | 79  |
| Anexo B - Resultados das Necessidades Energéticas da Comparação da Eficiência Energética da Aplicação do Solário com as Ferramentas de Análise Dinâmica..... | 83  |
| Anexo C - Resultados das Necessidades Energéticas da Análise de Sensibilidade.....   | 87  |
| Anexo D - Resultados das Necessidades Energéticas da Análise Comparativa com o Sistema ETICS.....  | 103 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Edifícios anteriores ao primeiro RCCTE a necessitar de reparação .....  | 6  |
| Figura 2.2 - Aquecimento do interior da habitação através de a) ventilação natural e b) ventilação mecânica [15] .....   | 9  |
| Figura 2.3 - Actuação do solário como barreira às condições externas [15] .....  | 10 |
| Figura 2.4 - Tipologias de Solários .....  | 10 |
| Figura 2.5 - Aspecto da fachada antes e depois da aplicação de solário [17] .....  | 11 |
| Figura 2.6 - Esquema de composição de um solário .....   | 12 |
| Figura 2.7- Esquema exemplificativo de trocas de calor por radiação nos elementos do solário: parcela da radiação absorvida ( $\alpha$ ), parcela da radiação reflectida ( $\rho$ ) e parcela da radiação transmitida ( $\tau$ ) ..... | 13 |
| Figura 2.8 - Esquema exemplificativo do fluxo de calor por condução no solário .....   | 15 |
| Figura 2.9 - Esquema exemplificativo das trocas de calor por convecção do sistema no Inverno (a) e no Verão (b) .....  | 16 |
| Figura 2.10 - Edifício APT Engelsby antes (a) e após (b) a reabilitação [18] .....   | 18 |
| Figura 2.11 - Edifício em Vale Rosal (Charneca da Caparica) e Residência M. João Delgado (Porto) [25] .....  | 19 |
| Figura 3.1 - Planta original da habitação em estudo .....  | 22 |
| Figura 3.2 - Planta e alçado Norte e Sul do modelo .....   | 22 |
| Figura 3.3 - Esquema da geometria dos quatros modelos da fracção autónoma .....  | 23 |
| Figura 3.4 - Diagrama de integração de processos do <i>EPlus</i> [25] .....  | 27 |
| Figura 3.5 – Exemplo de interface do utilizador no <i>IDF Editor</i> do <i>EPlus</i> .....   | 28 |
| Figura 3.6 – Exemplo de interface do utilizador no <i>EP-Launch</i> do <i>EPlus</i> .....  | 29 |
| Figura 3.7 - Zonas convexas (a) e não convexas (b) [31] .....  | 30 |
| Figura 3.8 – Exemplo de interface do utilizador no <i>TRNBuild</i> do <i>TRNSYS</i> .....  | 33 |
| Figura 3.9 – Exemplo de interface do utilizador no <i>Simulation Studio</i> do <i>TRNSYS</i> .....   | 34 |
| Figura 3.10 - Balanço energético da envolvente vertical na análise dinâmica .....  | 35 |
| Figura 4.1 - Necessidades energéticas de aquecimento do modelo #1 sem solário .....  | 38 |
| Figura 4.2 - Necessidades energéticas de arrefecimento do modelo #1 sem solário .....  | 39 |
| Figura 4.3 - Necessidades energéticas anuais de climatização do modelo #1 sem solário .....  | 39 |
| Figura 4.4 - Necessidades energéticas anuais do modelo #2 sem solário .....  | 40 |
| Figura 4.5 - Necessidades energéticas anuais do modelo #3 sem solário .....  | 40 |
| Figura 4.6 - Necessidades energéticas anuais do modelo #4 sem solário .....  | 41 |
| Figura 4.7 - Necessidades energéticas de aquecimento da análise dinâmica com o <i>EPlus</i> .....  | 43 |
| Figura 4.8 - Necessidades energéticas de aquecimento da análise dinâmica com o <i>TRNSYS</i> .....   | 43 |
| Figura 4.9 - Necessidades energéticas de arrefecimento da análise dinâmica com o <i>EPlus</i> .....  | 44 |
| Figura 4.10 - Necessidades energéticas de arrefecimento da análise dinâmica com o <i>TRNSYS</i> .....  | 44 |
| Figura 4.11 - Necessidades energéticas anuais da análise dinâmica com o <i>EPlus</i> .....   | 45 |
| Figura 4.12 - Necessidades energéticas anuais da análise dinâmica com o <i>TRNSYS</i> .....  | 45 |
| Figura 4.13 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização do envidraçado para o Modelo #1 ..   | 48 |
| Figura 4.14 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização do envidraçado para o Modelo #4 ..   | 49 |
| Figura 4.15 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização do sombreamento para o Modelo #1 ..  | 51 |
| Figura 4.16 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização com ventilação natural para o Caso #1 ..   | 53 |
| Figura 4.17 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização com planeamento para o Caso #1 ..  | 54 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.18 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização com variação da orientação .....                    | 56 |
| Figura 4.19 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções ótimas em Faro .....                          | 58 |
| Figura 4.20 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções ótimas em Lisboa .....                        | 60 |
| Figura 4.21 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções ótimas em Évora .....                         | 61 |
| Figura 4.22 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções ótimas em Coimbra .....                       | 63 |
| Figura 4.23 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções ótimas no Porto .....                         | 64 |
| Figura 4.24 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções ótimas em Bragança .....                      | 66 |
| Figura 4.25 - Necessidades Energéticas de Climatização para o modelo #4 com várias soluções<br>construtivas ..... | 67 |
| Figura 4.26 - Necessidades Energéticas de Climatização para o modelo #3 com várias soluções<br>construtivas ..... | 68 |



## ÍNDICE DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 2.1 - Propriedades dos vidros correntemente utilizados [20].....   | 14 |
| Quadro 2.2 - Propriedades de materiais correntemente utilizados com boa inércia térmica [22] .....  | 15 |
| Quadro 2.3 - Coeficientes de Transmissão Térmica dos elementos do sistema.....  | 16 |
| Quadro 3.1 - Parâmetros do solário analisados.....  | 24 |
| Quadro 3.2 - Coeficiente de transmissão térmica máxima de elementos opacos verticais .....  | 25 |
| Quadro 3.3 - Fenómenos de transferência de calor no cálculo das necessidades energéticas do RCCTE .....                                       | 26 |
| Quadro 4.1 - Simulações realizadas na comparação da eficiência energética da aplicação do solário com as ferramentas de análise dinâmica..... | 42 |
| Quadro 4.2 - Redução das Necessidades Energéticas Totais de Climatização para a melhor situação .....   | 46 |
| Quadro 4.3 - Plano de funcionamento das Estratégias de Arrefecimento .....  | 54 |
| Quadro 4.4 - Melhor solução de solário para cada cidade .....   | 56 |
| Quadro 4.5 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial no Porto .....  | 57 |
| Quadro 4.6 - Energéticas de climatização para a situação inicial em Lisboa.....   | 59 |
| Quadro 4.7 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções óptimas em Évora.....  | 60 |
| Quadro 4.8 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial em Coimbra.....   | 62 |
| Quadro 4.9 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial no Porto .....  | 63 |
| Quadro 4.10 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial em Bragança .....  | 65 |



## SÍMBOLOS

$N_{ic}$  – Necessidades energéticas de aquecimento [Kw/h.m<sup>2</sup>.ano]

$N_{vc}$  – Necessidades energéticas de arrefecimento [Kw/h.m<sup>2</sup>.ano]

$q_i$  – Ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento [W/m<sup>2</sup>]

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica [W/m<sup>2</sup>.°C]



## ABREVIATURAS

BESTEST – Bulding Energy Simulation Test

BLAST - Building Loads Analysis and System Thermodynamics

DOE – United States Department of Energy

DL – Decreto de Lei

EPlus – EnergyPlus

EPS – Expandable Polystyrene (poliestireno expandido moldado)

ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems

HVAC - Heating, Ventilating and Air Conditioning

IDF – Input Data File

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P. (actualmente designado por LNEG)

PNAEE – Plano Nacional de Acção Para a Eficiência Energética

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

TRNSYS – Transient System Simulation Program



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

Tendo em conta as tendências verificadas ao longo das últimas décadas na União Europeia no que diz respeito ao aumento do consumo de energia e da dependência das importações de petróleo e gás, torna-se necessário a redução do consumo energético. Com esse intuito foi aprovado o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) em 2008, cujo objectivo é a promoção da eficiência energética e o uso de energia renovável, tendo em vista a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e o aumento da independência energética e financeira nacional face a crises energéticas externas. Este plano contempla ainda várias medidas para a redução do consumo final de energia em 20% até 2020, abrangendo os sectores de Transportes, Residencial, Serviços, Indústria e Estado [1].

O sector residencial representa cerca de 17% do consumo de energia final do país [2]. O aumento do consumo energético neste sector deve-se à crescente utilização de equipamentos ligados às necessidades de conforto térmico. A utilização de equipamentos de climatização está relacionada com o aumento do conforto e bem-estar no interior das habitações.

O consumo alusivo aos equipamentos de climatização em Portugal representa 25% da energia consumida no sector residencial [2]. De acordo com a Directiva Europeia relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD), é possível reduzir este tipo de consumo energético mantendo um nível apropriado de conforto térmico no interior da habitação. Para tal diversas soluções ao nível da envolvente dos edifícios podem ser aplicadas. Neste âmbito a certificação energética tem um papel fundamental na melhoria da eficiência energética dos edifícios [3].

Com a publicação do primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) em 1991, foram introduzidas novas exigências definindo características térmicas de referência para os elementos construtivos. Este regulamento originou uma melhoria da qualidade das novas construções, nomeadamente o aumento da qualidade térmica da envolvente opaca e translúcida, a optimização da orientação da envolvente translúcida de modo a promover os ganhos solares e a utilização de sombreamento e ventilação natural [4]. Em virtude da necessidade do aumento da eficiência energética dos edifícios e da promoção da energia renovável, este regulamento foi reformulado e substituído pelo actual RCCTE em 2006 [4]. Este novo regulamento

introduziu um aumento das exigências térmicas no projecto de edifícios, tendo em vista uma redução do consumo energético de equipamentos para fins de aquecimento e arrefecimento. Pretende-se que os edifícios abrangidos por esta regulamentação sejam mais eficientes termicamente e que proporcionem maiores níveis de conforto.

Em Portugal Continental 65% do edificado é anterior à publicação do primeiro RCCTE, pelo que grande parte destes edifícios apresenta baixos níveis de conforto e elevados consumos energéticos para a climatização do ambiente interior [5]. Por este motivo o processo de reabilitação urbana tem um grande potencial de ganhos de eficiência energética, dado que permite a melhoria das características térmicas da envolvente opaca e translúcida, bem como a aplicação de técnicas solares passivas, que promovem os ganhos de calor.

A utilização de sistemas solares passivos é uma solução apelativa na reabilitação de edifícios, uma vez que contribui para o aquecimento (e arrefecimento) natural, reduzindo deste modo os consumos energéticos referentes à climatização, potenciando a melhoria do conforto térmico. Ainda que Portugal tenha um clima vantajoso para a aplicação de técnicas passivas, estas não têm sido implementadas em larga escala devido à falta de sensibilização e incentivos nesta área.

A actual crise económica originou uma quebra acentuada na construção de edifícios novos. Consequentemente verificou-se o aumento das obras de reabilitação de edifícios, prevendo-se que esta tendência se mantenha a curto prazo [6], pelo que é de perspectivar que sejam criados incentivos à reabilitação urbana. Seria interessante a promoção das técnicas solares passivas através de incentivos fiscais, visto que a aplicação deste tipo de soluções iria reduzir a dependência energética para efeitos de climatização das habitações e contribuiria para a redução do consumo energético no sector residencial.

## **1.2. OBJECTIVO**

O objectivo desta dissertação é avaliar o desempenho térmico de um sistema solar passivo - solário - quando aplicado a um edifício de habitação multifamiliar localizado em várias zonas climáticas do território continental. Pretende-se analisar a eficiência deste sistema em termos de redução dos consumos energéticos de climatização do edifício e comparar este tipo de solução com outra habitualmente utilizada na reabilitação térmica de edifícios como é o caso da aplicação de isolamento térmico pelo exterior denominado por ETICS.

## **1.3. METODOLOGIA DE TRABALHO**

Primeiramente será feita uma análise a uma fracção autónoma tomada como caso de estudo, localizada nos vários concelhos escolhidos, recorrendo a duas ferramentas de simulação computacional – o *TRNSYS* [7] e o *EnergyPlus* [8], ferramentas que permitem realizar uma análise do



comportamento térmico do edifício em regime dinâmico. Estes resultados serão posteriormente comparados com os resultados equivalentes obtidos com recurso ao método simplificado fornecido pela metodologia indicada no RCCTE, metodologia essa que permite efectuar uma análise do comportamento térmico do edifício em regime estacionário.

O desempenho energético da fracção autónoma dotada de solário será analisado em regime dinâmico através das ferramentas *TRNSYS* e *EPlus*, sendo testadas as várias tipologias mais comuns de solários.

Posteriormente os parâmetros que compõem o sistema serão analisados detalhadamente, apenas com recurso ao *EPlus*, de modo a averiguar o seu impacto na redução das necessidades energéticas. Deste modo são também apuradas os modelos energeticamente mais eficientes em cada concelho.

Por último far-se-á uma análise comparativa entre as soluções óptimas encontradas para cada cidade e a solução mais utilizada ao nível da reabilitação térmica das envolventes opacas externas, o sistema ETICS, recorrendo novamente ao *EPlus*.

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos de acordo com a descrição que se apresenta de seguida:

No primeiro capítulo é realizado um enquadramento do presente estudo e são definidos os objectivos, a metodologia e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é feita uma caracterização do edificado nacional, sendo também apresentada a evolução das soluções construtivas e o potencial da reabilitação térmica do edificado em Portugal. Ainda neste capítulo é caracterizado o sistema passivo em estudo, a sua aplicação e o seu comportamento térmico. Por fim são apresentados alguns exemplos de aplicação.

No terceiro capítulo é descrito o modelo da fracção autónoma utilizado e as considerações iniciais inerentes à realização da análise do comportamento térmico. É também apresentada a metodologia do trabalho e descrito o método simplificado da análise do comportamento térmico do edifício em regime estacionário, assim como são descritas as características principais das duas ferramentas de análise do comportamento térmico dos edifícios em regime dinâmico.

No quarto capítulo são apresentados os resultados em termos de necessidades energéticas dos modelos iniciais e da análise comparativa do impacte do solário nos modelos da fracção autónoma. Neste capítulo são ainda apresentados os resultados da análise dinâmica e os resultados óptimos para cada cidade, bem como os resultados da comparação entre os sistemas solar passivo e ETICS.

No quinto capítulo são descritas as conclusões.



# CAPÍTULO 2

## ESTADO DO CONHECIMENTO

Neste capítulo será caracterizado o edificado nacional do ponto de vista térmico assim como o seu potencial de reabilitação. Posteriormente será realizada a descrição do sistema solar passivo em estudo ao nível do seu comportamento térmico, da sua aplicação, das estratégias de utilização e exemplos de aplicação do sistema na reabilitação.

### 2.1. O EDIFICADO NACIONAL

#### 2.1.1. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO PARQUE HABITACIONAL

Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), 35% dos edifícios do parque habitacional existente situam-se na região Norte do País, 31,2% na região Centro e 12,5% na região de Lisboa, sendo que as restantes regiões em conjunto representam cerca de 21,3% do total de edifícios existentes em Portugal [6]. Quanto ao tipo de edifícios, a maior percentagem é representada pela habitação unifamiliar, que em 2006, representava aproximadamente 60% do edificado nacional [6].

Os edifícios construídos antes da entrada em vigor do primeiro RCCTE, em 1991, apresentam diversas carências, especialmente no que diz respeito à qualidade térmica da envolvente, com consequências no conforto térmico e saúde dos seus ocupantes, assim como o aparecimento de patologias nos elementos construtivos do edifício. Estima-se que, do total de edifícios construídos antes de 1991, aproximadamente 45% necessita de reparação [9].

Analisando a figura 2.1, que representa as necessidades de reparação por época de construção, observa-se a existência de uma forte relação entre a idade dos edifícios e o seu estado de conservação. Para além da idade do parque habitacional existem outros factores que afectam o estado de conservação dos edifícios, tais como a qualidade da construção e a correcta utilização destes edifícios por parte daqueles que neles habitam.

Após a publicação da primeira regulamentação térmica verificaram-se melhorias na construção com um aumento na qualidade térmica das soluções construtivas dos edifícios, tendo como consequência um aumento do conforto térmico no interior dos mesmos.

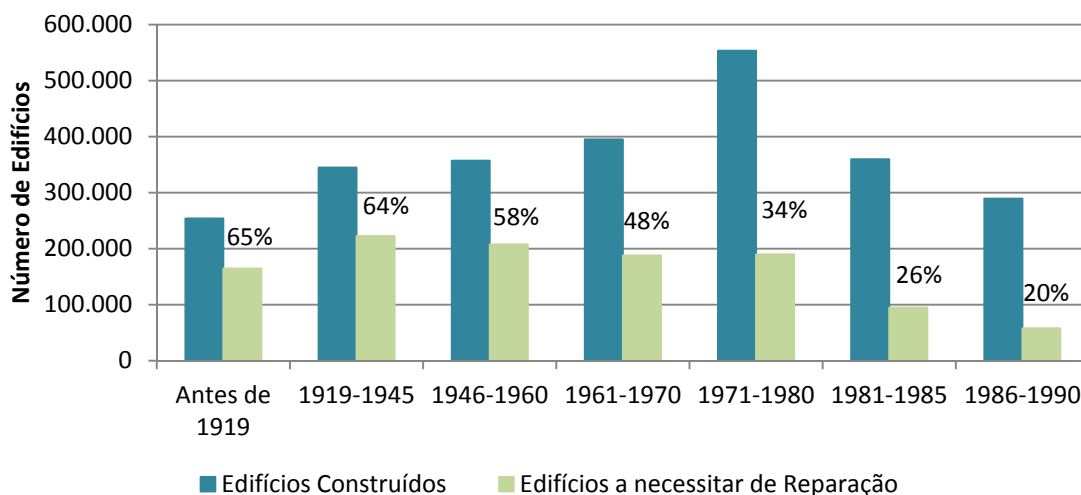


Figura 2.1 - Edifícios anteriores ao primeiro RCCTE a necessitar de reparação

### 2.1.2. A EVOLUÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE PAREDES EXTERIORES

A qualidade das soluções construtivas depende em grande medida dos materiais utilizados. No recenseamento demográfico nacional de 2001 foi estimado que cerca de 31% dos edifícios tinham uma estrutura de betão armado, cerca de 40% dos edifícios apresentavam lajes de elementos pré-fabricados suportadas por paredes de alvenaria e aproximadamente 18% dos edifícios eram compostos por paredes de alvenaria e pavimentos de madeira. Existiam ainda cerca 11% de edifícios constituídos por paredes de adobe, taipa ou alvenaria de pedra solta e os restantes 0,5% apresentavam uma estrutura composta por outros materiais. No que diz respeito ao revestimento exterior, 62% dos edifícios tinham reboco tradicional ou marmorite, aproximadamente 18% tinham o betão à vista, cerca de 15% eram revestidos por pedra, apenas 5% por ladrilhos ou pastilhas cerâmicas e 1% por outros materiais [9].

Antes da introdução da primeira regulamentação térmica em Portugal não existiam quaisquer regras de cumprimento de exigências de conforto térmico, pelo que as preocupações na execução e na escolha de soluções construtivas que garantissem o conforto térmico no interior dos edifícios eram limitadas.

Relativamente às soluções construtivas de paredes exteriores, sabe-se que nos anos 1940 as soluções mais usadas foram paredes simples de tijolo maciço ou perfurado, espessas. Com o aparecimento de novas técnicas e materiais as paredes simples caíram em desuso e surgiram nos anos 1950 paredes de pedra com pano interior de tijolo furado com caixa-de-ar. As paredes de pano duplo foram evoluindo e nos anos 1960-70 tinha-se paredes duplas de tijolo com um pano espesso. Nos anos 1980 utilizavam-se também paredes duplas mas com panos de espessura média ou reduzida [10]. É perceptível a falta de soluções para promover o conforto térmico nos edifícios anteriores à publicação do RCCTE.

A publicação do primeiro RCCTE em 1991 veio introduzir os aspectos térmicos e energéticos no estudo e projecto de edifícios. Este regulamento definiu vários requisitos, sendo um deles o valor máximo do coeficiente de transmissão térmica,  $U$ , da envolvente exterior. Esta nova exigência conduziu ao recurso generalizado de isolamento térmico na construção, pelo que nos anos 1990 a solução construtiva mais utilizada para a envolvente exterior passou a ser parede dupla de tijolo furado com isolamento térmico, preenchendo total ou parcialmente a caixa-de-ar [10].

O novo RCCTE, publicado em 2006, representa uma evolução em relação ao anterior com um aumento de requisitos e a introdução de novos parâmetros de cálculo. Um dos objectivos declarados do novo RCCTE é a satisfação das condições de conforto térmico no interior dos edifícios sem necessidades excessivas de energia quer no Inverno, quer no Verão. Também foi dada uma maior atenção à qualidade da construção de modo a garantir a minimização de efeitos patológicos nos edifícios devido a condensações na superfície e no interior dos elementos da envolvente.

### **2.1.3. POTENCIAL DA REABILITAÇÃO TÉRMICA DO EDIFICADO**

A generalidade das soluções construtivas utilizadas em construções prévias ao RCCTE é de fraca qualidade térmica, o que tem reflexos em termos de conforto dos ocupantes. O aumento do consumo de energia relacionado com a utilização, cada vez mais frequente, de equipamentos de aquecimento e arrefecimento conduziu ao aumento dos gastos de energia para efeitos de climatização [11].

Como a satisfação das condições de conforto com recurso aos equipamentos de climatização aumenta a energia despendida, que não é o pretendido pois o desejável será reduzir a factura energética, tem-se que a reabilitação térmica será fundamental para melhorar o conforto térmico do interior destes edifícios. Uma das intervenções mais comuns de reabilitação térmica ao nível da envolvente opaca tem sido a aplicação de sistemas de isolamento térmico pelo exterior, sendo o sistema ETICS o mais utilizado neste âmbito. Este tipo de sistema aumenta o nível do isolamento térmico e minimiza o risco de ocorrência de condensações superficiais interiores. Os isolantes térmicos mais comuns deste tipo de sistema são as placas de poliestireno expandido moldado (EPS) e poliestireno expandido extrudido (XPS). A espessura de isolamento térmico usualmente aplicado neste tipo de soluções é de 30mm [12]. Para a aplicação deste sistema é necessária mão-de-obra especializada e qualidade na execução para que o desempenho térmico seja o melhor possível. Porém, este tipo de soluções tem um custo elevado, o que pode comprometer a viabilidade da sua aplicação.

As técnicas solares passivas, que têm como princípio o aproveitamento da radiação solar para o aquecimento natural dos edifícios, quando aplicadas na reabilitação tornam possível a melhoria do conforto dos ocupantes sem dispêndios excessivos de energia com equipamentos de climatização. Os edifícios construídos posteriormente à implementação de regulamentação térmica podem também beneficiar com a integração de sistemas solares passivos de modo a reduzir as suas necessidades energéticas relativas à climatização. A melhoria do conforto térmico e redução do consumo energético

dos edifícios são razões que validam a implementação de medidas concretas de incentivo à reabilitação energética do edificado nacional.

## **2.2. SISTEMAS SOLARES PASSIVOS**

A utilização dos sistemas solares passivos tem vindo a aumentar nos últimos anos devido à crescente preocupação em reduzir os consumos energéticos nas habitações. Estes sistemas têm por base o aproveitamento da radiação solar para o aquecimento no Inverno e a redução destes mesmos ganhos na estação de arrefecimento, diminuindo assim o recurso a equipamentos de climatização.

O clima e a orientação do edifício desempenham um papel fulcral no funcionamento dos sistemas passivos e no tipo de estratégias a aplicar para a sua eficiência, sendo que a radiação solar é essencial para funcionamento destes.

No hemisfério Norte a maior área de envidraçado deve estar orientada a Sul, pois é nela que incide maior radiação solar, o que contribui para o aquecimento passivo da habitação no Inverno. No Verão o efeito da radiação solar pode ser minorado recorrendo a palas, varandas ou outros pormenores arquitectónicos devido ao seu elevado ângulo de incidência. Um sistema deste género orientado a Este ou Oeste não será tão eficiente pois, ao contrário do que se sucede no Verão, estas orientações recebem pouca radiação no Inverno, o que faz com que não se verifiquem tantos ganhos na estação de aquecimento e seja aumentado o risco de sobreaquecimento na estação de arrefecimento. A orientação Norte é a que recebe menos radiação ao longo de todo o ano, pelo que um sistema solar passivo com esta orientação não vai ter tanto impacto como um localizado a Sul [13].

Para além da orientação do edifício é também importante conhecer a especificidade do clima da zona em que o edifício se localiza, dado que as estratégias a adoptar para o sistema passivo também dependem das temperaturas exteriores. Um edifício localizado em zonas em que os Invernos são mais rigorosos terá mais necessidades de aquecimento, e em zonas com Verões mais rigorosos terá maiores necessidades de arrefecimento, pelo que o sistema passivo deverá ser optimizado tendo por base o clima em que o edifício está inserido.

Existem vários tipos de sistemas solares passivos que podem ser aplicados aos edifícios, sendo que os mais comuns são os de ganho directo, ganho indirecto e ganho isolado [13].

Os sistemas de ganho directo baseiam-se em vãos envidraçados bem orientados, de modo a captar a radiação solar para que esta incida directamente nas paredes e no pavimento, aquecendo assim o interior do edifício [13].

Nos sistemas de ganho indirecto tem-se um elemento de grande massa térmica localizado entre o vão envidraçado e o interior do edifício com o propósito de armazenar calor. A Parede de Trombe é o sistema de ganho indirecto mais usual.

Um sistema de ganho isolado consiste numa zona térmica adjacente ao edifício que capta e armazena energia. O aquecimento passivo do interior do edifício dá-se através da transmissão de energia da zona térmica adjacente. O sistema de ganho isolado mais utilizado é o solário, também é conhecido por outras nomenclaturas como jardim de inverno, estufa e marquise quando aplicado a edifícios multifamiliares. O sistema abordado na presente dissertação é um sistema de ganho isolado que será sempre referido como solário, o que respeita a nomenclatura definida no RCCTE para este tipo de espaço.

### 2.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

Um solário é um compartimento adjacente ao interior da habitação caracterizado por grande área de envidraçado, preferencialmente orientado a Sul, onde, como se viu anteriormente, a radiação solar tem mais incidência. A principal função de um sistema deste género é armazenar a radiação solar através da envolvente exterior envidraçada, convertendo-a posteriormente em calor que será absorvido pelos espaços interiores adjacentes. Os espaços interiores estão separados dos solários por uma parede de pedra, betão, ou outro material com boa capacidade de armazenamento térmico (com elevada inércia térmica), que poderá ser pintada na face exterior com uma cor escura de modo a potenciar a absorção dos raios solares [14].

Os solários podem ainda conter orifícios na parede que os separa do interior de modo a criar um ciclo de convecção natural. Deste modo o ar quente proveniente do solário entra no interior do edifício, de onde sai ar frio que será posteriormente aquecido no solário, tornando desta forma mais eficiente o aquecimento no interior da habitação [14]. Podem também ser empregues sistemas mecânicos de ventilação para facilitar a distribuição do ar quente pelo edifício, podendo assim chegar a espaços não adjacentes ao solário. É possível observar o aquecimento do interior da habitação através dos dois tipos de ventilação na figura 2.2.

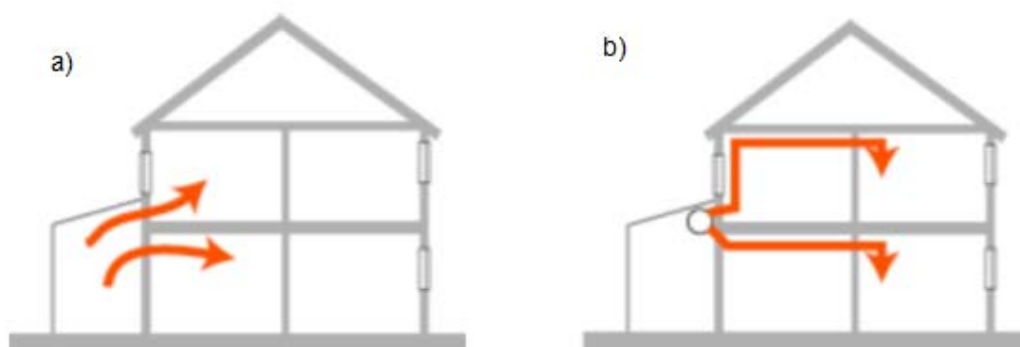


Figura 2.2 - Aquecimento do interior da habitação através de a) ventilação natural e b) ventilação mecânica [15]

O solário funciona como uma zona térmica independente do interior da habitação. Tratando-se de um espaço intermédio entre o interior e o exterior do edifício, actua como uma protecção extra ao vento, à chuva e às temperaturas exteriores, atenuando as perdas de calor pela envolvente, como se pode observar na figura 2.3 [16].

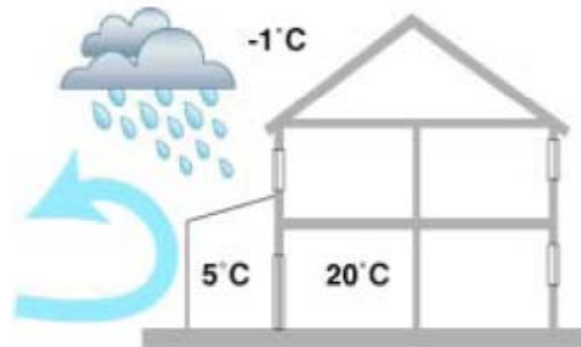


Figura 2.3 - Actuação do solário como barreira às condições externas [15]

Quando utilizados correctamente, os solários podem fazer uma diferença significativa no aumento da eficiência energética. Contudo, quando usados inapropriadamente, podem igualmente aumentar o gasto energético, pelo que é importante a definição de estratégias de utilização.

Para além da redução da dependência de aparelhos mecânicos para a climatização do interior da habitação, ainda se pode dar o aproveitamento da área do solário como um espaço agradável de estar para os ocupantes na estação de aquecimento ou como um jardim de Inverno [14].

As três tipologias mais comuns de integração dos solários são: (a) o adjacente, (b) o semi-integrado e (c) o integrado, como se pode observar na figura 2.4 [14].

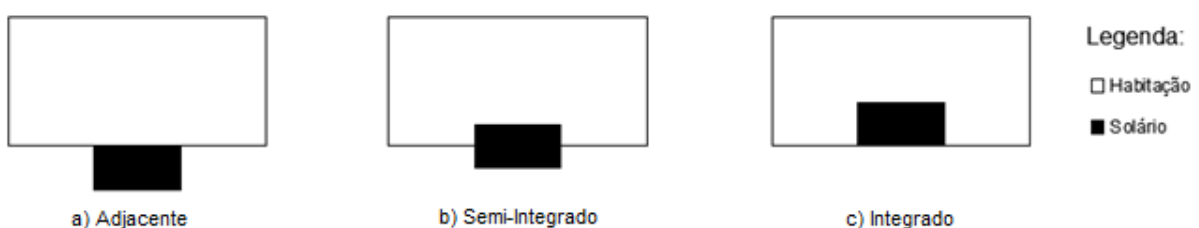


Figura 2.4 - Tipologias de Solários

A tipologia mais tradicional é a adjacente. Este tipo de solário pode funcionar como sombreamento às áreas adjacentes da fachada, reduzindo a incidência de luz natural nos espaços adjacentes. O solário integrado, por outro lado, não restringe a luz natural incidente nas janelas adjacentes. Para além disso, é menos susceptível a falhas na sua utilização devido à falta de conhecimento dos ocupantes,



já que por ter menor área de envidraçado tem menos riscos de sobreaquecimento. Ao solário semi-integrado estão associadas características das duas tipologias comentadas anteriormente [10].

Este tipo de sistema passivo pode ser implementado tanto em construções novas como em obras de reabilitação. Por vezes os solários são criados apenas com o intuito do aproveitamento do espaço de uma varanda e os benefícios térmicos não são conhecidos. Esta situação é recorrente nos edifícios multifamiliares, dotados de marquises (varandas fechadas) onde não existe qualquer aproveitamento do ponto de vista térmico devido à falta de conhecimento dos utilizadores. É também comum a utilização de um solário como estufa, o que implica que o espaço esteja otimizado para o crescimento de plantas, situação que nem sempre beneficia o aquecimento. A existência de humidade, bolor, insectos e poeiras são inerentes à presença das plantas, o que faz com que o espaço se torne desconfortável e pouco saudável, desviando-se assim do conceito de solário [16].

Apesar das questões estéticas levantadas em relação a este tipo de sistema, especialmente quando aplicado a edifícios multifamiliares, a sua implementação é uma mais-valia uma vez que, para além de constituir um espaço suplementar, também promove o aquecimento passivo da habitação. É possível observar-se na figura 2.5 a mudança do aspecto de uma fachada de um edifício com a aplicação deste sistema.



Figura 2.5 - Aspecto da fachada antes e depois da aplicação de solário [17]

Um solário otimizado pode reduzir significativamente a necessidade do uso de aparelhos mecânicos de climatização proporcionando conforto térmico aos ocupantes da habitação. Este sistema pode ainda ser visto como um investimento rentável na medida em que, ao reduzir o consumo energético inerente à climatização do interior do edifício, acabará também por reduzir a factura energética.

### **2.2.2. APLICAÇÃO DO SISTEMA**

Os solários são sistemas solares passivos de ganho isolado pois funcionam como uma zona isolada da habitação. Existem vários factores a ter em conta no projecto destes sistemas, assim como

diferentes estratégias de utilização de modo a otimizar a sua eficiência. É possível observar na figura 2.6 a composição de um sistema deste género.

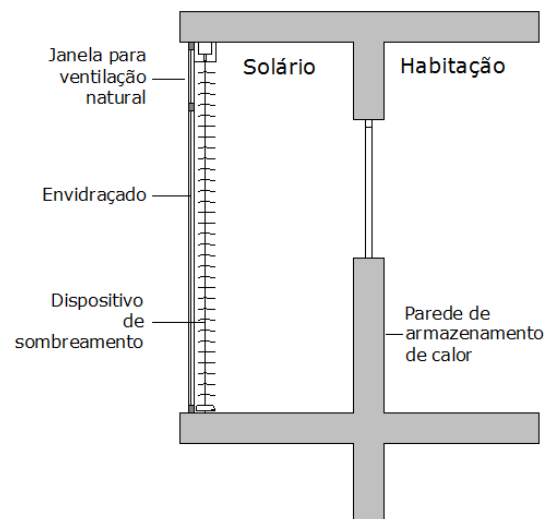


Figura 2.6 - Esquema de composição de um solário

A criação de um solário numa habitação de um edifício multifamiliar é bastante simples, uma vez que basta fechar os vãos de uma varanda com envidraçado, criando assim uma nova zona térmica. A figura anterior é representativa de um solário aplicado a um edifício multifamiliar, que pode ter maior ou menor área de envidraçado consoante o pretendido. Este sistema pode ser aplicado tanto a edifícios existentes como a edifícios novos. Contudo, existem maiores limitações na aplicação deste sistema em edifícios existentes, como sejam a orientação, a arquitectura e o espaço urbano em que se encontram inseridos.

Como já foi referido no ponto 2.2, a orientação tem um papel fundamental nos sistemas solares passivos, sendo a orientação Sul preferencial nestes sistemas. Desta forma há uma maior exposição solar da fachada Sul no Inverno, havendo a possibilidade de se minorar estes ganhos na estação de Verão [18].

A arquitectura de um edifício multifamiliar é limitativa pois sem a existência de uma varanda torna-se mais difícil e dispendiosa a aplicação deste sistema. A área de uma varanda existente num edifício é também importante para permitir a sua viabilidade, pois se a área for reduzida o benefício da aplicação do sistema não será significativo.

Nos edifícios unifamiliares existem várias opções para a implementação de um solário. Para além da possibilidade de se fechar os vãos de uma varanda, é possível ultrapassar as barreiras arquitectónicas nos casos em que não haja varanda com a criação de uma nova zona adjacente com uma grande área de envidraçados. Este sistema pode ser potenciado através de dispositivos de sombreamento, estratégias de ventilação e a escolha de um tipo de vidro que maximize os ganhos solares.

O espaço urbano em que o edifício se encontra inserido também condiciona o desempenho do sistema pois os edifícios próximos podem causar sombreamento e reduzir significativamente a radiação solar que incide nas fachadas [18].

Existem outros factores a ter em conta no projecto de um solário que podem ser determinantes na escolha de certos elementos para a sua optimização térmica. O clima do local em que o edifício está inserido tem influência na escolha das estratégias utilizadas para o arrefecimento e aquecimento do sistema.

A selecção do tipo de vidro e a área de envidraçado do solário tem grande relevância porque é através do envidraçado que o solário vai ter a maior parte dos ganhos solares. É também importante a existência de portas e janelas entre o solário e a habitação para que possa haver trocas de calor por convecção, quando necessário, entres estas zonas térmicas. A instalação de dispositivos de sombreamento é indispensável para que na estação de arrefecimento não haja um sobreaquecimento do solário e, conseqüentemente, o aquecimento da habitação [13].

### 2.2.3. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS SOLÁRIOS

O comportamento térmico dos solários depende das trocas de calor ocorridas entre o ambiente exterior, o solário e o ambiente interior.

#### 2.2.3.1. TROCAS DE CALOR POR RADIAÇÃO

O vão envidraçado desempenha um papel fundamental no funcionamento do solário pois é o elemento responsável pela absorção e transmissão da radiação solar para os elementos estruturais da habitação, onde é convertida em calor. Na figura 2.7 é possível observar as trocas de calor por radiação ocorridas entre o envidraçado do solário e a parede comum ao solário e à habitação.

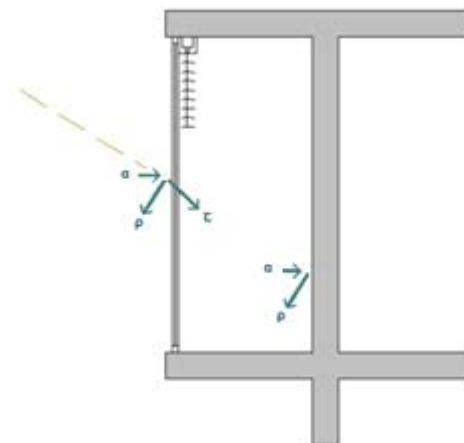


Figura 2.7- Esquema exemplificativo de trocas de calor por radiação nos elementos do solário: parcela da radiação absorvida ( $\alpha$ ), parcela da radiação reflectida ( $\rho$ ) e parcela da radiação transmitida ( $\tau$ )

A radiação solar incidente num elemento pode ser absorvida, transmitida ou reflectida, conforme sejam os seus coeficientes de absorção,  $\alpha$ , de transmissão,  $\tau$ , e de reflexão,  $\rho$ . Apenas os corpos transparentes são capazes de transmitir parte da radiação incidente. No geral, a parcela reflectida será tanto maior quanto o ângulo de incidência da radiação solar. A parcela absorvida é convertida em calor no interior do elemento, podendo ser reemitida sob a forma de radiação de onda longa [19].

Deste modo, o tipo de vidro deve ser escolhido em função do objectivo a atingir - potenciar ou minimizar os efeitos da radiação. Existem vários tipos de vidros, como os coloridos, que possuem reduzido coeficiente de transmissão e elevado coeficiente de absorção, os reflectantes, que reflectem a radiação solar, os de baixa emissividade, que reduzem a emissividade da radiação de onda longa, e os translúcidos, que têm baixa transmissão térmica e são difusos à passagem da luz solar. É também possível alterar as propriedades dos vidros com a aplicação de tintas ou capas [19].

Os envidraçados são caracterizados por serem transparentes à radiação de onda curta e por serem opacos à radiação de onda longa, o que origina o efeito de estufa no interior do solário, já que a radiação de onda longa emitida pelos elementos do edifício não é transmitida ao exterior, acabando por ser absorvida e transmitida na forma de calor.

Os dispositivos de sombreamento tanto podem ser exteriores como interiores e têm como propósito diminuir o coeficiente de transmissão do sistema. A sua utilização é prática corrente na estação de arrefecimento de modo a evitar o sobreaquecimento do sistema [19].

No quadro 2.1 encontram-se descritas as propriedades dos vidros correntemente utilizados.

Quadro 2.1 - Propriedades dos vidros correntemente utilizados [20]

| Tipo de vidro | Transmissão (%) | Reflexão (%) | Absorção (%) |
|---------------|-----------------|--------------|--------------|
| Simple        | 79              | 7            | 14           |
| Duplo         | 67              | 13           | 20           |

### 2.2.3.2. ARMAZENAMENTO DE CALOR

A radiação solar, após ser transmitida através dos envidraçados, é absorvida pelos elementos estruturais e transformada em calor. Uma característica fundamental neste processo é a inércia térmica dos elementos que absorvem a radiação solar, pois quanto maior a inércia térmica do elemento maior capacidade o elemento tem de moderar e desfazer o fluxo de calor que o atravessa [21]. A inércia térmica varia em função da massa e da condutibilidade térmica do elemento, já que quanto maiores estas características maior será a inércia térmica do elemento.

As paredes comuns ao solário e à habitação devem ter uma boa inércia térmica para armazenarem e transmitirem de forma eficaz o calor para o interior da habitação. Para desempenhar esta função são geralmente utilizadas paredes simples de tijolo, pedra ou betão [19].

No quadro 2.2 apresentam-se as propriedades dos materiais constituintes dos elementos de armazenamento de calor.

Quadro 2.2 - Propriedades de materiais correntemente utilizados com boa inércia térmica [22]

| Material        | Massa [Kg/m <sup>3</sup> ] | Condutibilidade térmica [w/(m.°C)] |
|-----------------|----------------------------|------------------------------------|
| Pedra (Granito) | 2600                       | 2,8                                |
| Betão           | 2500                       | 2,0                                |
| Tijolo (0,20m)  | 1900                       | 0,38                               |

### 2.2.3.3. TROCAS DE CALOR POR CONDUÇÃO

A condução é um fenómeno de transferência de calor que ocorre em duas zonas do solário: entre o ambiente exterior e o solário, através do envidraçado, e entre o solário e o interior da habitação, através da paredes e janelas, como se pode observar na figura 2.8.

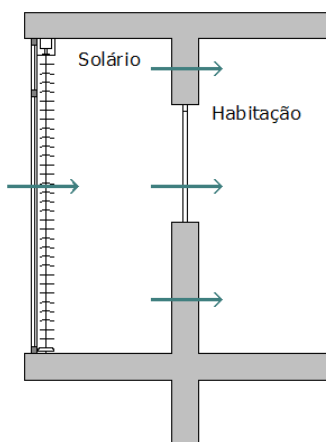


Figura 2.8 - Esquema exemplificativo do fluxo de calor por condução no solário

O envidraçado é o elemento que separa o solário do ambiente exterior. Sendo um material com um coeficiente de transmissão térmica elevado, as trocas de calor entre o ambiente exterior e o interior ocorrem mais facilmente, pelo que a temperatura exterior tem elevado impacto na temperatura do solário. Neste elemento de separação é comum utilizar-se vidro simples ou duplo com caixa-de-ar, que actua como isolamento térmico, pelo que o vidro duplo tem menor coeficiente de transmissão térmica do que o vidro simples, o que se reflecte em menores trocas por condução através do vidro. A escolha do tipo de vidro a aplicar estará dependente do clima exterior [23].

É desejável que uma das características dos elementos de separação entre o solário e a habitação seja um elevado coeficiente de transmissão térmica, de modo a transmitir, por condução, os ganhos solares para o interior da habitação [19].

No quadro 2.3 apresentam-se os coeficientes de transmissão térmica de várias soluções construtivas. De referir que as soluções construtivas dos envidraçados possuem caixilharia de alumínio. Estes valores foram obtidos através de consulta do ITE50 [22].

Quadro 2.3 - Coeficientes de Transmissão Térmica dos elementos do sistema

| Elemento    | Solução construtiva               | U [W/(m <sup>2</sup> . °C)] |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Envidraçado | Vidro Simples 3,5mm               | 5,2                         |
|             | Vidro Duplo 3,5mm com caixa-de-ar | 2,8                         |
| Parede      | Parede Simples Tijolo 20'         | 1,37                        |
|             | Parede Simples de Betão           | 3,24                        |
|             | Parede Simples de Pedra           | 3,57                        |

#### 2.2.3.4. TROCAS DE CALOR POR CONVECÇÃO

A abertura de janelas ou portas entre o solário e a habitação desencadeia trocas de calor por convecção que aceleram o aquecimento do interior da habitação [23], já que o ar frio daí proveniente é aquecido no solário e posteriormente conduzido para o seu interior.

Da mesma forma, na estação de arrefecimento, a abertura de janelas do solário provoca trocas de calor por convecção com o exterior, o que faz com que a temperatura no interior do solário diminua, contribuindo assim para evitar o sobreaquecimento do espaço.

Na figura 2.9 é possível observar-se as trocas de calor por convecção referidas.

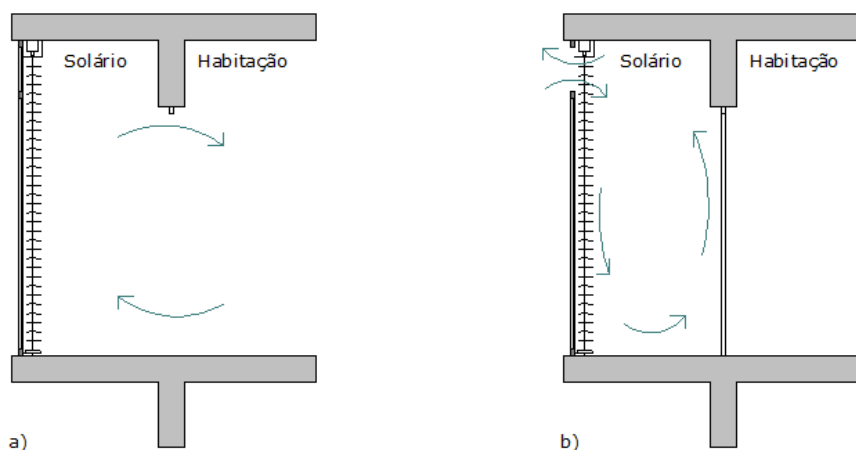


Figura 2.9 - Esquema exemplificativo das trocas de calor por convecção do sistema no Inverno (a) e no Verão (b)

#### **2.2.4. ESTRATÉGIAS DE UTILIZAÇÃO**

Para o bom funcionamento deste tipo de sistema é necessária a definição de estratégias de utilização, tanto para os períodos de aquecimento como para os de arrefecimento. As estratégias são orientadas em função do clima em que a habitação está inserida e consoante haja maiores necessidades de aquecimento ou arrefecimento. A correcta definição dessas estratégias é determinante na eficiência térmica do sistema.

##### **2.2.4.1. AQUECIMENTO**

Para a optimização do solário na estação de aquecimento é importante potenciar-se a captação de radiação solar pelos vãos envidraçados para que a temperatura no interior do solário aumente. A temperatura no solário atinge temperaturas mais elevadas que as do interior da habitação no período diurno, o que faz com que haja transferência de calor por condução nos elementos de separação do solário e da habitação.

Neste período é também aconselhável abrir portas e janelas que separem estas duas zonas térmicas para ocorrer transferência de calor por convecção para que o aquecimento da habitação seja mais eficiente.

No período nocturno a temperatura no interior do solário desce rapidamente devido à grande área de envidraçado. Para que esta descida de temperatura não tenha grande influência no interior da habitação é importante que portas e janelas que façam fronteira entre as duas zonas térmicas estejam fechadas.

##### **2.2.4.2. ARREFECIMENTO**

Na estação de arrefecimento é necessário reduzir os ganhos de calor do solário de modo a evitar o sobreaquecimento deste espaço e o subsequente aquecimento do interior da habitação. Para tal é fundamental a redução dos ganhos por radiação, que podem ser minimizados com a utilização de dispositivos de sombreamento. Com a redução dos ganhos por radiação reduzem-se as trocas de calor por condução entre o solário e o interior da habitação.

No período diurno e nocturno a ventilação natural das duas zonas térmicas faz com que haja trocas de calor por convecção, contribuindo assim para o arrefecimento do interior da habitação.

## 2.2.5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO NA REABILITAÇÃO

A aplicação de solários em obras de reabilitação tem sido utilizada um pouco por toda a Europa, existindo vários exemplos em que este tipo de sistema foi aplicado. Um bom exemplo é o edifício APT em Engelsby na Dinamarca [24]. Na figura 2.10 é possível observar-se o aspecto do edifício antes e após a reabilitação.



Figura 2.10 - Edifício APT Engelsby antes (a) e após (b) a reabilitação [18]

A reabilitação deste edifício tinha por objectivo a redução do consumo energético e a sua renovação, pois o edifício encontrava-se visivelmente degradado. Com a intervenção o edifício passou a consumir apenas 40% da energia que consumia inicialmente [24].

A aplicação de solários a todas as varandas deste edifício foi fundamental para a redução do consumo energético devido à climatização e para a melhoria do conforto térmico no interior do edifício. De modo a averiguar a temperatura dos solários na fachada sul e a sua influência sobre os apartamentos, foi realizado um estudo pela Agência Energética Internacional [24], tendo sido efectuadas medições da temperatura no interior dos apartamentos durante um ano. Pela análise das medições realizadas conclui-se que não houve qualquer problema de sobreaquecimento, uma vez que as temperaturas se mantiveram entre os 20°C e os 25°C.

No que diz respeito à aplicação de solários em Portugal com o objectivo de reduzir o consumo energético, apenas foram encontrados estudos de aplicação a edifícios unifamiliares. Num estudo efectuado pelo INETI [25] acerca de edifícios solares passivos em Portugal verificou-se que a maior parte dos solários que podem ser encontrados no nosso país são do tipo adjacente e semi-integrado. Dos edifícios analisados verificou-se que as necessidades energéticas eram inferiores aos limites impostos pelo RCCTE, sendo que as necessidades na estação de aquecimento foram as mais reduzidas devido à utilização de sistemas solares passivos, que potenciam o ganho de calor. Embora os resultados na estação de arrefecimento não sejam tão bons como os da estação de aquecimento,



continuam a cumprir os limites impostos pelo RCCTE. Ainda assim, verificou-se que um problema recorrente deste tipo de sistema é o sobreaquecimento na estação de arrefecimento. Para que tal não aconteça é necessário o uso eficaz de dispositivos de sombreamento solar. Na figura 2.11 apresentam-se dois dos edifícios com solários que foram analisados neste estudo. [25]



Figura 2.11 - Edifício em Vale Rosal (Charneca da Caparica) e Residência M. João Delgado (Porto) [25]



# CAPÍTULO 3

## METODOLOGIA DO TRABALHO

A análise a realizar no âmbito do presente trabalho tem como objectivo averiguar as vantagens do sistema solar passivo denominado solário. Este estudo tem ainda como finalidade a verificação do contributo de cada componente do sistema no seu funcionamento.

O estudo irá ser realizado com recurso a duas ferramentas de simulação computacional, *EPlus* e *TRNSYS*, que permitem efectuar uma análise do comportamento térmico do edifício em regime dinâmico. Será também utilizado o método simplificado da legislação em vigor, o RCCTE, que efectua uma análise do comportamento térmico do edifício em regime estacionário. A metodologia simplificada indicada pelo RCCTE irá ser utilizada apenas na análise dos casos iniciais sem solário. As duas ferramentas de simulação computacional, para além de serem utilizadas no estudo do modelo inicial, serão também utilizadas para a análise do modelo com solário. Na análise de sensibilidade dos parâmetros do sistema apenas será utilizada a ferramenta *EPlus*.

Neste capítulo será descrito o modelo em estudo assim como as ferramentas de simulação utilizadas.

### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A habitação em estudo corresponde a uma fracção autónoma de um piso intermédio de um edifício multifamiliar existente, representativo da geometria e soluções construtivas do edificado nacional anterior à entrada em vigor do RCCTE. É possível observar-se na figura 3.1 a planta original da habitação em estudo.

A geometria da habitação foi simplificada de modo a evitar possíveis erros resultantes da definição do modelo. Na figura 3.2 é possível observar a geometria do modelo com as dimensões  $8,85m \times 12,6m \times 2,8m$ , em que a dimensão  $8,85m$  corresponde às envolventes Norte e Sul,  $12,6m$  às envolventes Este e Oeste, e  $2,8m$  ao pé direito. O modelo da habitação tem uma área útil de  $111,5m^2$  e um volume de  $312m^3$ .

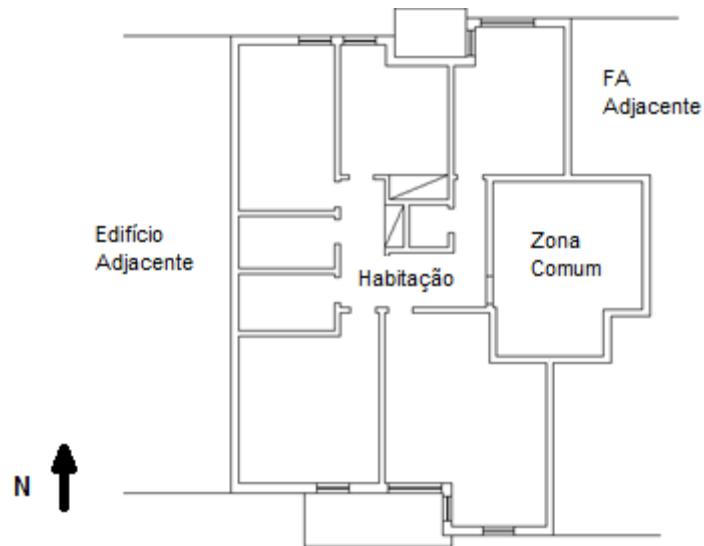


Figura 3.1 - Planta original da habitação em estudo

Para o estudo do comportamento térmico desta habitação considerou-se a existência de trocas de calor apenas pelas envoltentes Norte e Sul. O pavimento, o tecto e a envolvente Este da habitação estão em contacto com fracções autónomas adjacentes do mesmo edifício e com a zona comum, que por simplificação se consideram aquecidas, assim como o edifício adjacente, que se encontra em contacto com a envolvente Oeste. As envoltentes encontram-se definidas em planta na figura 3.2.

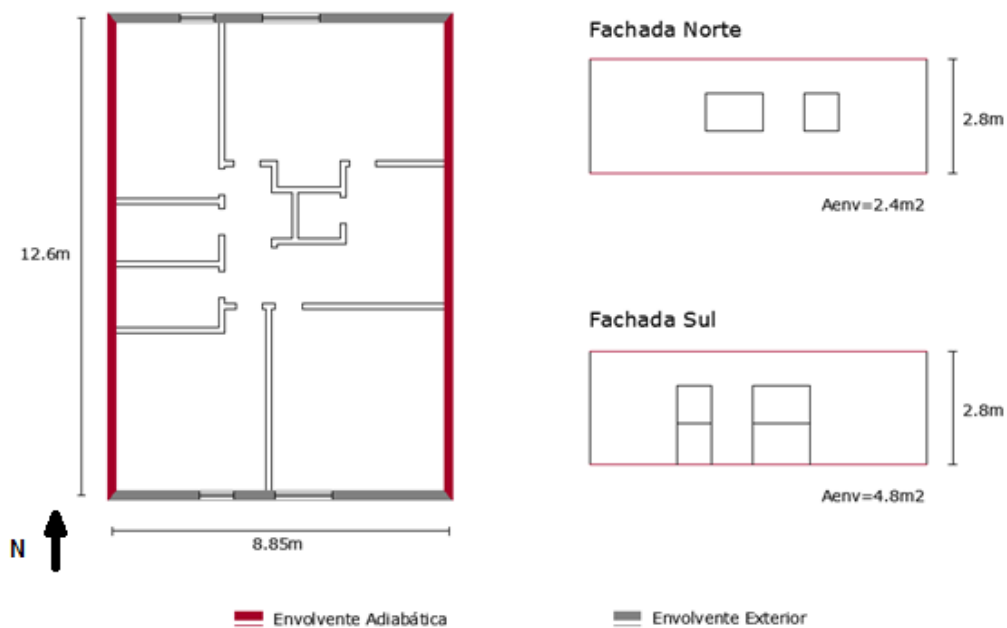


Figura 3.2 - Planta e alçado Norte e Sul do modelo

Com base na planta simplificada da fracção autónoma foram definidos quatro modelos distintos que diferem uns dos outros pela geometria da varanda com orientação a Sul. Cada modelo representa uma tipologia de varanda comum às construções anteriores à implementação do RCCTE. Na figura

3.3 encontra-se representada a geometria dos modelos com as várias tipologias de varandas que vão ser analisados.

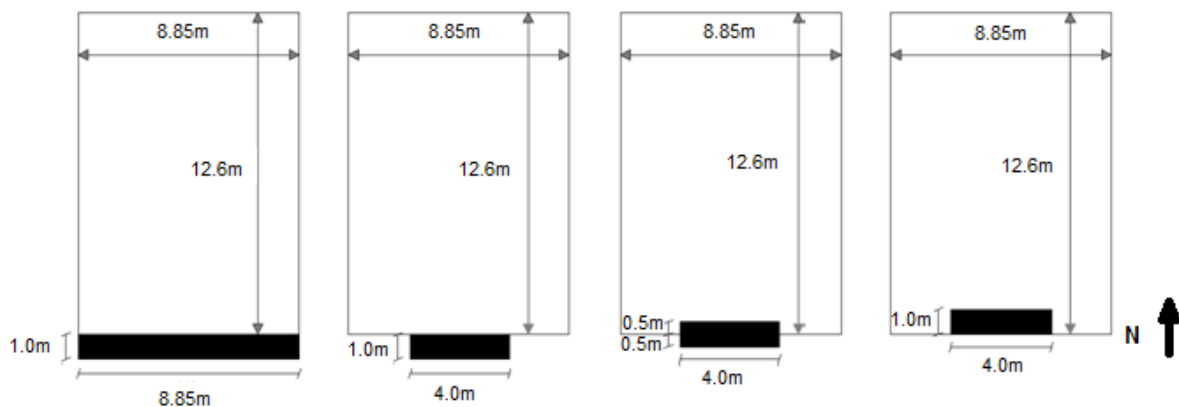


Figura 3.3 - Esquema da geometria dos quatros modelos da fracção autónoma

Como solução construtiva das paredes exteriores, interiores e do envidraçado consideraram-se soluções representativas dos edifícios construídos anteriormente à regulamentação térmica. A solução construtiva das paredes exteriores é constituída por parede de tijolo furado de 20cm rebocada interior e exteriormente, com um coeficiente de transmissão térmica de  $U = 1,4 W/m^2 \cdot ^\circ C$ . A solução construtiva das paredes interiores é dada por uma parede de tijolo furado de 11cm rebocada interior e exteriormente, com um coeficiente de transmissão térmica de  $U = 2,2 W/m^2 \cdot ^\circ C$ . O envidraçado é composto por vidro simples de 2,5mm de espessura e caixilharia de alumínio, apresentando apresenta um coeficiente de transmissão térmica de  $U = 5,9 W/m^2 \cdot ^\circ C$ .

Para representar a varanda do piso superior e o sombreamento inerente à sua existência será aplicada uma pala com a geometria da varanda do modelo em estudo.

Admitiu-se uma taxa de renovação de ar de  $R_{ph} = 0,6h^{-1}$ , visto ser essa a referência para garantia da qualidade do ar interior. No que diz respeito aos ganhos internos foi considerado um valor de  $q_i = 5W/m^2$  constante ao longo das simulações, para que fosse possível a definição deste valor em todas as ferramentas de cálculo utilizadas. A utilização deste valor justifica-se pelo facto do TRNSYS não admitir ganhos internos inferiores a  $5W/m^2$ .

Na definição do modelo não foram contabilizadas as pontes térmicas lineares, visto que o objectivo é a avaliação do desempenho do sistema solar passivo em estudo e não o estudo do comportamento térmico da fracção autónoma.

As temperaturas mínimas e máximas de referência, para efeitos de climatização da fracção autónoma, foram consideradas  $20^\circ C$  para o aquecimento e  $25^\circ C$  para o arrefecimento.

Em relação ao solário a solução construtiva da envolvente exterior é idêntica à utilizada na definição das paredes exteriores da habitação. No interior do solário foi ainda considerada uma taxa de renovação horária de  $2h^{-1}$ , de modo a representar uma elevada taxa de infiltração, comum a estes espaços [24].

Os parâmetros constituintes do solário estudados no âmbito do presente trabalho foram o tipo de envidraçado, de sombreamento e de ventilação natural. Para esse efeito foram realizadas várias simulações de modo a estudar a influência de cada parâmetro no desempenho térmico do solário. Em cada simulação variou-se a configuração do sistema de acordo com o quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Parâmetros do solário analisados

|                    |   |         |                      |
|--------------------|---|---------|----------------------|
| Envidraçado        | Transparente  | Simples | Com muro<br>Sem muro |
|                    |   | Duplo   | Com muro<br>Sem muro |
| Sombreamento       | Estore exterior                                     |         |                      |
|                    | Estore interior com baixo coeficiente de reflexão   |         |                      |
|                    | Estore interior com elevado coeficiente de reflexão |         |                      |
| Ventilação Natural |   |         |                      |

No que diz respeito ao envidraçado foram realizadas simulações com vidro transparente, simples e duplo, de modo a verificar qual o tipo de vidro mais eficiente. Para averiguar o efeito da área do envidraçado no funcionamento do sistema foram consideradas as situações em que a varanda apresenta maior área de envidraçado, isto é, sem muro de tijolo, e com menor área de envidraçado, considerando a existência de um muro de tijolo. De modo a minimizar os ganhos solares na estação de arrefecimento definida pelo RCCTE, consideraram-se três tipos de sombreamento, dois deles relativos a sombreamento interior e outro relativo a sombreamento exterior. Uma outra estratégia considerada para o período de arrefecimento foi a ventilação natural.

Os primeiros modelos simulados, recorrendo ao método simplificado do RCCTE, ao *EPlus* e *TRNSYS*, foram os respeitantes à fracção autónoma com as quatro tipologias de varanda.

Posteriormente, de modo a averiguar a eficiência do sistema solar passivo na redução das necessidades energéticas, foi simulado um modelo da fracção autónoma com solário adjacente em toda a largura da fachada Sul (8.85m), recorrendo às duas ferramentas de análise dinâmica *EPlus* e *TRNSYS*.

De seguida foi realizada a análise de sensibilidade aos parâmetros do solário de modo averiguar a solução óptima para cada cidade, recorrendo ao *EPlus*.

### 3.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO COM RECURSO AO RCCTE

A legislação em vigor – RCCTE (Decreto-Lei N.º 80/2006, de 4 de Abril) - aplica-se ao projecto de novos edifícios e de grandes remodelações com o objectivo de garantir as exigências de conforto térmico e a qualidade do ar, assim como as necessidades de água quente sanitária sem dispêndio de energia. Para além disso, visa também a minimização de situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas.

O RCCTE define como condições interiores de referência uma temperatura interior do ar de 20 °C durante a estação de aquecimento e de 25 °C durante a estação de arrefecimento. É também definida uma taxa de referência para a renovação do ar de 0,6h<sup>-1</sup> de forma a garantir a qualidade do ar interior [4].

Este regulamento exige requisitos mínimos ao nível da envolvente dos edifícios, definindo coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis para elementos opacos. Estes valores são diferentes para cada zona climática, como se pode verificar pelo quadro 3.2 [4].

Quadro 3.2 - Coeficiente de transmissão térmica máxima de elementos opacos verticais

| U (W/m <sup>2</sup> . °C)             | Zona Climática |     |      |
|---------------------------------------|----------------|-----|------|
|                                       | I1             | I2  | I3   |
| Envolvente exterior<br>opaca vertical | 1,8            | 1,6 | 1,45 |

Como se viu no ponto 3.1, o coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior do modelo é  $U = 1,40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ , o que cumpre as exigências regulamentares para todas as zonas climáticas.

A metodologia associada ao RCCTE baseia-se no cálculo das necessidades de aquecimento,  $N_{ic}$ , e arrefecimento,  $N_{vc}$ . Apesar dos fenómenos de transferência de calor ser, por natureza, não estacionários esta metodologia toma-os como ocorrendo em regime permanente [26]. As necessidades energéticas são calculadas através da integração das respectivas equações de perdas e ganhos instantâneas de calor no intervalo de tempo correspondente à estação em análise.

Para as necessidades de aquecimento,  $N_{ic}$ , o regulamento contabiliza as perdas de calor por condução através da envolvente, as perdas de calor resultantes da renovação de ar e os ganhos de calor úteis resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos envidraçados [4].

O cálculo das necessidades de arrefecimento,  $N_{vc}$ , baseia-se na contabilização dos ganhos solares pela envolvente opaca devidos à incidência da radiação solar, ganhos solares através dos vãos envidraçados e ganhos internos devidos aos ocupantes, aos equipamentos e à iluminação artificial. Para os ganhos internos, ao longo de todo o período de simulação, considerou-se  $q_i = 5 \text{ W/m}^2$ , conforme referido no ponto 3.1.

A análise do quadro 3.3 permite aferir quais os factores contabilizado pelo RCCTE para o cálculo das necessidades de consumo energético de climatização, verificando-se que os pressupostos admitidos na contabilização das necessidades não reflectem todos os fenómenos de transferência de calor inerentes ao comportamento térmico do edifício.

Quadro 3.3 - Fenómenos de transferência de calor no cálculo das necessidades energéticas do RCCTE

| Transferência de calor               |        | $N_{vc}$ | $N_{tc}$ |
|--------------------------------------|--------|----------|----------|
| Condução através da envolvente opaca | Ganhos |          |          |
|                                      | Perdas | x        | x        |
| Condução através dos envidraçados    | Ganhos |          |          |
|                                      | Perdas | x        | x        |
| Radiação através da envolvente opaca | Ganhos |          | x        |
| Radiação através dos envidraçados    | Ganhos | x        | x        |
| Renovação de ar                      | Ganhos |          |          |
|                                      | Perdas | x        | x        |
| Ganhos Internos                      | Ganhos | x        | x        |

Este método de cálculo foi definido de acordo com a norma europeia EN ISO 13790 e apresenta algumas limitações, sendo a mais relevante o cálculo dos fenómenos de transferência de calor em regime permanente [26]. Apenas é possível um cálculo preciso das necessidades energéticas através de uma análise dinâmica do comportamento térmico do edifício, dada a natureza altamente dinâmica dos fenómenos térmicos em causa.

No âmbito da aplicação do RCCTE, os solários são considerados espaços não úteis, ou seja, espaços não climatizados. Para considerar o impacte deste tipo de sistema o regulamento sugere que não se considerem perdas térmicas através das áreas exteriores das paredes de armazenamento térmico e que estes elementos não sejam sujeitos a requisitos mínimos do valor dos coeficientes de transmissão térmica, pois a sua contribuição é positiva na estação de aquecimento. Porém, estes elementos ficam sujeitos aos requisitos mínimos em termos de sombreamento, visto que existe o risco de sobreaquecimento na estação de arrefecimento [4].

Devido às limitações do RCCTE em calcular o impacte da aplicação de sistemas solares passivos, este método apenas será utilizado para a caracterização do comportamento térmico da fracção autónoma não dotada de solário.

### 3.3. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO COM RECURSO AO ENERGYPLUS

O *EnergyPlus* é um software de simulação energética e térmica de edifícios desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América e combina funcionalidades de duas



ferramentas de simulação computacional, o *BLAST* e o *DOE-2* que foram desenvolvidos nos meados dos anos 1970 e 1980 [27].

Este software tem por base a descrição do edifício, cujos dados relevantes são introduzidos pelo utilizador para que a simulação possa ser efectuada. Com a introdução de todos os dados o programa calcula as necessidades de aquecimento e arrefecimento realizadas por um sistema HVAC fictício com características definidas pelo utilizador, bem como a temperatura máxima e mínima do ambiente interior [27].

Esta ferramenta de cálculo foi escolhida para analisar o comportamento térmico do solário pois trata-se de um software já utilizado em estudos deste género e capaz de lidar com os fenómenos físicos inerentes ao seu funcionamento [28] [29]. Para além disso, já tinha existido contacto com as suas potencialidades no âmbito de uma cadeira do curso.

### 3.3.1. DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA

Na simulação através do *EPlus* o comportamento térmico do edifício tem uma interacção simultânea com os sistemas de climatização. A interacção entre as zonas térmicas, o clima e o sistema de climatização é dada em função de intervalos de tempo definidos pelo utilizador. Os intervalos de tempo podem ser de 1 hora no máximo, sendo que o valor pré definido é de 15min.

O processo das trocas de calor é tratado pelo software de modo a calcular em simultâneo os efeitos da radiação e da convecção na superfície interna e externa dos elementos do edifício durante o intervalo de tempo definido.

A transferência de calor por condução nos elementos do edifício é calculada através das funções lineares de transferência de calor disponíveis no software.

Na figura 3.4 é possível ver um diagrama da integração feita pelo *EPlus* de todos os elementos importantes para a simulação energética de um edifício.

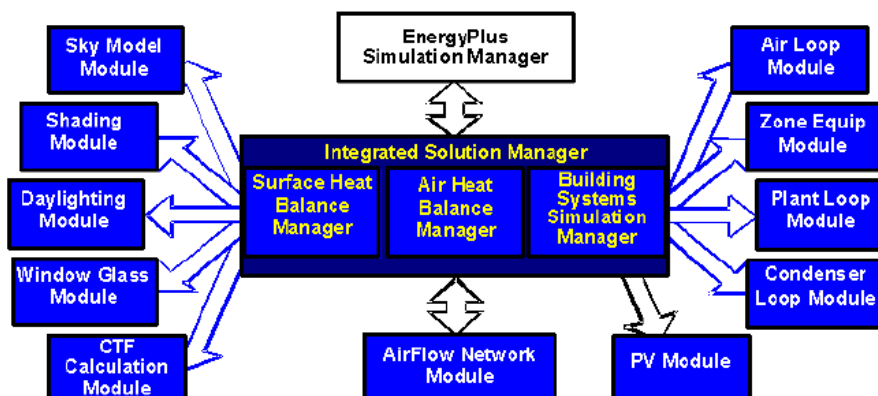


Figura 3.4 - Diagrama de integração de processos do *EPlus* [25]

O *EPlus* tem ainda um processo avançado para o cálculo dos envidraçados, permitindo calcular todos os fenómenos de transferências de calor, assim como o efeito de sombreamento, controlado ou não pelos utilizadores. Para além disto dispõe de uma extensa biblioteca de janelas comerciais que podem ser usadas nas simulações [27].

Este software tem uma vasta aplicabilidade pois está preparado para simular várias situações, para além de que tem a vantagem de ser um programa em código aberto, o que permite que o programa seja revisto e inspeccionado por todos os utilizadores, aumentando assim o rigor e a utilização do programa.

O *EPlus* já conta com várias versões, sendo a primeira datada de 2001. A versão que irá ser utilizada neste estudo será a versão 6.0, que foi lançada em Outubro de 2010.

Os dados do modelo apresentados no ponto 3.1 são introduzidos no *EPlus* através do *IDF Editor*. Para além da introdução de todas as variáveis que definem o modelo é também definido um sistema de climatização com as temperaturas interiores de referência do RCCTE. Neste módulo são escolhidos os algoritmos de cálculo adequados e os relatórios pretendidos dos resultados da simulação. Na figura 3.5 apresenta-se o aspecto do *IDF Editor*.

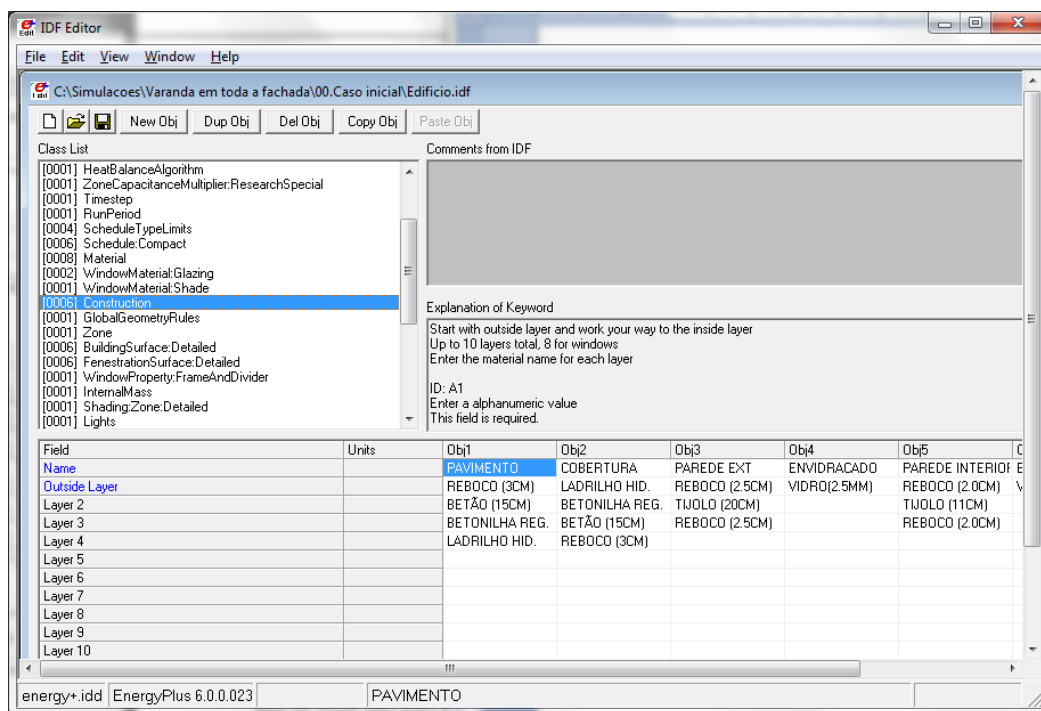


Figura 3.5 – Exemplo de interface do utilizador no *IDF Editor* do *EPlus*

A simulação do comportamento térmico e energético do edifício é posteriormente realizada noutro módulo do *EPlus*, o *EP-Launch*, onde se define o ficheiro do modelo e o ficheiro do clima que vão ser simulados. É também neste módulo que serão obtidos os relatórios dos resultados da simulação. Na figura 3.6 pode-se visualizar o aspecto da interface do utilizador do *EP-Launch*.

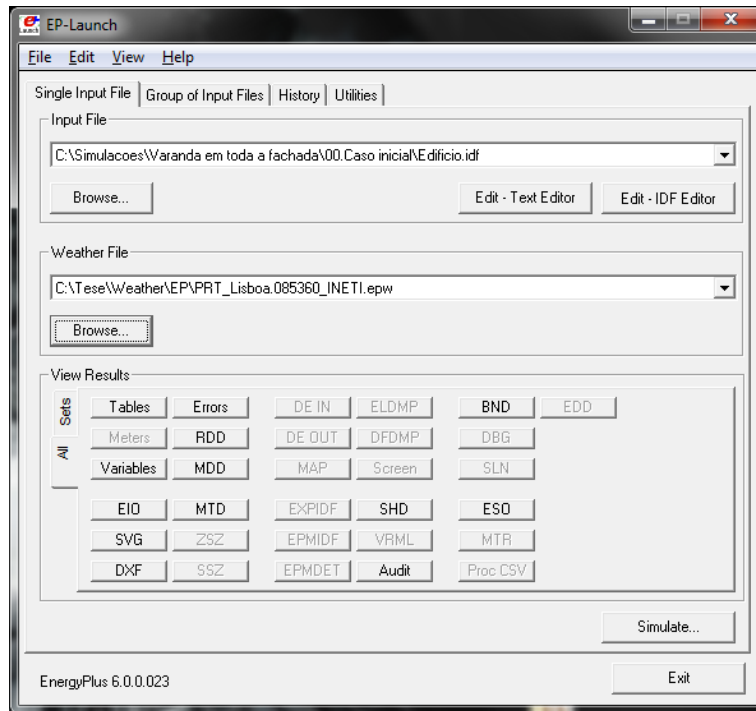


Figura 3.6 – Exemplo de interface do utilizador no EP-Launch do EPlus

### 3.3.2. BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço energético nas superfícies exteriores é dado pela equação:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3-1)$$

Em que  $q''_{\alpha sol}$  é o fluxo de calor da radiação de onda curta que inclui a radiação directa, reflectida e difusa,  $q''_{LWR}$  é o fluxo de calor da radiação de onda longa que inclui as trocas de calor com o ar e com a envolvente,  $q''_{conv}$  é o fluxo de calor por convecção e  $q''_{ko}$  é o fluxo de calor por condução.

Nas superfícies interiores o balanço energético é dado pela equação:

$$q''_{LWX} + q''_{sw} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (3-2)$$

Em que  $q''_{LWX}$  é o fluxo de calor radiativo de onda longa entre superfícies de zonas,  $q''_{sw}$  é o fluxo de calor radiativo de onda curta com origem na iluminação,  $q''_{LWS}$  é o fluxo de calor radiativo proveniente do funcionamento de equipamentos eléctricos,  $q''_{ki}$  é o fluxo de calor por condução através das paredes,  $q''_{sol}$  é o fluxo de calor de radiação solar absorvida pela superfície e  $q''_{conv}$  é o fluxo de calor por convecção [30].

### 3.3.3. CONTABILIZAÇÃO DOS GANHOS SOLARES

A quantidade de radiação solar absorvida por uma superfície exterior,  $Q_{so}$ , é contabilizada com recurso à expressão:

$$Q_{so} = \alpha \cdot (I_b \cdot \cos \theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg}) \quad (3-3)$$

Em que  $\alpha$  é a absorptância solar da superfície,  $S$  a área da superfície,  $S_s$  a área em que a radiação solar incide,  $\theta$  o ângulo de incidência dos raios solares,  $I_b$  a intensidade da radiação solar directa,  $I_s$  a intensidade da radiação solar difusa,  $I_g$  a intensidade da radiação solar difusa reflectida pelo solo,  $F_{ss}$  factor angular entre a superfície e o céu,  $F_{sg}$  factor angular entre a superfície e o solo [30].

A escolha do método de distribuição solar determina o modo como o *EPlus* considera a radiação solar e a reflectância das superfícies exteriores e interiores. Para o modelo de varanda em toda a fachada irá ser utilizado *Solar Distribution: FullInteriorAndExterior*. Desta forma o programa calcula a quantidade de radiação solar que vai ser transmitida a cada superfície da zona, incluindo o pavimento, as paredes e as janelas. Esta radiação vai ser transmitida através das janelas exteriores e já vai ter em conta os dispositivos de sombreamento existentes [31].

Para os outros modelos irá ser utilizado o *Solar Distribution: FullExterior* por se tratar de duas zonas não convexas como se pode ver pela figura 3.7. Este método de cálculo da distribuição solar assume que toda a radiação solar que é transmitida para o interior de uma zona é absorvida pelo pavimento e depois é transmitida aos outros elementos.

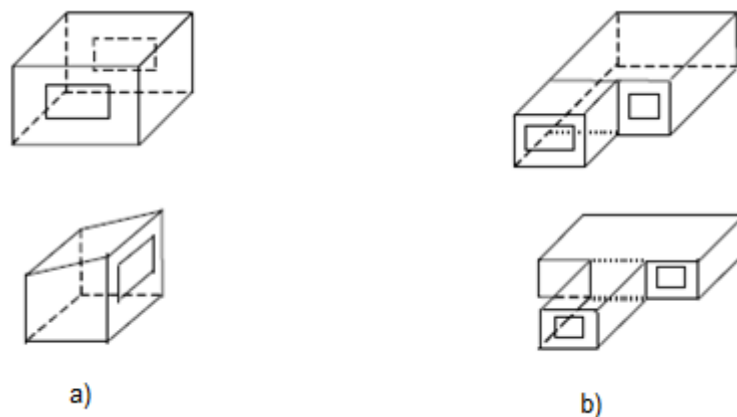


Figura 3.7 - Zonas convexas (a) e não convexas (b) [31]

### 3.3.4. CONTABILIZAÇÃO DA CONVECÇÃO

No *EPlus* é possível seleccionar os algoritmos de cálculo das superfícies interior e exterior que melhor se ajustem ao modelo. Em todos os modelos simulados foi usado o algoritmo *TARP*, tanto para a superfície interior como para a exterior [30]. Este algoritmo é baseado num modelo de convecção

natural que correlaciona a condutância térmica superficial por convecção com a orientação da superfície e com a diferença de temperatura entre a superfície e o ar. Para uma superfície vertical a condutância térmica superficial por convecção é dada pela equação:

$$h_c = 1.31|\Delta T|^{\frac{1}{3}} \quad (3-4)$$

Em que  $\Delta T$  é a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície.

A quantidade de calor transferida por convecção,  $Q_c$ , numa determinada superfície é dada por:

$$Q_c = h_c \cdot A \cdot (T_{surf} - T_{air}) \quad (3-5)$$

Em que  $h_c$  é a condutância térmica superficial por convecção,  $A$  a área da superfície,  $T_{surf}$  a temperatura da superfície e  $T_{air}$  a temperatura do ar da zona em contacto com a superfície [30].

### 3.3.5. CONTABILIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL

Com este software é possível simular ventilação natural no solário utilizando o comando *Wind and Stack with Open Area*. Neste algoritmo a ventilação natural é calculada em função da velocidade do vento e do efeito de chaminé juntamente com a área da abertura. Este comando permite ainda definir o espaço de tempo de funcionamento da abertura, o que possibilita a sua utilização apenas no período de arrefecimento, de modo a auxiliar o arrefecimento do solário e, conseqüentemente, do interior da habitação [30]. O caudal de renovação de ar,  $Q_{WindAndStack}$ , calculada é dado pela equação:

$$Q_{WindAndStack} = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} \quad (3-6)$$

Em que  $Q_s$  é o caudal de renovação horária provocada pelo efeito chaminé e  $Q_w$  o caudal de renovação horária provocada pelo vento.

O caudal de renovação horária  $Q_s$  é dado pela equação:

$$Q_s = C_D \cdot A_{opening} \cdot F_{schedule} \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H_{NPL} \cdot \frac{|T_{zone} - T_{odb}|}{T_{zone}}} \quad (3-7)$$

Em que  $C_D$  é o coeficiente de descarga da abertura,  $A_{opening}$  a área de abertura,  $F_{schedule}$  a fracção da área aberta,  $g$  a aceleração gravítica,  $\Delta H_{NPL}$  a altura do ponto médio da abertura até ao nível de pressão neutra,  $T_{zone}$  a temperatura interior da zona,  $T_{odb}$  a temperatura exterior. Em relação ao coeficiente de descarga escolheu-se a opção de cálculo automático, pelo que é obtido através da equação:

$$C_D = 0,40 + 0,0045|T_{zone} - T_{odb}| \quad (3-8)$$

Para a altura do ponto médio da abertura até ao nível de pressão neutra foi considerado o valor padrão de  $\Delta H_{NPL} = 0$ , dado a complexidade do cálculo deste valor [30].

O caudal de renovação de ar,  $Q_w$ , é dado pela equação:

$$Q_w = C_w \cdot A_{opening} \cdot F_{schedule} \cdot V \quad (3-9)$$

Em que  $C_w$  é o coeficiente de eficiência da abertura,  $A_{opening}$  a área da abertura,  $F_{schedule}$  a fracção da abertura programada e  $V$  a velocidade do vento. Para o coeficiente de eficiência da abertura optou-se pelo cálculo automático que é dado pela equação:

$$C_w = 0,55 + \frac{|EffectiveAngle - WindDirection|}{180} * 0,25 \quad (3-10)$$

A diferença  $|EffectiveAngle - WindDirection|$  quando superior a  $180^\circ$  é redefinida para o valor de  $180^\circ$  [30].

### 3.4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO COM RECURSO AO TRNSYS

O *TRNSYS* é uma ferramenta de simulação computacional que foi desenvolvida pela Universidade de Wisconsin, tendo a sua primeira versão sido lançada em 1975 [32]. É um programa de simulação usado nos campos da energia renovável e na simulação térmica de edifícios com sistemas solares passivos e activos. Uma das suas aplicações originais foi a análise dinâmica do comportamento do aquecimento solar de água de modo a avaliar a sua viabilidade.

Nesta ferramenta de análise dinâmica estão incluídos vários componentes que permitem simular sistemas solares passivos e activos, sistemas de climatização e de energia renovável, assim como sistemas de hidrogénio. Este software também providencia várias rotinas destes componentes que permitem fazer a ligação destes com os dados meteorológicos ou outras funções que estejam dependentes do tempo [32].

Uma das vantagens desta ferramenta é a fácil adição de novos modelos matemáticos ao programa. Podem ser adicionados componentes simples e estratégias de controlo, para além da implementação directa de novos processos a modelos já existentes.

O *TRNSYS* é uma ferramenta de análise para vários tipos de sistema cujo comportamento esteja dependente do tempo e do clima e é um software de referência para trabalhos de investigação e de engenharia.

A escolha desta ferramenta prende-se com o facto de ela se encontrar disponível no Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL. Para além disso trata-se de um software que, à semelhança do *EPlus*, é utilizado na análise do comportamento térmico dos edifícios, estando as suas capacidades

validadas por diversos estudos [33] [34]. A versão do TRNSYS que irá ser utilizada neste estudo será a versão 16.01.0003 que foi lançada em Março de 2007.

### 3.4.1. DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA

Para a definição do modelo apresentado no ponto 3.1 utiliza-se o módulo *TRNBuild*, onde é introduzida a geometria do modelo, bem como os seus materiais, soluções construtivas, restantes variáveis de entrada e de saída. Ainda neste módulo é definido um sistema de climatização fictícia, com as mesmas características do definido no *EPlus*, em que as temperaturas interiores de referência são as definidas pela legislação em vigor. A figura 3.8 mostra o aspecto da interface deste módulo.

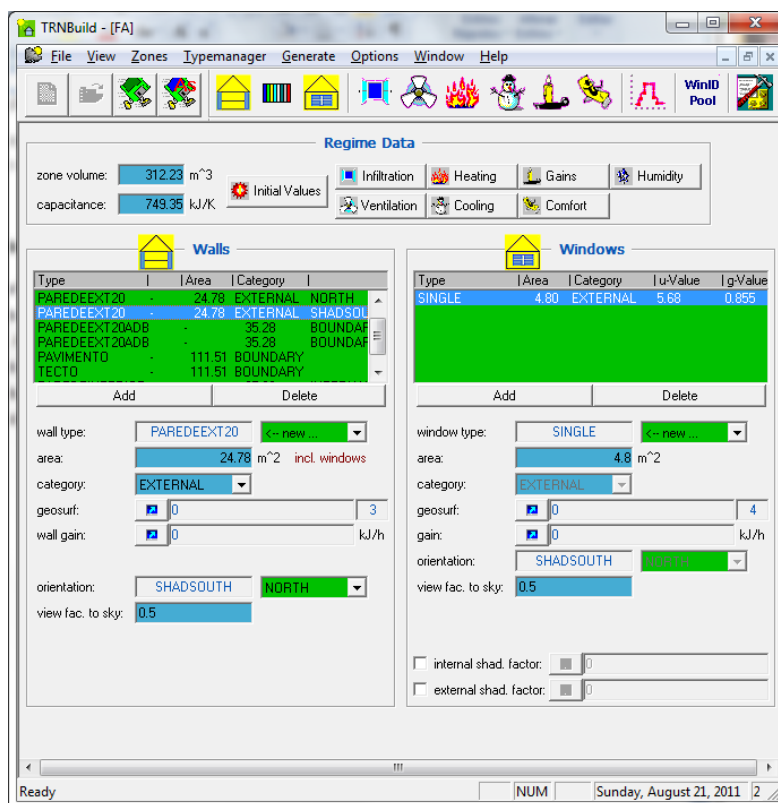


Figura 3.8 – Exemplo de interface do utilizador no *TRNBuild* do *TRNSYS*

Para a interação do modelo definido no *TRNBuild* com os dados climatéricos é usado outro módulo do *TRNSYS*, o *Simulation Studio*, onde são definidos os processos entre as componentes do sistema. É neste módulo que é feita a simulação e onde os relatórios dos resultados definidos no *TRNBuild* são obtidos. Na figura 3.9 é possível observar-se a interface deste módulo.

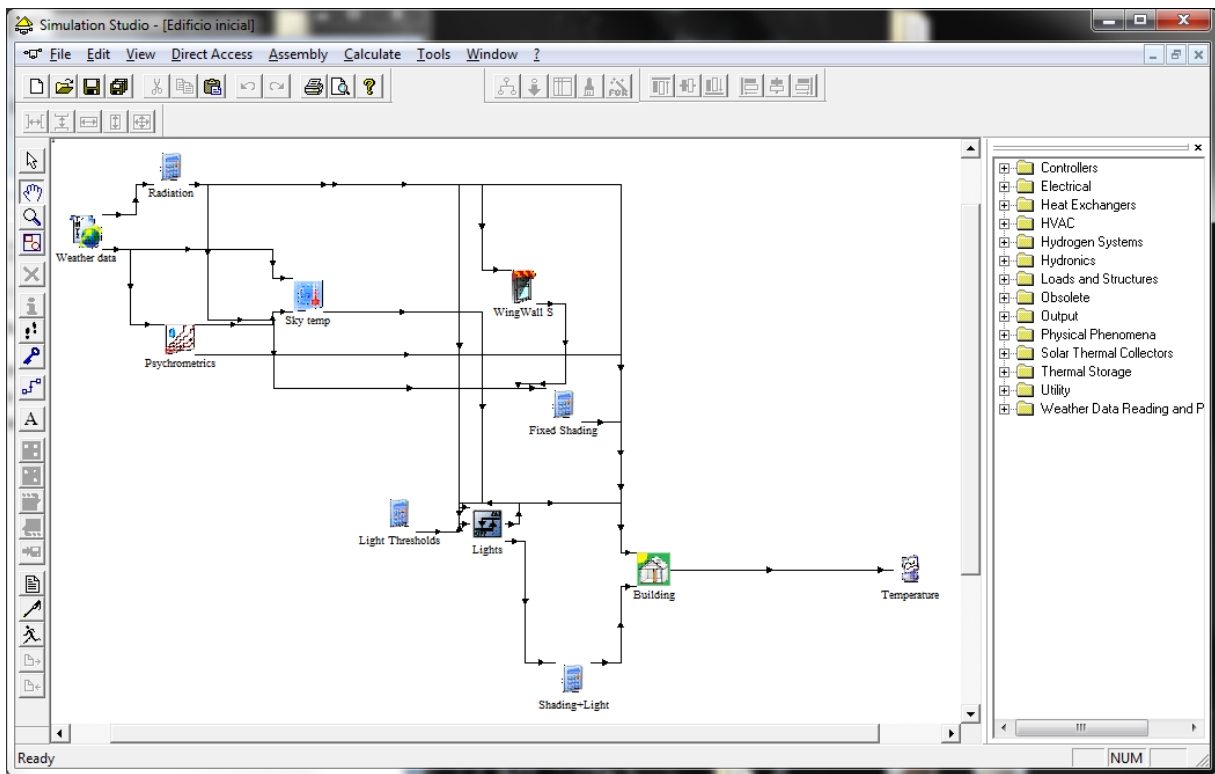


Figura 3.9 – Exemplo de interface do utilizador no *Simulation Studio* do *TRNSYS*

### 3.4.2. CONTABILIZAÇÃO DOS GANHOS SOLARES

A radiação solar directa é distribuída pelo *TRNSYS* por coeficientes definidos na descrição do edifício no TRNBuild. A distribuição solar é definida no campo *GEOSURF*, em que os valores inseridos são factores de distribuição solar relacionados com a entrada da radiação solar no interior da habitação. Os valores do *GEOSURF* distribuem a radiação solar mesmo ao passar por uma zona interior, como é o caso do modelo com solário. Após a passagem por uma zona interior a radiação passa a ser tratada como difusa [35].

A radiação difusa e a radiação directa reflectida são distribuídas de acordo uma relação de absorvância e uma área ponderada. A radiação solar difusa absorvida por uma superfície é dada pela equação:

$$f_{dif,s,s} = \frac{\alpha_s \cdot A_s}{\sum_{surfaces} (1 - \rho_{d,s}) \cdot A_s} \quad (3-7)$$

Em que  $\alpha_s$  é a absorvância solar da superfície,  $\rho_{d,s}$  é a reflectância da superfície para a radiação difusa e  $A_s$  a área da superfície. [36]



### 3.5. COMPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DINÂMICA

O *EPlus* e o *TRNSYS* são ferramentas utilizadas por peritos em todo o mundo na análise do comportamento térmico dos edifícios e devidamente validadas por estudos baseados em métodos *BESTEST* [37] [38]. Sendo ferramentas de análise do comportamento térmico dos edifícios em regime dinâmico, contabilizam de forma mais rigorosa os fenômenos físicos inerentes. Na figura 3.10 é possível observar todos os fenômenos físicos de transferência de calor considerados pelas duas ferramentas na envolvente vertical.

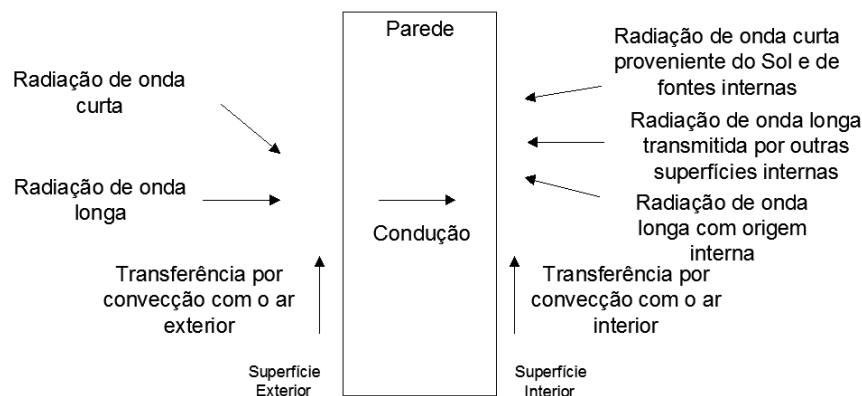


Figura 3.10 - Balanço energético da envolvente vertical na análise dinâmica

É importante conhecer as diferenças destas ferramentas de modo a compreender as discrepâncias entre os resultados obtidos. A existência de estudos de comportamento térmico de edifícios recorrendo às duas ferramentas de cálculo computacional, *EPlus* e *TRNSYS*, auxiliam a compreensão dos resultados.

Em relação ao cálculo da condução, é possível escolher no *EPlus* dois logaritmos diferentes: um de funções lineares e outro de diferenças finitas. No *TRNSYS* apenas é utilizado um logaritmo de funções lineares [39]. Optou-se pela utilização do logaritmo de funções lineares no *EPlus* para que no que, no que diz respeito à condução, não existam diferenças de cálculo entre as duas ferramentas.

Em relação à convecção no *EPlus* é possível optar-se por cinco tipos de algoritmos, para a face exterior e interior dos elementos, sendo cada um indicado para diferentes tipos de situações. No *TRNSYS* o cálculo da convecção é realizado tendo por base dois valores de condutância térmica superficial por convecção, um para o exterior e outro para o interior, definidos pelo utilizador.

No que diz respeito a ganhos solares é de realçar as diferenças nos modelos de distribuição da radiação solar difusa na atmosfera, sendo que o *EPlus* considera um modelo anisotrópico e o *TRNSYS* permite escolher entre modelos isotrópicos e anisotrópicos [39]. No *TRNSYS* escolheu-se o modelo anisotrópico *Perez* por ser o que providencia a melhor estimativa da radiação total [36].

Relativamente à distribuição solar no interior dos edifícios no *EPlus* é calculada sendo diferente para edifícios convexos e não convexos (ver ponto 3.3.3), enquanto no *TRNSYS* é um valor definido pelo utilizador em cada elemento do interior do edifício que corresponde a um factor do total da radiação que atinge cada elemento. Este factor foi definido automaticamente pelo programa baseando-se nas áreas dos elementos.

No *TRNSYS* a contabilização da distribuição da radiação solar para o interior do edifício não é a mais apropriada, pelo que o cálculo dos ganhos solares pelos vãos envidraçados não vão ser precisos. Para um cálculo rigoroso da radiação devem ser consideradas relações geométricas da sua distribuição, ao invés de factores de forma ou relações de área, como é considerado no *TRNSYS*, pois estas aproximações não permitem o cálculo preciso dos ganhos solares pelos vãos envidraçados de uma habitação. Em edifícios com uma percentagem pequena de vãos envidraçados o cálculo pouco preciso dos ganhos solares não vai ter muita influência na análise do comportamento térmico [22].

Uma revisão da bibliografia, nomeadamente estudos comparativos das ferramentas de simulação [39] [33], sugere que o *EPlus* seja uma ferramenta mais completa na análise do comportamento térmico dos edifícios, pelo que irá ser utilizado na análise de sensibilidade.

# CAPÍTULO 4

## ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados das necessidades energéticas de climatização do modelo da fracção autónoma sem o sistema passivo obtidos através das ferramentas de análise dinâmica e o método de análise estática. Posteriormente será realizado um estudo da potencialidade de aplicação do solário à fracção autónoma através das duas ferramentas de análise dinâmica *EPlus* e *TRNSYS*.

Com o intuito de otimizar o comportamento térmico do solário será ainda realizada uma análise de sensibilidade com a variação de parâmetros do sistema solar passivo utilizando a ferramenta de análise computacional *EPlus*. Seguidamente serão apresentadas e analisadas as soluções óptimas para cada cidade.

Por fim será realizada uma comparação entre a aplicação do solário e do sistema ETICS no modelo da fracção autónoma de modo a analisar-se o potencial de implementação do solário.

### 4.1. MODELOS INICIAIS

Numa primeira abordagem os quatro modelos iniciais, apresentados no ponto 3.1, foram analisados com recurso ao método simplificado do RCCTE e às duas ferramentas de análise dinâmica. Os pressupostos apresentados no ponto 3.1 para os modelos iniciais foram escolhidos de modo a serem comuns às ferramentas de análise dinâmica e ao método simplificado do RCCTE, de modo a evitar as possíveis diferenças introduzidas devido à definição de pressupostos diferentes.

Os quatro casos iniciais foram analisados em seis regiões diferentes de Portugal Continental de modo a perceber as variações de consumos energéticos referentes à climatização das habitações e as diferentes estratégias a adoptar para cada região.

O primeiro modelo analisado diz respeito à fracção autónoma com varanda em toda a largura da fachada sul, 8.85m. Nos restantes modelos a varanda tem uma largura de 4m e as configurações

adjacente, semi-integrado e integrado designando-se assim como modelos dois, três e quatro, respectivamente.

Em relação ao período das simulações, para o método simplificado do RCCTE foram definidos os períodos de aquecimento e arrefecimento de acordo com a legislação. Para as ferramentas de cálculo computacional o período de simulação definido de um ano, de forma a contabilizar os períodos de meia estação, que apresentam necessidades significativas.

Para o primeiro modelo da fracção autónoma serão apresentadas as necessidades energéticas de arrefecimento, aquecimento e anuais, enquanto para os restantes modelos só serão apresentadas as necessidades anuais, uma vez que as necessidades de aquecimento e arrefecimento apresentam comportamento semelhante nos vários modelos. As necessidades energéticas de arrefecimento, aquecimento e anuais de todos os modelos podem ser consultadas no Anexo-A.

#### 4.1.1. MODELO#1 – VARANDA EM TODA A LARGURA DA FACHADA SUL

Apresentam-se na figura 4.1 os resultados das necessidades de aquecimento obtidos com as duas ferramentas de análise dinâmica e com o método simplificado do RCCTE. Os valores das necessidades energéticas de aquecimento mais elevados para todas as cidades foram alcançados com o método simplificado do RCCTE, à excepção de Évora em que o maior valor foi obtido com *TRNSYS*. Os menores valores das necessidades de aquecimento foram obtidos com o *EPlus*, o que se deveu à rigorosa contabilização dos ganhos solares realizados por esta ferramenta. Apesar de se tratar de duas ferramentas de análise dinâmica, o *TRNSYS* e o *EPlus* apresentam resultados diferentes, em grande parte devido aos diferentes métodos de abordagem utilizada para a contabilização dos ganhos solares, como referido na secção 3.5.

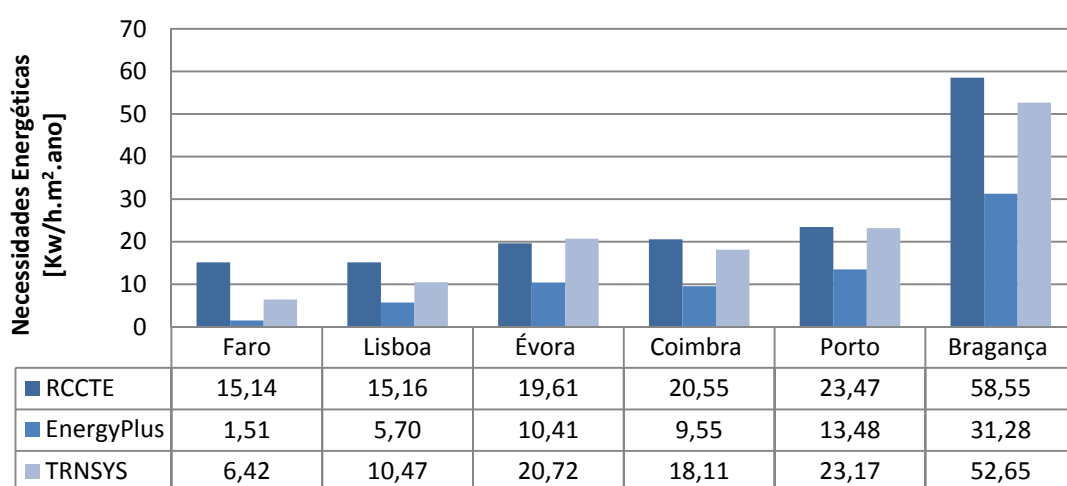


Figura 4.1 - Necessidades energéticas de aquecimento do modelo #1 sem solário

Como se pode observar na figura 4.2 os valores das necessidades de arrefecimento mais elevados foram obtidos com o *EPlus*, devido ao facto desta ferramenta ser mais rigorosa e contabilizar com

maior precisão os ganhos solares, como referido na secção 3.5. Os resultados diferem mais em Faro, que é a cidade que tem uma estação de arrefecimento mais rigorosa. Para Coimbra e Bragança os resultados através do método simplificado do RCCTE são iguais, visto terem a mesma zona climática de Verão, o que demonstra a falta de rigor do RCCTE no cálculo das necessidades de arrefecimento, em comparação com as duas ferramentas de análise dinâmica.

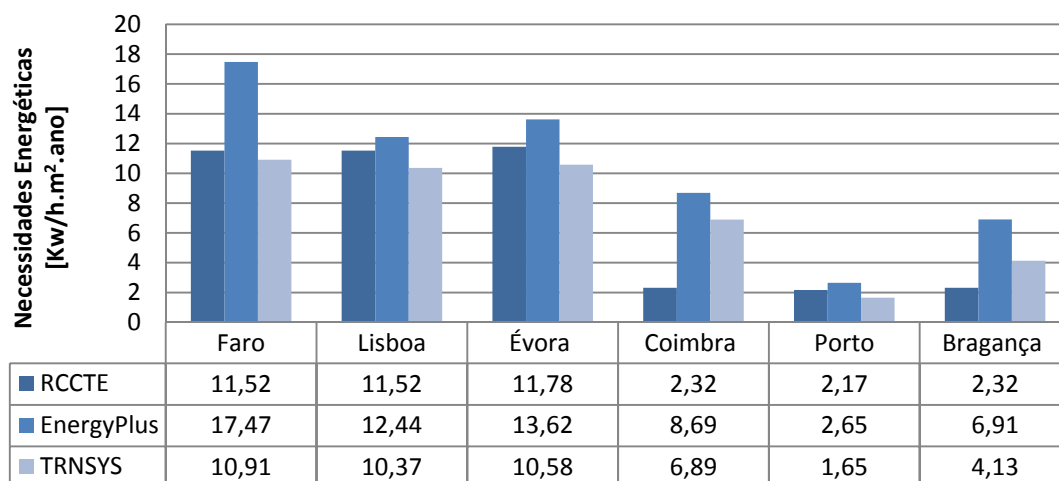


Figura 4.2 - Necessidades energéticas de arrefecimento do modelo #1 sem solário

No que diz respeito às necessidades energéticas anuais é possível verificar, na figura 4.3, que os menores valores foram alcançados com a ferramenta de análise dinâmica *EPlus* em todas as cidades, excepto Faro. Estes resultados devem-se, mais uma vez, à contabilização rigorosa dos ganhos solares feita pelo *EPlus*, que resulta em menores necessidades de aquecimento e maiores necessidades de arrefecimento. A diferença de resultados entre as ferramentas devido a esta particularidade é evidenciada na cidade de Bragança.

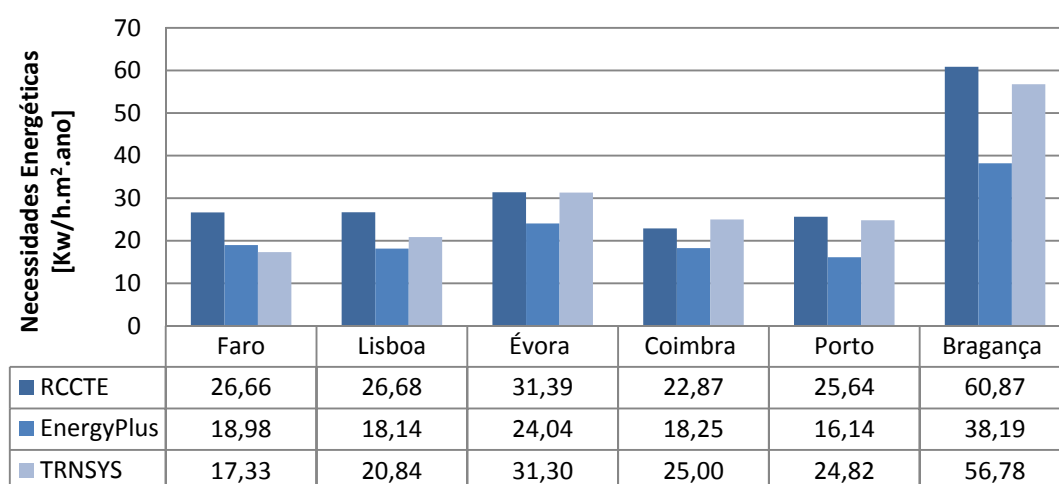


Figura 4.3 - Necessidades energéticas anuais de climatização do modelo #1 sem solário

#### 4.1.2. MODELO #2 – VARANDA ADJACENTE COM LARGURA DE 4M NA FACHADA SUL

Com este modelo os valores das necessidades energéticas resultantes do método simplificado do RCCTE são iguais aos do modelo anterior, pois este método não tem em consideração o sombreamento da envolvente opaca. Porém, os resultados das necessidades energéticas das duas ferramentas de análise dinâmica diferem dos resultados obtidos com o modelo anterior. A redução do sombreamento de toda a fachada provocou uma ligeira redução das necessidades de aquecimento e um ligeiro aumento das necessidades de arrefecimento, como seria esperado. No entanto, as necessidades energéticas anuais não sofreram um aumento significativo, como é possível observar-se pela figura 4.4.

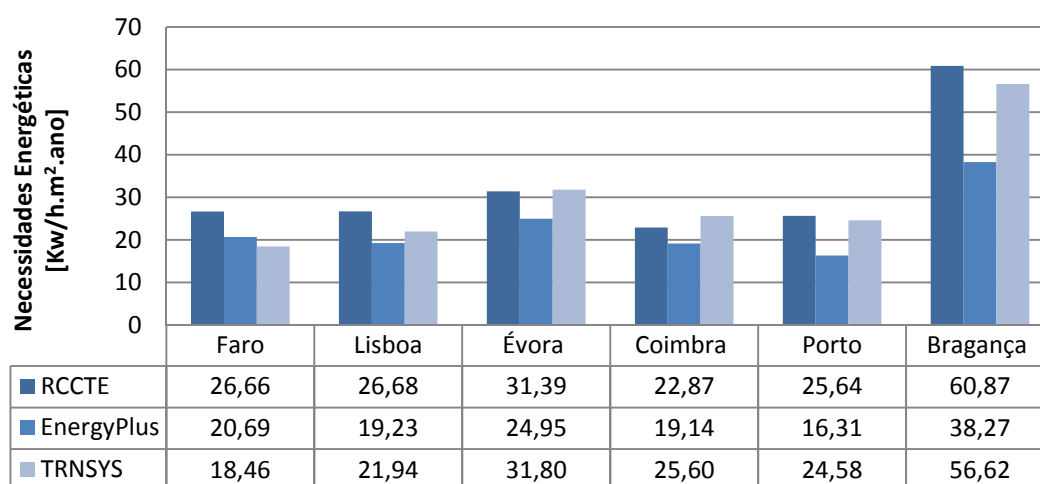


Figura 4.4 - Necessidades energéticas anuais do modelo #2 sem solário

#### 4.1.3. MODELO #3 – VARANDA SEMI-INTEGRADA COM LARGURA DE 4M NA FACHADA SUL

Os valores das necessidades energéticas obtidos com o terceiro modelo, correspondente à fracção autónoma com varanda semi-integrada, sofreram uma alteração como se pode observar na figura 4.5.

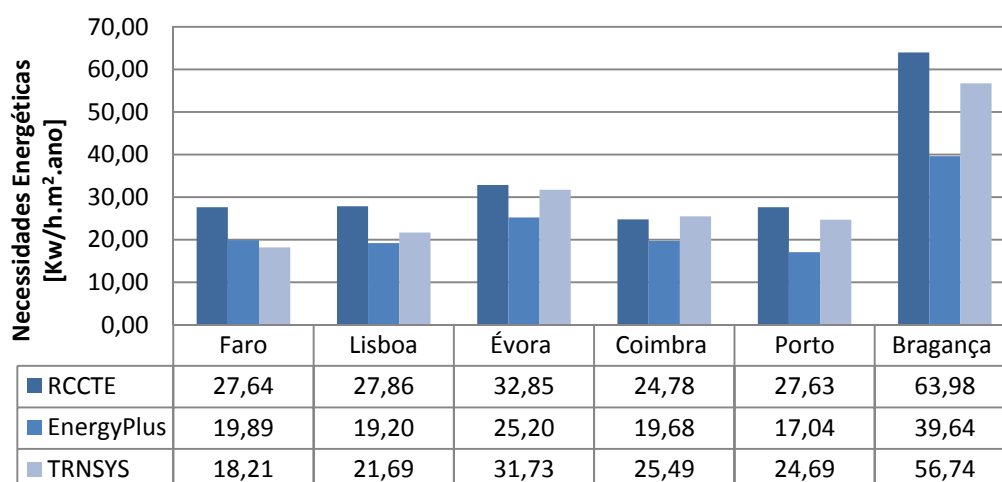


Figura 4.5 - Necessidades energéticas anuais do modelo #3 sem solário

As diferenças observadas devem-se ao sombreamento provocado por elementos verticais no envidraçado, consequência da configuração da varanda. O sombreamento gerou um aumento das necessidades de aquecimento e uma diminuição das necessidades de arrefecimento, tanto nos resultados obtidos através das ferramentas de análise dinâmica como do método simplificado do RCCTE. Em relação às necessidades energéticas anuais verificou-se um pequeno aumento.

#### 4.1.4. MODELO #4 – VARANDA INTEGRADA COM LARGURA DE 4M NA FACHADA SUL

No que diz respeito ao modelo com varanda integrada, o sombreamento causado por elementos verticais foi aumentado, o que manteve a tendência do modelo anterior em relação a necessidades de aquecimento e arrefecimento. Em relação às necessidades energéticas anuais observou-se um aumento, como é possível verificar pela figura 4.6.

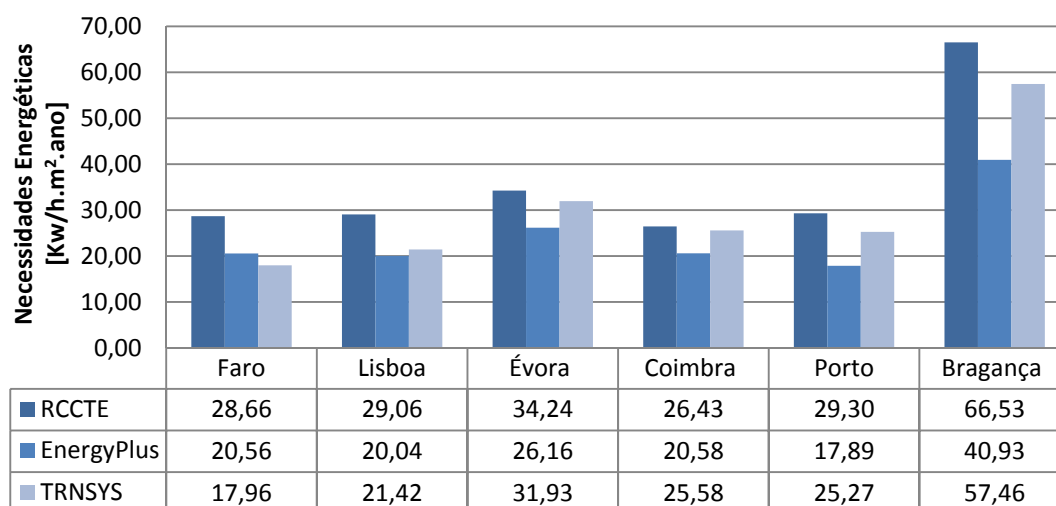


Figura 4.6 - Necessidades energéticas anuais do modelo #4 sem solário

#### 4.2. COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA APLICAÇÃO DO SOLÁRIO COM AS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DINÂMICA

A influência da aplicação do solário no comportamento térmico da fracção autónoma foi analisada com recurso às duas ferramentas de análise dinâmica. Para tal foram simulados cinco modelos, em seis cidades do território continental. Os modelos analisados dizem respeito à fracção autónoma em estudo sem solário e com solário aplicado a toda a fachada Sul. A constituição do solário teve como base um envidraçado simples, com área variável, consoante se considere ou não a existência de um muro de tijolo. Foram simulados modelos com e sem estores interiores activos, no período de arrefecimento definido no RCCTE. Assim sendo, tem-se que o primeiro caso é o solário com vidro simples com muro de 1m e sem estore interior, o segundo caso consiste num solário com vidro simples em toda a varanda e sem estore. O terceiro e quarto caso são idênticos aos anteriores mas

integram estores interiores. No quadro 4.1 são apresentadas as simulações realizadas e as designações.

Quadro 4.1 - Simulações realizadas na comparação da eficiência energética da aplicação do solário com as ferramentas de análise dinâmica

| Simulação | Tipo de vidro | Área do envidraçado  | Sombreamento |
|-----------|---------------|----------------------|--------------|
| #1        | Vidro Simples | com muro opaco de 1m | sem estore   |
| #2        |               | sem muro opaco de 1m |              |
| #3        |               | com muro opaco de 1m | com estore   |
| #4        |               | sem muro opaco de 1m |              |

Para esta análise teve-se em atenção as limitações das duas ferramentas, de modo a poder-se utilizar variáveis idênticas em ambas. O *EPlus* oferece uma maior escolha no que diz respeito a sombreamento interior e exterior, enquanto o *TRNSYS* está muito limitado neste aspecto, pelo que se escolheu um tipo de sombreamento no *EPlus* que fosse idêntico ao do *TRNSYS*. Também não foi utilizada qualquer tipo de ventilação natural para a estação de arrefecimento visto este aspecto não poder ser simulado no *TRNSYS*.

Este análise teve por objectivo averiguar se o comportamento térmico da fracção autónoma com a aplicação do solário era idêntico nas duas ferramentas. Um estudo mais exaustivo, tendo em vista a optimização deste sistema, será realizado na análise de sensibilidade. Todos os resultados das necessidades energéticas das simulações realizadas para esta análise encontram-se no Anexo-B.

#### 4.2.1. NECESSIDADES ENERGÉTICAS DE AQUECIMENTO

As necessidades de aquecimento do primeiro e terceiro modelos são iguais, assim como as do segundo e quarto modelos, visto que os estores interiores só estão activos durante o período de arrefecimento, não tendo qualquer influência no período de aquecimento. Por esta razão só serão apresentados os resultados das simulações sem estores.

Nas figuras 4.7 e 4.8 é possível observar os resultados das necessidades de aquecimento das simulações realizadas, em seis cidades diferentes, com o *EPlus* e com o *TRNSYS*, respectivamente.

Observa-se, a partir na figura 4.7, que, em todas as cidades, os valores das necessidades de aquecimento iniciais são significativamente reduzidos, de acordo com as duas ferramentas utilizadas, o que traduz o impacte positivo da aplicação do solário. Nas simulações realizadas com o *TRNSYS* a redução das necessidades de aquecimento é menor, por razões já apresentadas anteriormente no ponto 3.5. Em ambas as ferramentas a solução construtiva com vidro simples sem muro foi a que se mostrou mais eficaz na redução das necessidades, o que é justificado pela maior área de envidraçado desta solução, que origina ganhos solares superiores aos da solução em que se considera a existência de muro.



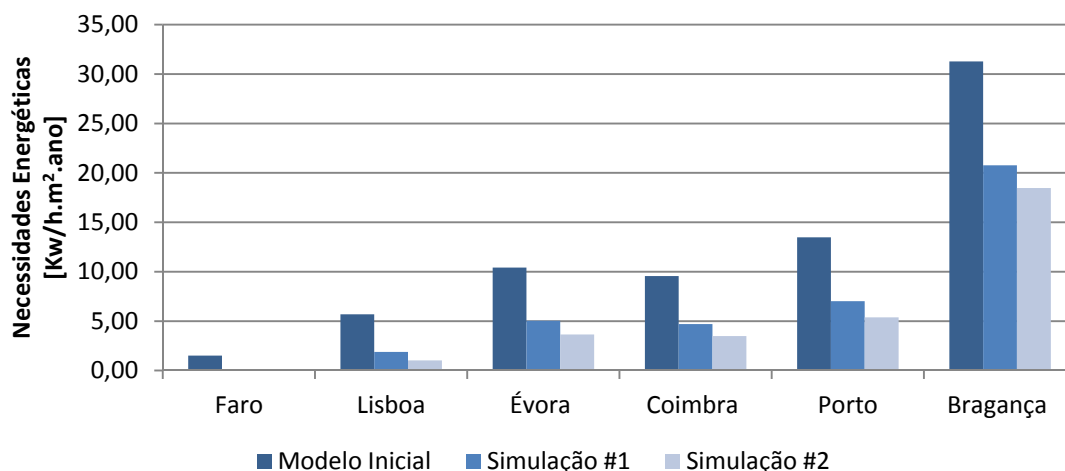


Figura 4.7 - Necessidades energéticas de aquecimento da análise dinâmica com o *EPlus*

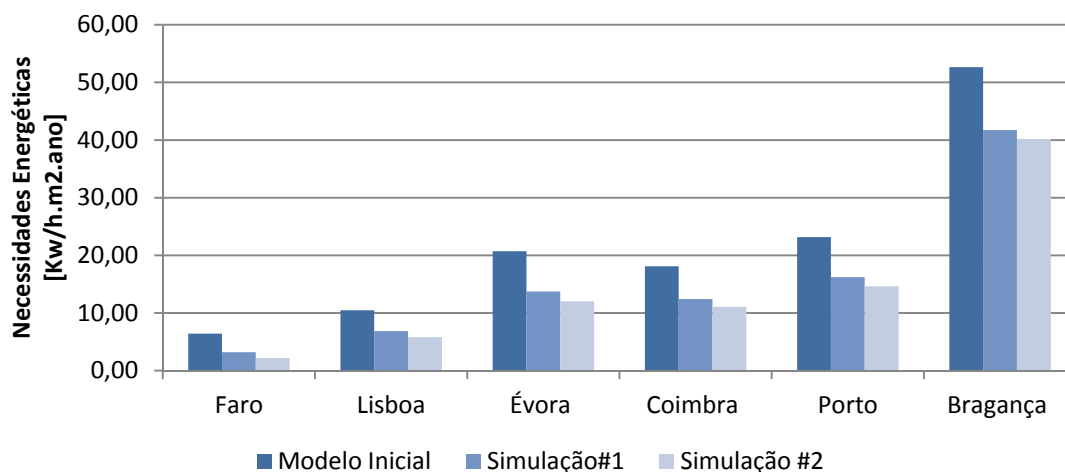


Figura 4.8 - Necessidades energéticas de aquecimento da análise dinâmica com o *TRNSYS*

#### 4.2.2. NECESSIDADES ENERGÉTICAS DE ARREFECIMENTO

Para as necessidades de arrefecimento serão apresentados os resultados de todos os casos, de modo a observar-se o comportamento térmico do sistema com (simulações #3 e #4) e sem estores interiores (simulações #1 e #2).

Nas figuras 4.9 e 4.10 observam-se os resultados obtidos das necessidades de arrefecimento obtidos através do *EPlus* e *TRNSYS* respectivamente. Como era de prever, registou-se o sobreaquecimento da fracção autónoma com solário sem sombreamento integrado, especialmente nas zonas climáticas em que a estação de arrefecimento é mais gravosa, como é o caso de Faro e Lisboa. Com a utilização de estores interiores as necessidades energéticas diminuiriam significativamente. Apesar

desta redução não foram registadas melhorias em relação à situação inicial para os valores obtidos através de ambas as ferramentas.

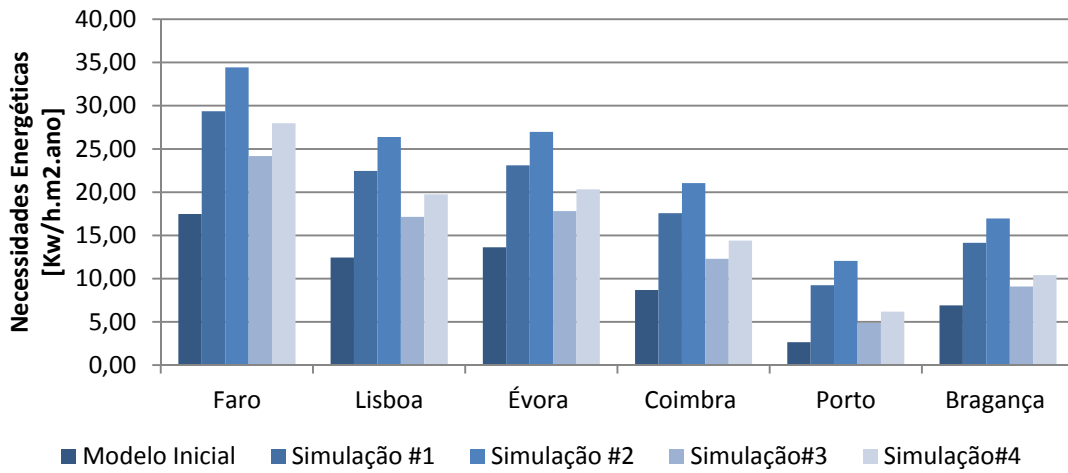


Figura 4.9 - Necessidades energéticas de arrefecimento da análise dinâmica com o *EPlus*

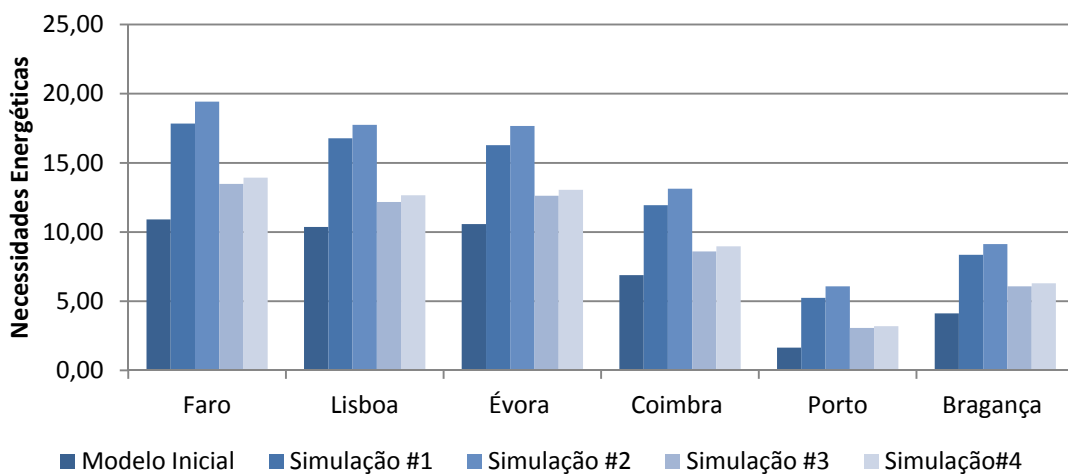


Figura 4.10 - Necessidades energéticas de arrefecimento da análise dinâmica com o *TRNSYS*

O sobreaquecimento da fracção autónoma com solário foi mais evidente nas simulações realizadas com o *EPlus*, uma vez que a contabilização dos ganhos solares com esta ferramenta é superior às calculadas com o *TRNSYS*, pelas razões já descritas no ponto 3.5. Esta diferença é também visível pela comparação de resultados das necessidades energéticas dos modelos de solário com maior e menor área de envidraçado (simulações #1-#2 e simulações #3-#4, respectivamente), que pouco diferem no *TRNSYS*.

### 4.2.3. NECESSIDADES ENERGÉTICAS ANUAIS DE CLIMATIZAÇÃO

Pela observação dos resultados das necessidades energéticas totais obtidas com ambas as ferramentas, apresentados nas figuras 4.11 e 4.12, verifica-se que, de uma forma geral, a melhor situação corresponde ao modelo de solário com maior área de envidraçado e estores interiores, activos nos períodos de arrefecimento (simulação #4). No entanto, tendo em conta os resultados obtidos com o *EPlus*, verifica-se que nas cidades em que o período de arrefecimento é mais gravoso - Faro, Lisboa e Évora, a solução com melhores resultados é a terceira, que tem menor área de envidraçado que a indicada anteriormente. Como se pode verificar pelas figuras 4.9 e 4.10, o terceiro modelo apresenta menores necessidades de arrefecimento para estas cidades do que o quarto, tanto no *EPlus* como no *TRNSYS*.

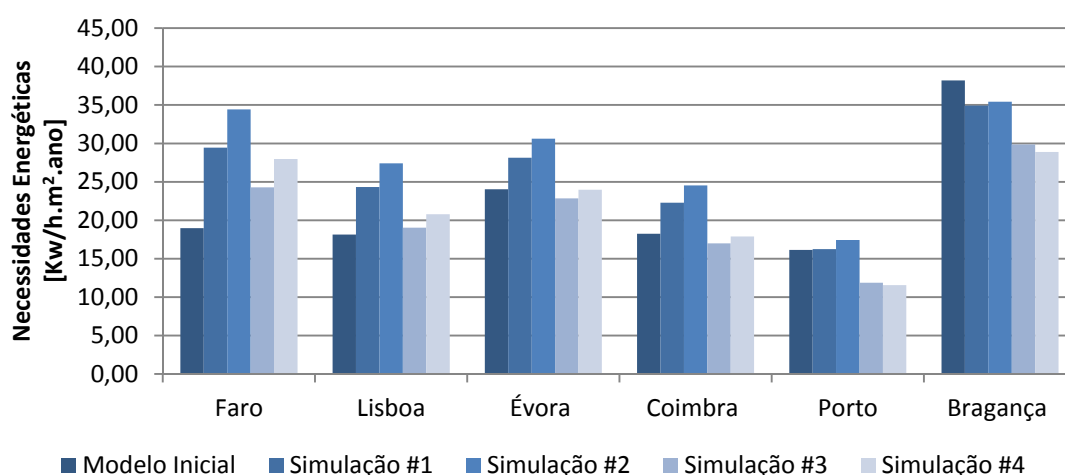


Figura 4.11 - Necessidades energéticas anuais da análise dinâmica com o *EPlus*

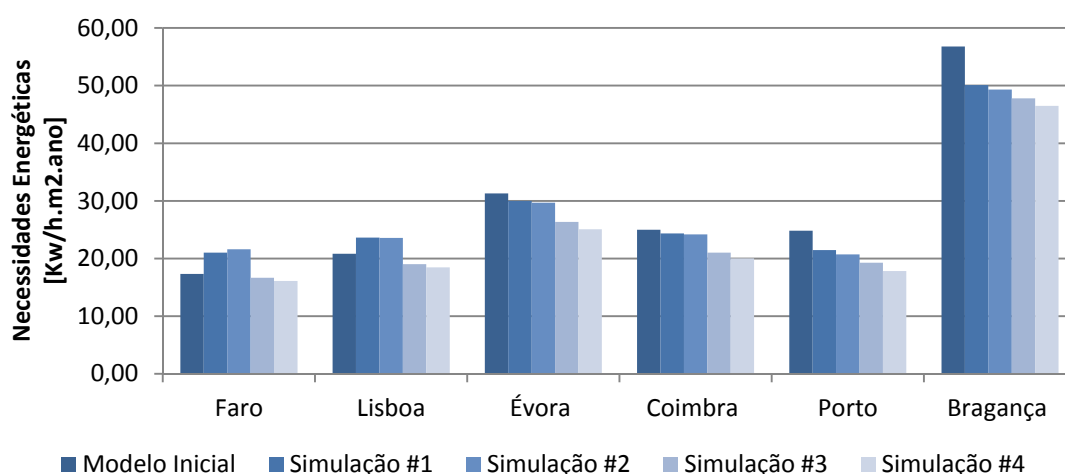


Figura 4.12 - Necessidades energéticas anuais da análise dinâmica com o *TRNSYS*

As maiores diferenças entre os resultados obtidos com ambas as ferramentas ocorrem para as cidades em que as estações de aquecimento ou arrefecimento são mais rigorosas, como Bragança e Faro, respectivamente. Estas discrepâncias são justificadas com as desigualdades dos algoritmos dos programas de simulação no que diz respeito aos ganhos solares, que foram justificados no ponto 3.5.

Apesar das diferenças registadas nos resultados obtidos com as duas ferramentas de simulação, é possível concluir que ambas apontam potencialidades de aplicação do solário à fracção autónoma, já que foram obtidas melhorias na ordem dos 20% em algumas cidades. Estes resultados podem ser observados no quadro 4.2, que apresenta a redução dos consumos, em percentagem, obtida com o modelo de solário que demonstrou ser mais eficaz em cada cidade.

Quadro 4.2 - Redução das Necessidades Energéticas Totais de Climatização para a melhor situação

|          | EPlus  | TRNSYS | Simulação |
|----------|--------|--------|-----------|
| Faro     | 27,9%  | -7,1%  | #3        |
| Lisboa   | 0,3%   | -11,3% | #3        |
| Évora    | -4,9%  | -19,8% | #3        |
| Coimbra  | -6,8%  | -19,9% | #4        |
| Porto    | -28,3% | -28,2% | #4        |
| Bragança | -24,4% | -18,1% | #4        |

Os resultados apresentados podem ser melhorados, uma vez que nestas simulações não se teve a preocupação em otimizar o sistema de modo a obter-se a melhor solução possível.

Com esta análise observou-se que os valores das necessidades energéticas obtidos através do *EPlus* são os resultados que reflectem melhor a contribuição dos ganhos solares no comportamento térmico da fracção autónoma. Sendo a contabilização dos ganhos solares uma parte fundamental na análise de um sistema solar passivo, e uma vez que o EnergyPlus efectua um cálculo preciso destes ganhos, será esta a ferramenta indicada para efectuar uma análise de sensibilidade dos parâmetros que compõem o sistema. Para além disso, esta ferramenta dispõe de algoritmos de cálculo que possibilitam a utilização de ventilação natural e vários tipos de dispositivos de sombreamento que são parâmetros importantes para a optimização do sistema.

### 4.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Um dos objectivos da presente dissertação é o estudo da influência dos parâmetros que compõem o solário no seu comportamento térmico. Esta análise é importante na medida em que permite conhecer a composição do sistema que proporciona reduções significativas das necessidades energéticas de climatização em cada zona climática.

Os parâmetros analisados foram escolhidos tendo em conta estratégias de aquecimento e arrefecimento. Assim sendo, de modo a potenciar os ganhos solares na estação de aquecimento, foi analisada a influência do tipo e área de envidraçado. De modo a minimizar o risco de sobreaquecimento na estação de arrefecimento, foi estudado o tipo de sombreamento mais adequado, assim como a contribuição da ventilação natural.

Uma vez que a orientação dos sistemas solares passivos contribui para o seu bom desempenho, foi estudada a sua variação, de modo a averiguar até que ponto será viável a aplicação de um solário em orientações que não a Sul.

A análise de sensibilidade teve por base os modelos iniciais do ponto 4.1, aos quais foram aplicados solários com várias tipologias e composições. Os resultados apresentados na sequência desta análise serão sempre relativos a necessidades energéticas totais de climatização, sendo que os resultados separados das necessidades de aquecimento e arrefecimento podem ser consultados nos anexos.

#### **4.3.1. TIPO E ÁREA DO ENVIDRAÇADO**

No que diz respeito aos vãos envidraçados foram simulados envidraçados de vidro simples e de vidro duplo. Este envidraçado foi aplicado à varanda do modelo inicial, mantendo num caso o muro de 1m já existente, e noutro caso não considerando o muro, simulando-se assim duas áreas envidraçadas.

As simulações destes modelos tiveram como objectivo averiguar qual o tipo de vidro que potenciava mais os ganhos solares. Para além disso, pretendia-se verificar se o aumento da área de envidraçado do solário influenciava a redução das necessidades de aquecimento, e até que ponto essa redução seria benéfica em termos de redução das necessidades energéticas anuais.

Os envidraçados utilizados são compostos por um vidro corrente de  $2.5mm$  de espessura, no caso simples, e por dois vidros do mesmo tipo separados por um espaço de ar de  $5mm$  de espessura, no caso do vidro duplo, todos com caixilharia de alumínio sem corte térmico.

Na figura 4.13 é possível observar-se os resultados da aplicação dos envidraçados à varanda do caso inicial. Em termos de necessidades totais, Bragança é a única cidade em que a utilização de um solário nas condições descritas, isto é, apenas com envidraçado simples ou duplo, com maior ou menor área, aplicado na varanda, sem consideração de estratégias de arrefecimento, melhora o comportamento da fracção autónoma. Tais resultados justificam-se com o facto de Bragança ser a cidade com o Inverno mais rigoroso, e portanto estar muito dependente da estação de aquecimento para que o sistema se demonstre eficaz.

Nas restantes cidades, apesar da redução das necessidades de aquecimento ser na ordem dos 50% e 100%, em termos totais não se registam melhorias devido ao aumento das necessidades de arrefecimento (ver anexo).

A aplicação deste sistema em Faro anula as necessidades de aquecimento. No entanto, o clima neste local é mais rigoroso na estação de arrefecimento, pelo que o efeito do sobreaquecimento é mais acentuado, tendo agravado bastante as necessidades de arrefecimento e, consequentemente, as necessidades totais.

Na cidade do Porto verificou-se um aumento das necessidades de arrefecimento, entre os 250% e 400% (ver anexo). Apesar deste agravamento, não houve um acréscimo significativo ao nível das necessidades totais, o que se deve ao facto de as necessidades de arrefecimento iniciais nesta cidade serem reduzidas, e a redução do consumo energético nos períodos de aquecimento equilibrar o aumento das necessidades de arrefecimento.

Em termos de aquecimento, verifica-se uma maior redução das necessidades energéticas nos casos em que se considera uma maior área de envidraçado. A redução obtida nos modelos em que se considera a existência de muro de tijolo é o dobro da que se obtém quando não se tem o muro.

O tipo de envidraçado que melhor potencia os ganhos solares é o de vidro duplo. É de salientar que a solução que obtém melhores resultados na redução das necessidades de aquecimento, para todas as cidades, é a do envidraçado de vidro duplo em toda a fachada, apesar de na figura 4.13 ser a pior solução em necessidades totais, o que se deve ao sobreaquecimento verificado nos períodos de arrefecimento e consequente agravamento das necessidades anuais. Esta tendência demonstra a importância da utilização de parâmetros que minimizem os ganhos por radiação solar na estação de arrefecimento.

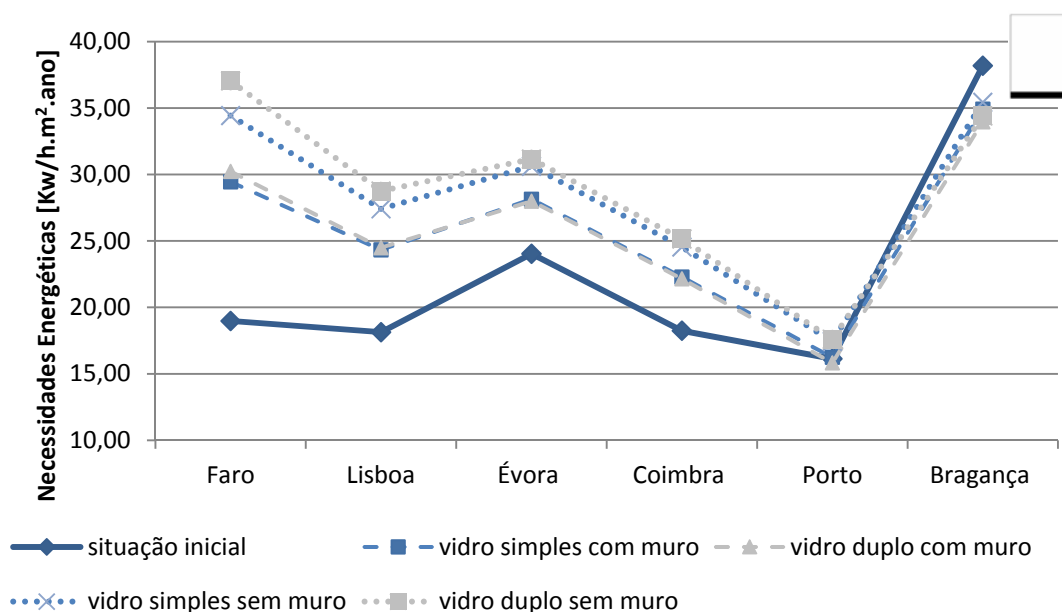


Figura 4.13 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização do envidraçado para o Modelo #1

Para o caso da varanda de 4m adjacente (modelo #2), e varanda de 4m semi-adjacente (modelo #3) as tendências do modelo mantêm-se, com a diferença das necessidades energéticas totais de climatização estarem mais próximas dos valores da situação inicial. Isto deve-se ao facto da área de envidraçado do solário ser menor e, conseqüentemente, os ganhos solares serem menores que no caso anterior.

No segundo modelo a redução das necessidades de aquecimento varia entre 30% e 60%, e no terceiro caso varia entre 20% e 50%. Apesar destes valores, no que diz respeito aos valores das necessidades energéticas totais, o terceiro modelo apresenta melhores resultados, pois o sobreaquecimento da fracção autónoma na estação de aquecimento não é tão agravado como no segundo modelo. É de realçar que no terceiro modelo apenas com a aplicação dos envidraçados, e sem qualquer tipo de estratégia definida para a estação de arrefecimento, obteve-se uma redução das necessidades totais, no Porto e em Bragança.

Nas simulações realizadas para a varanda de 4m integrada a tendência dos resultados obtidos foi diferente em comparação com os dos modelos anteriores, como se pode observar na figura 4.14.

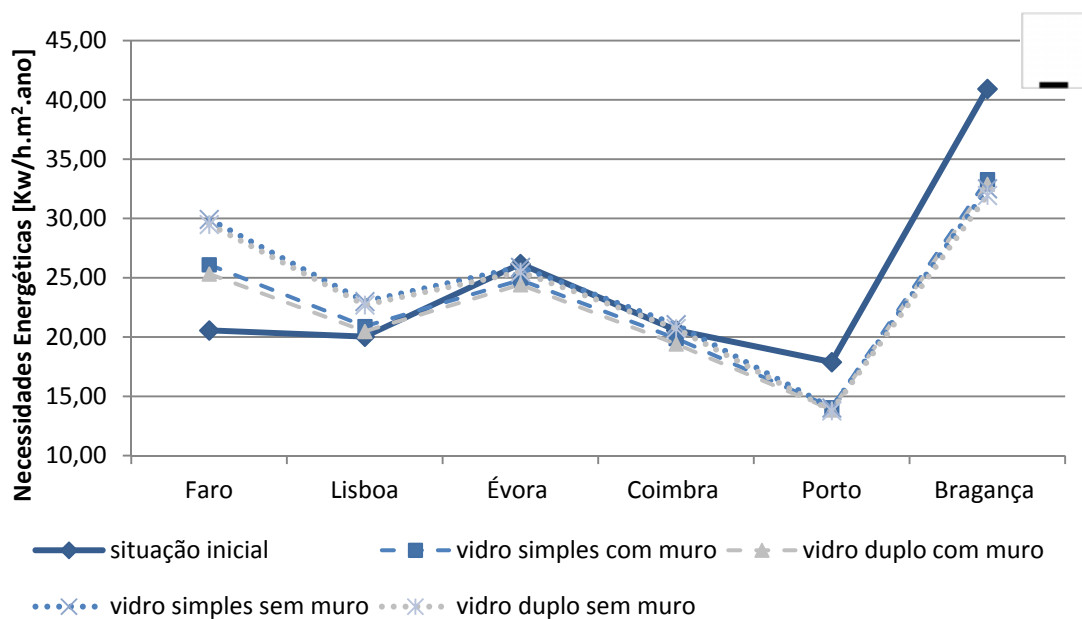


Figura 4.14 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização do envidraçado para o Modelo #4

Neste caso verificaram-se melhorias na redução das necessidades totais, comparativamente com a situação inicial, em Bragança, Porto, Coimbra e Évora. A configuração do solário deste modelo teve influência nestes resultados, na medida em que a radiação solar captada através do envidraçado é distribuída em mais duas paredes em contacto com a fracção autónoma, a parede Este e Oeste do solário. Este modelo potencia, de forma mais eficaz que os outros modelos, os ganhos por radiação solar no Inverno. No Verão, com a subida da posição do Sol, a captação e distribuição da radiação já é mais limitada, o que evita um agravamento tão acentuado das necessidades de aquecimento como nos modelos anteriores. A redução das necessidades de aquecimento para este modelo varia entre

os 50% e os 100%. É de salientar que estas percentagens de redução são semelhantes às obtidas com o modelo de varanda em toda a fachada, que tem o dobro da área de envidraçado.

Desta análise conclui-se que o solário com vidro duplo e sem muro, de uma forma geral, é o que apresenta melhores valores ao nível da redução das necessidades de aquecimento. Outra ilação que é possível retirar é que o modelo mais eficiente energeticamente corresponde ao da fracção autónoma com o solário integrado. Também se pode concluir que é fundamental a aplicação de estratégias para minimizar os ganhos solares na estação de arrefecimento, de modo a viabilizar a aplicação deste sistema solar passivo.

#### **4.3.2. TIPO DE DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO**

Para estudar o efeito do sombreamento num sistema deste tipo foram simuladas persianas exteriores, estores interiores com baixo coeficiente de reflexão, LR, e estores interiores com coeficiente de reflexão elevado, HR. Estes parâmetros foram testados com o objectivo de diminuir as necessidades de arrefecimento, de modo que a sua utilização foi programada no *EPlus* apenas para os meses de arrefecimento definidos no RCCTE.

Quando estes dispositivos de sombreamento são activados abrangem toda a área do envidraçado do solário, de modo a minimizar os ganhos solares. Uma propriedade importante destes dispositivos de sombreamento é o coeficiente de reflexão, que consiste na proporção do fluxo de radiação solar incidente numa superfície e o fluxo reflectido. Quando o coeficiente de reflexão é 1 toda a radiação é reflectida [16]. A persiana exterior tem o coeficiente de reflexão de 0,5, o estore interno de baixa reflectividade apresenta um valor de 0,2 e o estore interior com alta reflectividade um valor de 0.8.

É importante referir que as ripas dos estores interiores formam um ângulo de 45° com a horizontal, permitindo assim a passagem de luz natural de modo a garantir a iluminação do solário e da fracção autónoma. No caso da persiana exterior a passagem de luz natural será quase nula, uma vez que quando este dispositivo é utilizado cobre toda a área do envidraçado e as suas ripas não permitem a variação do seu ângulo.

É de referir que todos os dispositivos de sombreamento mencionados anteriormente foram simulados em todos os envidraçados do subcapítulo anterior, mas dado o grande número de simulações serão apenas apresentados alguns casos neste subcapítulo. Os resultados de todas as simulações podem ser consultados nos anexos.

Na figura 4.15 é possível observar os resultados da aplicação dos dispositivos de sombreamento aos casos com vidro simples e vidro duplo aplicados na varanda sem muro para o modelo com varanda em toda a largura da fachada Sul (modelo #1). Numa primeira análise é possível verificar que a integração de sombreamento introduz melhorias significativas ao nível das necessidades energéticas totais em todas as cidades, que se devem à redução do efeito de sobreaquecimento do solário. No



entanto, é de referir que as necessidades de arrefecimento continuam a ser agravadas com a aplicação do sistema.

Como se observa na figura 4.15, foram obtidas reduções das necessidades energéticas anuais em Bragança e no Porto, em todas as situações, pois são as cidades com menores necessidades de arrefecimento iniciais, pelo que o sobreaquecimento não é tão acentuado. As reduções das necessidades energéticas totais nestas cidades são da ordem dos 25% a 30%. Nas restantes cidades, em termos de necessidades energéticas totais, ainda não se registaram melhorias, à excepção de Coimbra no caso em que se tem vidro simples e estores interiores com alta reflectividade.

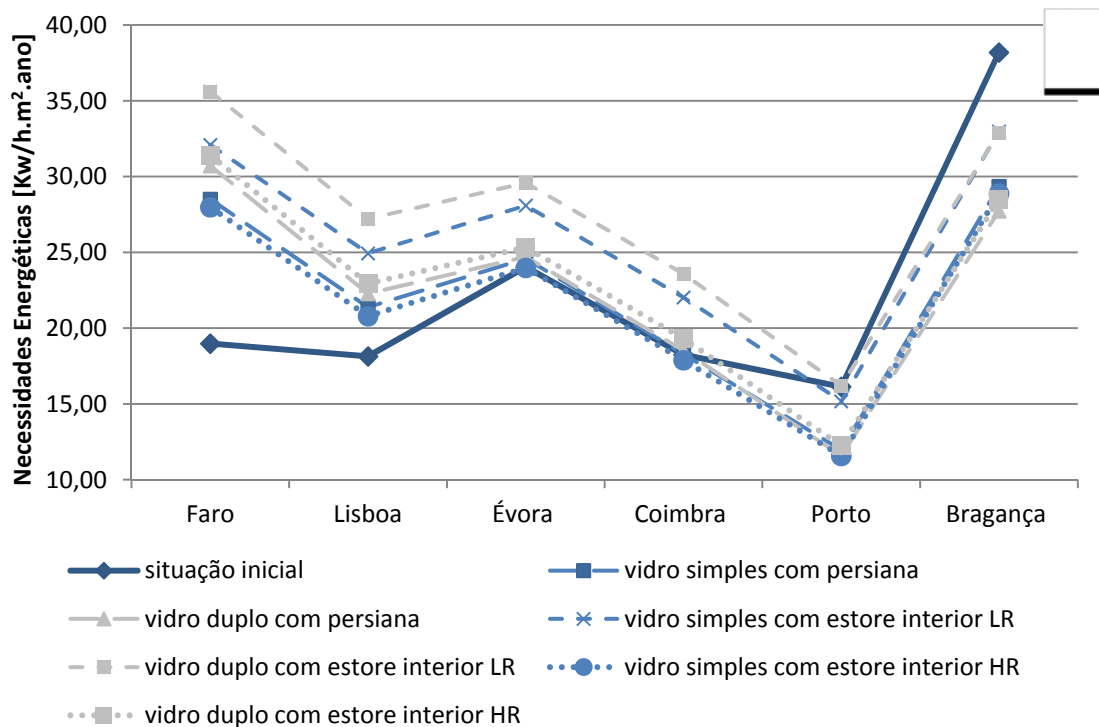


Figura 4.15 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização do sombreamento para o Modelo #1

Pela análise da figura 4.15 pode concluir-se que os dispositivos de sombreamento com melhores resultados em todas as cidades são, no caso do vidro simples, o estore interior com alta reflectividade e, no caso do vidro duplo, a persiana exterior. Nos modelos com vidro duplo e estores interiores de alta reflectividade, os valores são muito próximos dos obtidos com recurso a persianas exteriores. Assim sendo, os estores interiores de alta reflectividade podem considerar-se as melhores soluções, visto que permitem a passagem de iluminação natural, ao contrário das soluções com as persianas exteriores. Foram também realizadas simulações com estores interiores de baixa reflectividade mas, como seria de esperar, os resultados obtidos para as necessidades energéticas foram superiores aos outros dois casos.

Os resultados das simulações dos parâmetros de sombreamento para os casos com envidraçado simples com muro indicaram como melhores soluções a utilização do estore interior de alta reflectividade. Quando se tem vidro duplo, a persiana demonstra ser a melhor solução, tendo esta tendência sido verificada em todas as cidades.

A análise dos dispositivos de sombreamento aplicados isoladamente ao sistema não foi realizada para os outros modelos com diferentes tipologias de varandas, pois seria de esperar um comportamento idêntico dos dispositivos de sombreamento.

Nas cidades com a estação de arrefecimento mais rigorosa, como é o caso de Faro, Lisboa e Évora, não foram registadas melhorias ao nível das necessidades energéticas totais, pelo que não é viável a aplicação do sistema somente com esta estratégia para a estação de arrefecimento. Para estas cidades é necessário minimizar ainda mais o efeito do sobreaquecimento nesta estação, razão pela qual será simulada ventilação natural no solário.

#### **4.3.3.CONTRIBUIÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL**

Para a simulação da ventilação natural foi considerada a abertura de uma área de envidraçado do solário de  $0,3\text{m} \times 8,0\text{m} = 2,4\text{m}^2$ , no modelo da fracção autónoma com solário em toda a fachada. Nos restantes modelos, em que a largura da varanda é de  $4,0\text{m}$ , a área de abertura considerada é  $0,3\text{m} \times 2,7\text{m} = 0,8\text{m}^2$ . Esta área é referente a abertura de janelas basculantes, aplicadas no solário com o objectivo da sua utilização diminuir as temperaturas nos períodos de arrefecimento. Considerou-se a abertura das janelas em simultâneo com a utilização dos dispositivos de sombreamento no período de arrefecimento definido pela legislação em vigor, de Junho a Agosto inclusive.

Serão apresentados os resultados referentes aos modelos com maior área de envidraçado (sem muro), estando os restantes resultados disponíveis em anexo. Nas simulações foram utilizados os dois tipos de sombreamento mais eficientes – as persianas exteriores e os estores interiores com elevado coeficiente de reflexão.

Na figura 4.16 é possível observar os resultados obtidos para as necessidades energéticas de climatização com a implementação da ventilação natural ao sistema. Com esta nova estratégia de arrefecimento é possível verificar reduções bastante significativas das necessidades energéticas de climatização, que são cerca de 37% e 48% para as cidades de Bragança e Porto, respectivamente. Em Évora e Coimbra também já são registadas melhorias em relação à situação inicial, sendo estas melhorias na ordem dos 15% e 20%, respectivamente. Nas cidades com uma estação de arrefecimento mais rigoroso, como é o caso de Faro e Lisboa, ainda não se registam melhorias à excepção de Lisboa, nos casos em que os solários integram estores interiores de alta reflectividade. Essas melhorias, no entanto, são pouco significativas.

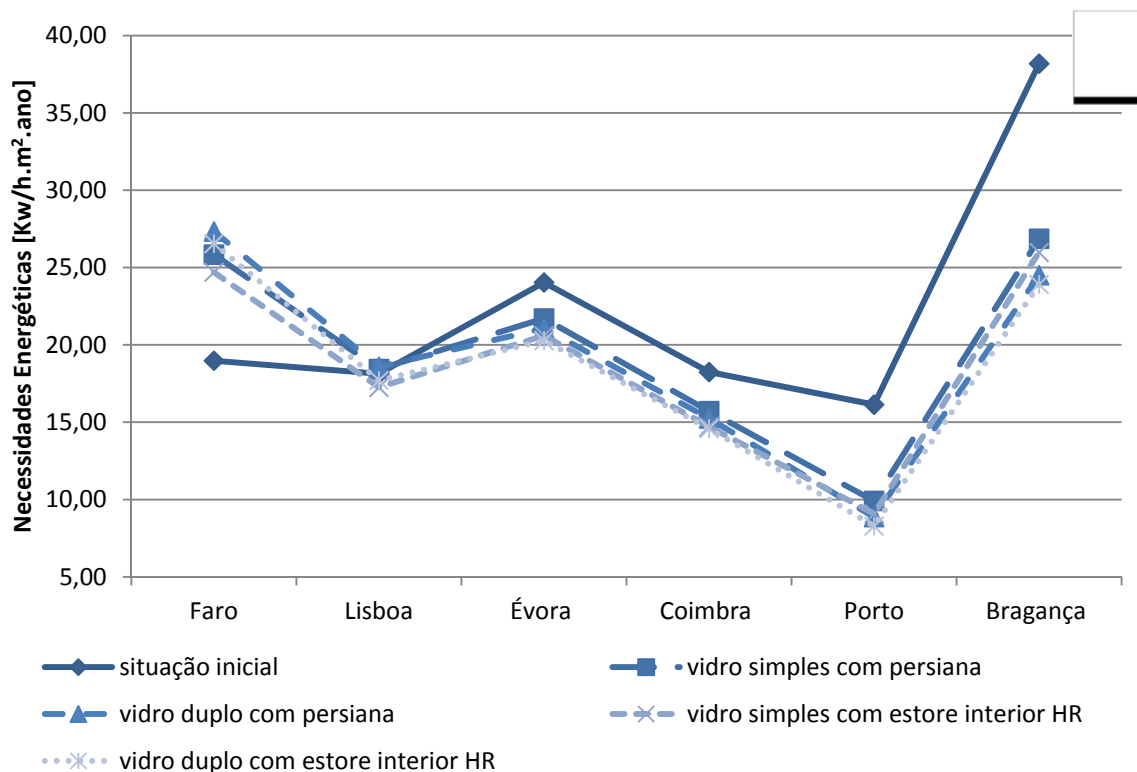


Figura 4.16 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização com ventilação natural para o Caso #1

As soluções que tornam o sistema mais eficiente são, em todas as cidades, aquelas em que o sombreamento é assegurado por estores interiores de alta reflectividade. Esta tendência também se verificou para os casos do solário com envidraçados simples e duplo com muro opaco. Conclui-se que a ventilação é mais eficiente quando se tem sombreamento pelo interior, pois o sombreamento exterior limita a área de abertura de ventilação. A utilização deste parâmetro é fundamental para a viabilidade de aplicação deste sistema.

Nos restantes modelos de solário o comportamento térmico deste tipo de estratégia foi idêntico, pelo que se optou não fazer esta análise em separado.

De referir que, apesar da ventilação natural combinada com um sistema de sombreamento mostrar-se eficaz na redução das necessidades anuais, em termos de arrefecimento não se verifica a diminuição dos valores iniciais, sendo que estas estratégias apenas anulam o efeito de sobreaquecimento introduzido pelo solário. De modo a reduzir os valores do  $N_{vc}$ , far-se-á um estudo sobre as datas de activação das estratégias de arrefecimento, nomeadamente o sistema de sombreamento e a ventilação natural, já que poderá existir necessidades de arrefecimento nos períodos de meia estação. Assim sendo, serão analisadas as necessidades energéticas diárias em todas as cidades, de modo a definir para cada uma o período no qual será necessário o uso de estratégias de arrefecimento.

#### 4.3.4. PLANEAMENTO DAS ESTRATÉGIAS DE ARREFECIMENTO

A análise do relatório referente às necessidades energéticas de cada cidade demonstrou que nos períodos de meia estação existem necessidades de arrefecimento que não estavam a ser abrangidas pelo planeamento de funcionamento das estratégias de arrefecimento, que correspondia ao período de arrefecimento definido no RCCTE, que abrange somente os meses de Junho a Agosto inclusive. Foi então definido um novo plano de funcionamento para as estratégias de arrefecimento, indicado no quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Plano de funcionamento das Estratégias de Arrefecimento

| Cidade   | Dia         |                |
|----------|-------------|----------------|
|          | Início      | Fim            |
| Faro     | 7 de Março  | 21 de Novembro |
| Lisboa   | 21 de Abril | 15 de Novembro |
| Évora    | 21 de Março | 9 de Novembro  |
| Coimbra  | 22 de Março | 6 de Novembro  |
| Porto    | 19 de Abril | 2 de Novembro  |
| Bragança | 2 de Maio   | 11 de Outubro  |

O novo planeamento de utilização das estratégias de arrefecimento foi simulado para os casos com todos os envidraçados do ponto 4.3.1., e com a melhor estratégia de arrefecimento, ou seja, com estores interiores de alta reflectividade e ventilação natural, activadas durante o período que consta no quadro 4.3. As estratégias de arrefecimento são definidas segundo uma programação simples de utilização constante ao longo do período definido. Os resultados obtidos com encontram-se na figura 4.17.

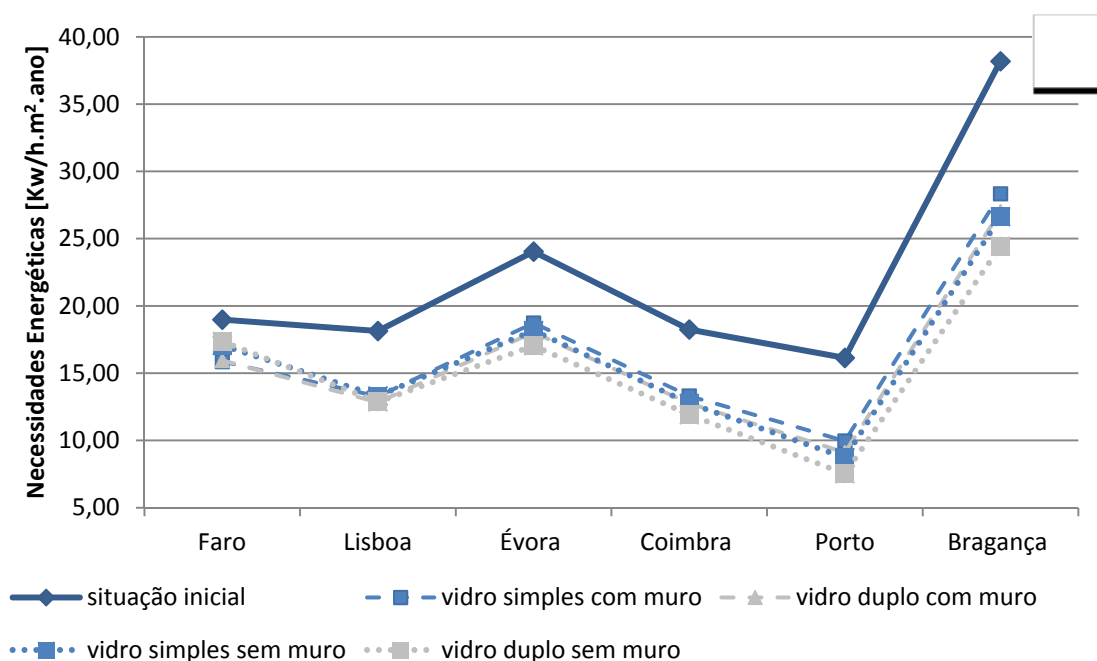


Figura 4.17 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização com planeamento para o Caso #1

Como se pode observar na figura 4.17, com o novo plano de funcionamento das estratégias de arrefecimento foi possível reduzir as necessidades energéticas totais de climatização em todas as cidades, em comparação com a situação inicial.

As necessidades de arrefecimento foram reduzidas em relação à situação inicial sem solário em todas as cidades, à excepção do Porto. Esta redução ocorre nos casos em que o solário tem envidraçado e muro opaco, o que é explicado pela menor área de envidraçado em comparação com os outros casos, pelo que os ganhos solares são menores. Para as cidades com uma estação de arrefecimento mais rigorosa as necessidades de arrefecimento foram reduzidas em 10%.

De referir que este planeamento teve pouca influência nas necessidades de aquecimento, pelo que as variações não foram significativas, como era de prever, dado que o objectivo seria a redução das necessidades de arrefecimento e não a alteração do comportamento térmico do sistema no período de aquecimento.

Ao nível das necessidades energéticas totais de climatização foram alcançadas melhorias, tendo-se obtido reduções do consumo energético em todas as cidades. Em Faro registou-se uma redução de cerca de 16%, em Lisboa de 29%, em Évora cerca de 29%, em Coimbra 34%, no Porto 53% e em Bragança 36%. Estes resultados são referentes ao modelo do solário adjacente em toda a largura da fachada Sul.

Desta análise conclui-se que existiam grandes necessidades de arrefecimento nos períodos de meia estação e as estratégias de redução destas necessidades não estavam activas nesses períodos, pelo que foi fundamental o planeamento de um novo período de activação. De igual modo foi importante e a diferenciação do planeamento para cada cidade, pois o clima diferente de cidade para cidade, assim como os valores das necessidades.

Os resultados dos outros modelos serão apresentados posteriormente, na secção 4.4, sendo que nos outros modelos foram aplicados os parâmetros que apresentaram melhores resultados no modelo da fracção autónoma com solário adjacente em toda a largura da fachada Sul. Assim, serão aplicados aos restantes modelos os casos com estores internos de alta reflectividade e ventilação natural com planeamento de funcionamento diferenciado para cada cidade, nas várias situações de envidraçados já analisados.

#### **4.3.5. ORIENTAÇÃO**

Uma das condicionantes de aplicação dos solários em edifícios existentes é orientação das varandas, pelo que o estudo do impacto da aplicação do solário em função da sua orientação é fundamental. Nesta análise recorreu-se às melhores soluções obtidas em cada cidade para o caso da varanda integrada de 4m, uma vez que a alteração da orientação dará origem a um comportamento idêntico nos outros modelos. No quadro 4.4 é possível observar-se a melhor solução de solário para cada cidade.

Quadro 4.4 - Melhor solução de solário para cada cidade

| Cidade                     | Parâmetros do Solário   |
|----------------------------|---|
| Faro                       | Vidro simples com muro opaco, estores internos com elevado coeficiente de reflexão, ventilação natural, planeamento das estratégias de arrefecimento otimizado por cidade |
| Lisboa<br>Coimbra          | Vidro simples sem muro opaco, estores internos com elevado coeficiente de reflexão, ventilação natural, planeamento das estratégias de arrefecimento otimizado por cidade |
| Évora<br>Porto<br>Bragança | Vidro duplo sem muro opaco, estores internos com elevado coeficiente de reflexão, ventilação natural, planeamento das estratégias de arrefecimento otimizado por cidade   |

Como é possível observar-se na figura 4.18, o solário orientado a Sul é o que apresenta o melhor comportamento térmico, como seria de esperar, dado que é a orientação com maior exposição solar. A cidade de Faro é a excepção, uma vez que nesta cidade a melhor situação é ter-se o solário orientado a Oeste, em que se obtém uma redução de 23,8% em relação ao modelo sem solário. Para esta cidade as orientações Este e Sul têm valores idênticos, sendo as diferenças pouco significativas. No entanto, em relação às necessidades de aquecimento, foi para a orientação Sul que se obteve os melhores resultados, sendo que para as necessidades de arrefecimento os melhores resultados foram obtidos para as direcções Este e Oeste, razão da proximidade dos resultados em termos totais.

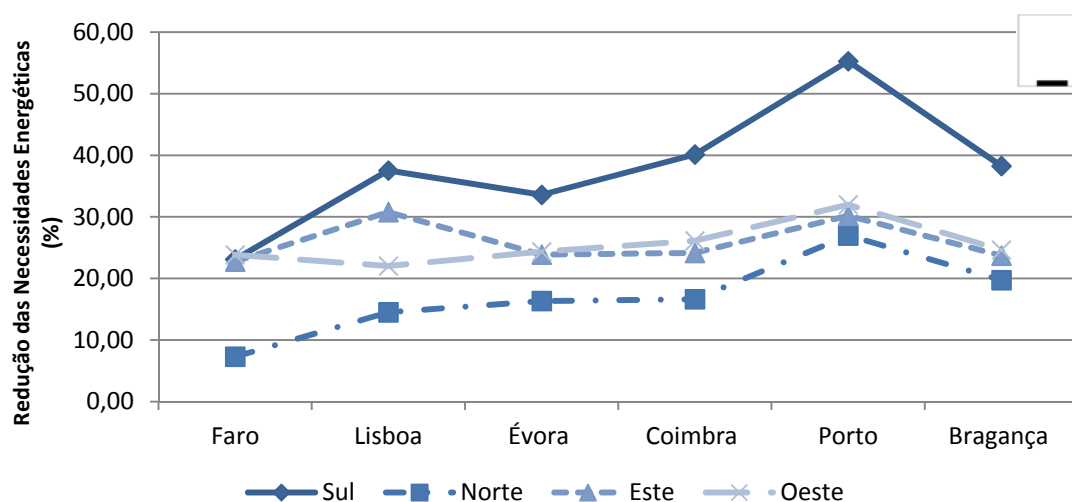


Figura 4.18 - Necessidades Energéticas Totais de Climatização com variação da orientação

As orientações Este e Oeste apresentam, de uma forma geral, reduções idênticas das necessidades energéticas, sendo a excepção a cidade de Lisboa. Nesta cidade o solário com orientação a Este reduz as necessidades energéticas em mais 8% que para Oeste, tendo melhor comportamento nos períodos de aquecimento e arrefecimento.

A orientação Norte é a que apresenta piores resultados, como seria de esperar, dado ser a orientação com menor exposição solar e a que tem maiores perdas de calor.

A aplicação do sistema é viável para todas as orientações no caso das cidades do Porto e Bragança, onde se registam reduções das necessidades energéticas superiores a 20%. Para as restantes cidades a aplicação do solário na fracção autónoma será viável em todas as orientações excepto na Norte, onde as reduções das necessidades energéticas são pouco significativas.

#### 4.4. SOLUÇÕES ÓPTIMAS

Observando os resultados obtidos na análise de sensibilidade conclui-se que as melhores soluções são as que integram estores internos com elevado coeficiente de reflexão e ventilação natural, sendo que a utilização destes parâmetros tem um planeamento diferente para cada cidade. Os parâmetros que variam são os envidraçados, de modo que vão ser estudados, para todos os modelos em todas as cidades, o tipo e área do envidraçado do solário.

A análise das soluções óptimas será feita para cada cidade com a apresentação dos resultados de redução das necessidades energéticas, em percentagem, para cada modelo.

##### 4.4.1. FARO

Na cidade de Faro a situação inicial de cada modelo apresenta valores baixos de necessidades de aquecimento e valores altos de necessidades de arrefecimento, devido ao clima típico da cidade, pautado por uma estação de arrefecimento rigorosa. Os valores das necessidades energéticas para os quatro modelos da fracção autónoma sem solário podem ser observados no quadro 4.5

Quadro 4.5 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial no Porto

| Modelo | Necessidades Energéticas [kWh/m <sup>2</sup> .ano] |               |       |
|--------|--|---------------|-------|
|        | Aquecimento  | Arrefecimento | Total |
| 1      | 1,51   | 17,47         | 18,98 |
| 2      | 1,32   | 19,37         | 20,69 |
| 3      | 1,70   | 18,19         | 19,89 |
| 4      | 2,06   | 18,50         | 20,56 |

Como nesta cidade a fracção autónoma tem poucas necessidades de aquecimento, a aplicação do sistema em toda a fachada sul e com solário integrado de 4m anulou-as. Com os outros modelos as necessidades de aquecimento não foram anuladas, ainda que tenham sido significativas. Estas diferenças devem-se ao facto do modelo com o solário em toda a fachada Sul ter uma maior área de envidraçado e consequentemente mais ganhos solares. O solário integrado, apesar de ter uma área de envidraçado idêntica à dos outros modelos em que o solário tem 4m de largura, contando portanto com ganhos da mesma ordem de grandeza, é mais eficaz na redução das necessidades de aquecimento pois as perdas de calor são menores, dado que tem uma menor exposição ao ambiente

exterior. As soluções com melhor comportamento térmico em termos de necessidades de aquecimento são, em todas as configurações de solário, as de vidro duplo sem muro, o que seria de prever dado que têm maior área de envidraçado e, simultaneamente, um tipo de vidro cuja condutibilidade térmica é inferior à do vidro simples, o que se traduz em menores perdas de calor.

Em termos de necessidades de arrefecimento o modelo da fracção autónoma com solário de 4m adjacente é o que apresenta maiores reduções. Os outros dois modelos correspondentes ao solário de 4m de largura apresentaram reduções das necessidades de arrefecimento idênticas, que variam entre os 10% e 14 %. Com o modelo de solário em toda a fachada Sul obteve-se menores reduções, uma vez que este modelo conta com uma área de envidraçado maior, pelo que tem maiores ganhos solares. A melhor solução para a redução das necessidades de arrefecimento é a de vidro simples com muro. Nesta solução tem-se, por um lado, um tipo de vidro com uma condutibilidade elevada, o que origina maiores perdas de calor, e por outro, menor área de envidraçado, que faz com que os ganhos solares sejam inferiores.

Ao nível das necessidades energéticas totais houve reduções em todos os modelos comparativamente com as soluções iniciais, como se pode observar pela figura 4.19, sendo que a redução das necessidades energéticas no primeiro caso foi cerca de 16,4%, no segundo caso 18,5%, no terceiro caso 14,8% e no quarto caso 23,1%. As melhores configurações para estes modelos de solários foram as de envidraçado simples e duplo com muro, pois foram as que apresentaram melhores resultados ao nível das necessidades de arrefecimento. Estas soluções têm melhor desempenho térmico em climas mais quentes, como é o caso de Faro, pois são as que apresentam menores ganhos solares e conseqüentemente melhor desempenho térmico nos períodos de arrefecimento.

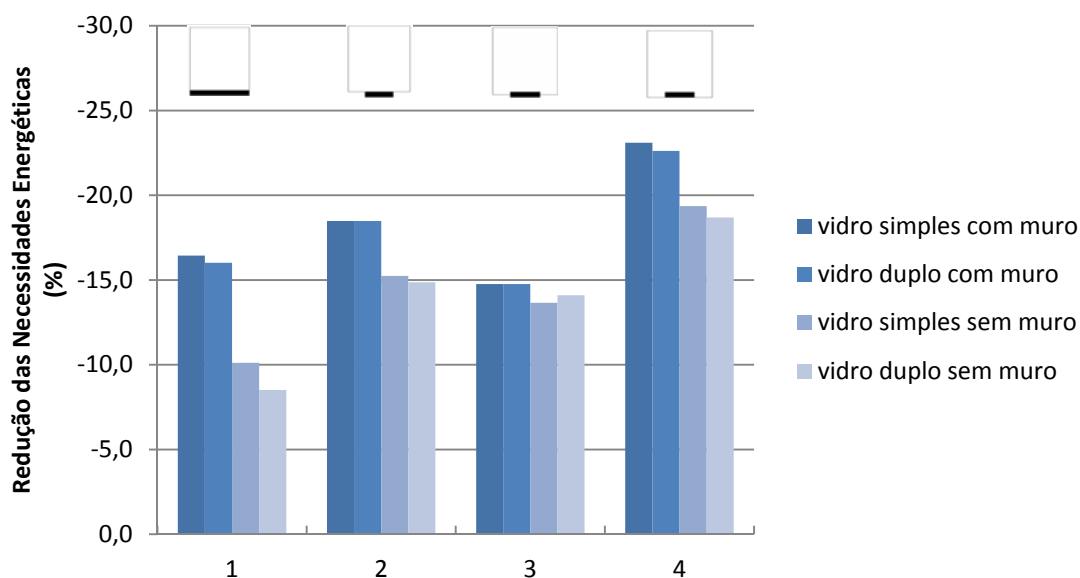


Figura 4.19 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções óptimas em Faro



Apesar da aplicação do sistema ter como objectivo o aproveitamento dos ganhos solares de modo a reduzir as necessidades de aquecimento, e destas serem muito reduzidas na cidade de Faro, onde a estação de arrefecimento é mais gravosa que a de aquecimento, a utilização deste sistema teve um impacto positivo, já que conseguiu reduzir também as necessidades energéticas do período de arrefecimento.

#### 4.4.2. LISBOA

Nesta cidade as necessidades de arrefecimento dos modelos da fracção autónoma são mais gravosas que as de aquecimento, que são cerca de metade, como se pode observar no quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Energéticas de climatização para a situação inicial em Lisboa

| Modelo | Necessidades Energéticas [kWh/m <sup>2</sup> .ano] |               |       |
|--------|--|---------------|-------|
|        | Aquecimento  | Arrefecimento | Total |
| 1      | 5,70   | 12,44         | 18,14 |
| 2      | 5,11   | 14,12         | 19,23 |
| 3      | 6,20   | 12,99         | 19,20 |
| 4      | 6,86   | 13,18         | 20,04 |

Em relação aos períodos de aquecimento, os modelos e as soluções construtivas com melhor desempenho foram as mesmas que em Faro. Porém, na cidade de Lisboa as necessidades de aquecimento não foram anuladas, tendo sido, no entanto, obtido um resultado bastante benéfico, já que nas melhores soluções as reduções são na ordem dos 90%.

Relativamente às necessidades de arrefecimento, o desempenho térmico do sistema também foi idêntico ao de Faro. Os modelos e as soluções construtivas com melhor comportamento térmico foram os mesmos, como já tinha ocorrido para as necessidades de aquecimento.

Em termos de necessidades energéticas totais a aplicação do sistema foi positiva como se pode observar pela figura 4.20. As reduções das necessidades energéticas foram significativas, uma vez que se obteve, com os melhores modelos, uma redução de 29,3% para o primeiro caso, 24,4% para o segundo, 21,2% e 37,5% para o terceiro e quarto caso, respectivamente. Estes resultados podem ser verificados na figura 4.20.

Para os modelos da fracção autónoma com o solário de 4m de largura, as melhores soluções correspondem às de maior área de envidraçado com vidro duplo, para o segundo e terceiro casos, e de vidro simples, para o quarto caso. Em Lisboa as soluções com maior área de envidraçado obtiveram melhores resultados do que em Faro, por haver maiores necessidades de aquecimento e menores necessidades de arrefecimento.

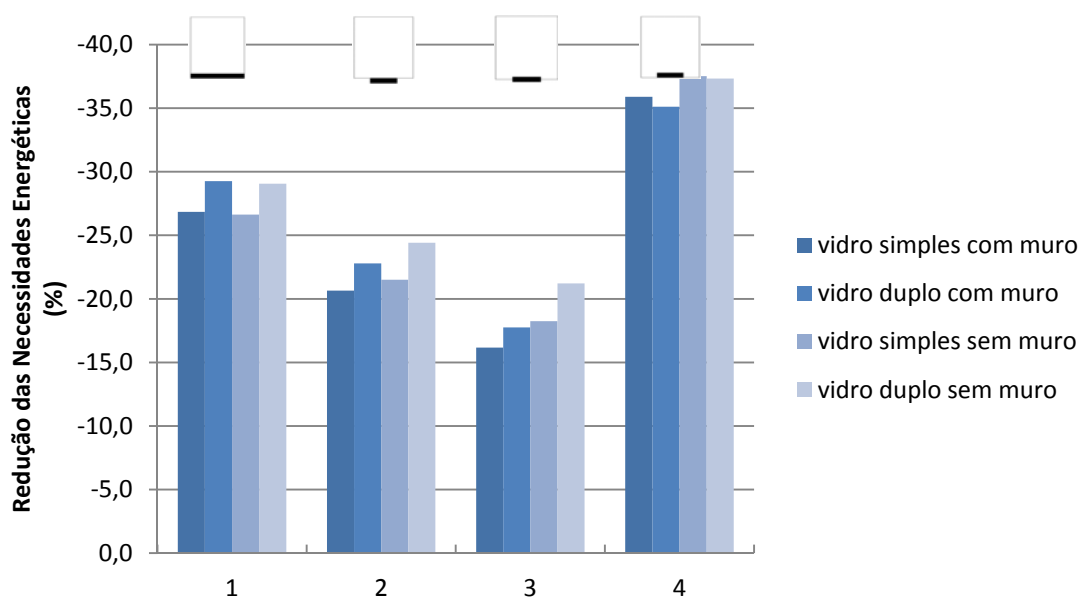


Figura 4.20 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções óptimas em Lisboa

No modelo da fracção autónoma com solário em toda a fachada Sul as soluções com maior área de envidraçado não reduzem as necessidades de arrefecimento iniciais, reduzindo apenas as necessidades de aquecimento, pelo que a melhor solução foi a de vidro duplo com muro que, por ter menor área de envidraçado, reduz também as necessidades de arrefecimento.

Apesar de, ao nível das necessidades de aquecimento e arrefecimento, as soluções com melhor desempenho terem sido as mesmas que as obtidas para Faro, em termos de necessidades energéticas totais essa igualdade não foi registada. Isto deve-se ao facto das necessidades de aquecimento iniciais serem superiores para Lisboa e a redução destas necessidades ter mais impacto a nível das necessidades totais do que em Faro.

#### 4.4.3. ÉVORA

Na cidade de Évora as necessidades de aquecimento e arrefecimento apresentam valores idênticos para os modelos sem solário, sendo no entanto as necessidades de arrefecimento mais gravosas. Os valores das necessidades energéticas para estes modelos podem ser observados no quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções óptimas em Évora

| Modelo | Necessidades Energéticas |               |       |
|--------|--------------------------|---------------|-------|
|        | Aquecimento              | Arrefecimento | Total |
| 1      | 10,41                    | 13,62         | 24,04 |
| 2      | 9,75                     | 15,20         | 24,95 |
| 3      | 10,91                    | 14,29         | 25,20 |
| 4      | 11,57                    | 14,59         | 26,16 |

Nos períodos de aquecimento as soluções construtivas com melhor desempenho são aquelas que têm maior área de envidraçado, registando-se reduções destas necessidades entre os 60% e 70%, nos modelos com o solário em toda a largura da fachada Sul e com o solário integrado, que são os que apresentam melhor comportamento térmico neste período. Nos restantes modelos foram obtidas reduções entre os 20% e 40%, também para as soluções com maior área de envidraçado.

Em termos de necessidades de arrefecimento, os modelos com o solário de 4m adjacente e integrado foram os que demonstraram melhor comportamento térmico, sendo que se obteve reduções entre os 10% e 15% nos casos das soluções construtivas com menor área de envidraçado. No modelo semi-integrado registaram-se melhorias entre os 7% e 11%. Relativamente ao modelo com o solário em toda a fachada Sul para as soluções com maior área de envidraçado, registou-se um agravamento pouco significativo das necessidades de arrefecimento, na ordem de 1%, obtendo-se, no entanto, melhorias de 7% para as soluções com menor área de envidraçado.

Ao nível das necessidades energéticas totais de climatização registaram-se as maiores reduções, em todos os modelos, para a solução construtiva com envidraçado duplo sem muro, como é possível observar na figura 4.21. Esta solução destacou-se das restantes pois no período de aquecimento foi a mais eficiente, dado que com maior área de envidraçado conseguiu ganhos solares superiores e com o vidro duplo as perdas de calor foram minimizadas. As reduções das necessidades energéticas para esta solução foram de 29% no primeiro caso, 20% no segundo caso, 16% no terceiro caso e 34% no quarto caso.

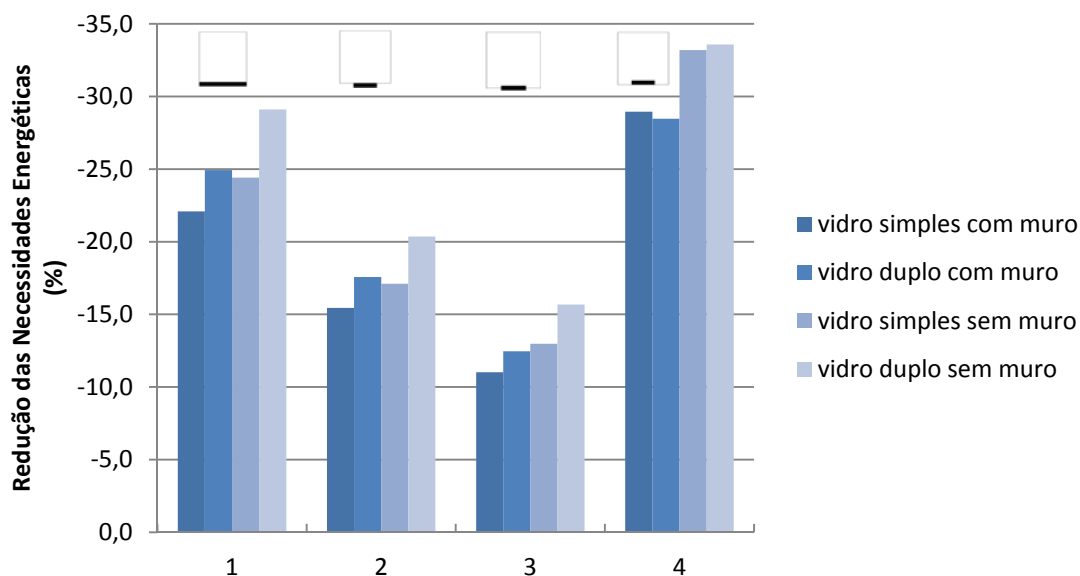


Figura 4.21 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções ótimas em Évora

Nos três primeiros casos verificou-se a mesma tendência em termos de necessidades totais para as soluções de vidro duplo com muro e vidro simples sem muro, como é possível observar na figura 4.21.

Os modelos mais viáveis para a cidade de Évora são os solários que cobrem toda a fachada sul e os integrados, tendo-se registado reduções das necessidades energéticas de climatização, para as soluções ótimas, entre os 22% e 29% e entre os 29% e 34%, respectivamente.

Os restantes modelos apresentam reduções inferiores, sendo que o modelo com o solário semi-integrado é o menos viável com reduções entre os 11% e os 16%.

#### 4.4.4. COIMBRA

Na situação inicial os resultados das necessidades de arrefecimento e aquecimento são semelhantes. As necessidades de aquecimento iniciais são superiores às de arrefecimento, embora as diferenças sejam pouco significativas. O modelo com a varanda de 4m adjacente é a exceção, dado que as necessidades de arrefecimento são superiores às de aquecimento. É possível observar-se os resultados das necessidades energéticas para cada modelo no quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial em Coimbra

| Modelo | Necessidades Energéticas [kWh/m <sup>2</sup> .ano] |               |       |
|--------|--|---------------|-------|
|        | Aquecimento  | Arrefecimento | Total |
| 1      | 9,55   | 8,69          | 18,25 |
| 2      | 8,81   | 10,33         | 19,14 |
| 3      | 10,26  | 9,42          | 19,68 |
| 4      | 10,90  | 9,67          | 20,58 |

Relativamente à redução das necessidades de aquecimento, os modelos mais eficazes são o primeiro e o quarto, apresentando reduções entre 60% e 70% para as soluções com maior área de envidraçado. Em relação aos outros modelos com o mesmo tipo de solução, as reduções obtidas foram entre 25% e 43%.

Relativamente às necessidades de arrefecimento, as maiores reduções foram registadas com os modelos de solário de 4m de largura adjacente e integrado. Nestes casos as reduções foram de 19% e 15%, respectivamente. As soluções construtivas com um comportamento térmico mais eficiente foram as que contam com menor área de envidraçado, como seria de prever, uma vez que os ganhos solares através dos envidraçados são menores. Para as soluções com maior área de envidraçado também se registaram reduções das necessidades de arrefecimento, entre 7% e 11%, com a exceção do modelo de o solário em toda a fachada Sul que, na pior situação (solução com vidro duplo sem muro), levou a um agravamento das necessidades de arrefecimento em 5%.

Em termos de necessidades energéticas anuais, o comportamento térmico das soluções foi idêntico ao obtido para a cidade de Évora, apesar das reduções das necessidades energéticas terem sido superiores. A solução mais eficaz do ponto de vista energético corresponde à solução com vidro duplo sem muro, para todos os casos. Contudo, a solução com vidro simples sem muro obteve um

resultado semelhante para o modelo com solário integrado. Estes resultados podem ser observados na figura 4.22.

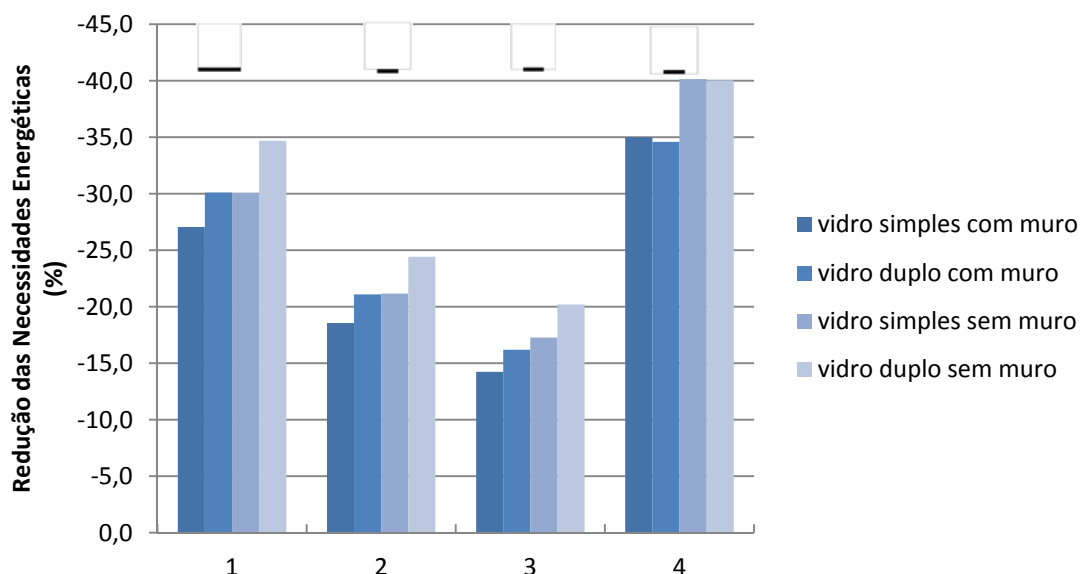


Figura 4.22 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções óptimas em Coimbra

É de notar que os modelos com o solário em toda a fachada Sul e com o solário integrado foram os que obtiveram maiores reduções, entre os 27% e 35%, e entre os 35% e 40%, respectivamente. Estes resultados demonstram o grande potencial de aplicação deste sistema para a cidade de Coimbra.

#### 4.4.5. PORTO

O clima da cidade do Porto origina maiores necessidades de aquecimento do que arrefecimento, sendo o período de aquecimento o condicionante para a fracção autónoma nesta cidade. É possível observar os resultados iniciais das necessidades energéticas no quadro 4.9, onde se verifica que as necessidades de arrefecimento são pouco significativas.

Quadro 4.9 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial no Porto

| Modelo | Necessidades Energéticas [kWh/m <sup>2</sup> .ano] |               |       |
|--------|--|---------------|-------|
|        | Aquecimento  | Arrefecimento | Total |
| 1      | 13,48  | 2,65          | 16,14 |
| 2      | 12,63  | 3,68          | 16,31 |
| 3      | 13,97  | 3,08          | 17,04 |
| 4      | 14,65  | 3,24          | 17,89 |

Com a aplicação do sistema as necessidades de aquecimento têm reduções superiores a 60% para as soluções de vidro duplo sem muro nos modelos com o solário em toda a fachada Sul e com o solário integrado. As soluções com menor eficiência energética para estes modelos têm reduções das necessidades de aquecimento na ordem dos 50%. Relativamente aos outros dois modelos, as maiores reduções registadas foram de 45% para o modelo com o solário de 4m adjacente, e de 32% para o modelo com o solário de 4m semi-integrado, ambas com a solução construtivas de vidro duplo sem muro.

A aplicação do sistema também teve um impacto benéfico na redução das necessidades de arrefecimento, especialmente com os modelos de solários de 4m, em que se obteve, para as soluções construtivas com vidro simples com muro, reduções de 20% no caso do solário adjacente, 13% no solário semi-integrado e 16% no solário integrado. No modelo da fracção autónoma com solário em toda a fachada Sul registaram-se agravamentos de cerca 28% das necessidades de arrefecimento. Todavia, estes agravamentos tiveram pouco impacto nas necessidades energéticas totais, como é possível observar na figura 4.23, sendo que os resultados de reduções energéticas obtidos para este modelo foram superiores aos resultados de outros em que não se registou o agravamento das necessidades de arrefecimento.

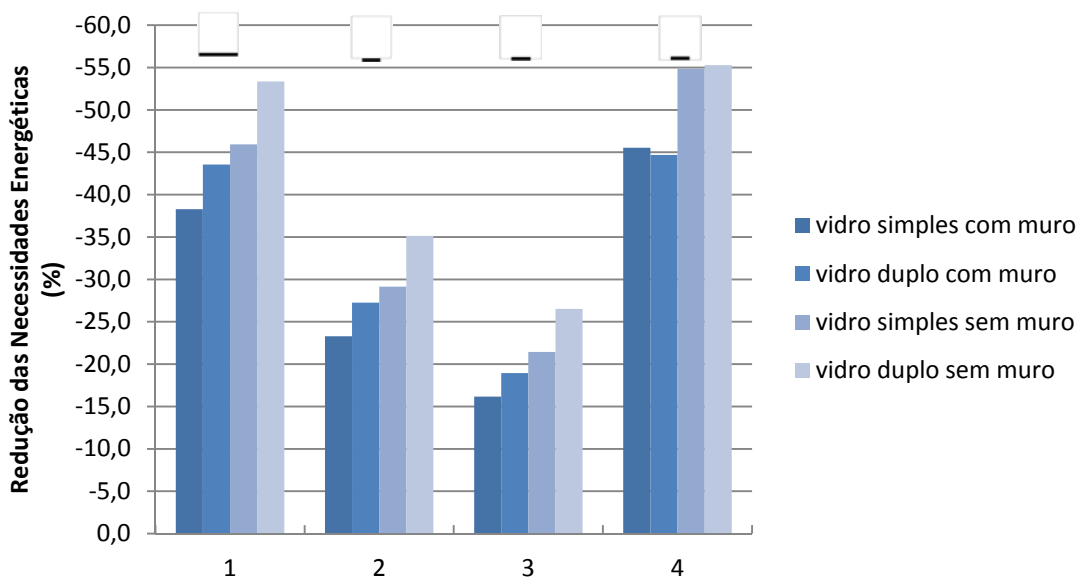


Figura 4.23 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções óptimas no Porto

Ao nível das necessidades energéticas totais alcançaram-se resultados muito positivos, sendo que para os modelos com o solário em toda a fachada Sul e com o solário integrado as reduções foram superiores a 50%, como é possível verificar na figura 4.23. Relativamente ao modelo com o solário integrado os resultados de redução das necessidades energéticas totais com vidro simples e vidro duplo são idênticos. O modelo com o solário semi-integrado foi o que apresentou uma menor

eficiência energética, registando-se no entanto reduções das necessidades energéticas entre 16% e 26%.

Estes resultados demonstram que a redução das necessidades de aquecimento é o condicionante para a viabilidade do sistema, assim como a potencialidade da aplicação nesta cidade.

#### 4.4.6. BRAGANÇA

O clima de Bragança destaca-se pela sua estação de aquecimento ser bastante rigorosa, o que é possível verificar pelos resultados obtidos para as necessidades de aquecimento iniciais no quadro 4.10. Deste modo, a aplicação do sistema vai estar condicionada pela eficiência energética nos períodos de aquecimento.

Quadro 4.10 - Necessidades Energéticas de climatização para a situação inicial em Bragança

| Modelo | Necessidades Energéticas [kWh/m <sup>2</sup> .ano] |               |       |
|--------|--|---------------|-------|
|        | Aquecimento  | Arrefecimento | Total |
| 1      | 31,28  | 6,91          | 38,19 |
| 2      | 30,14  | 8,13          | 38,27 |
| 3      | 32,19  | 7,45          | 39,64 |
| 4      | 33,24  | 7,68          | 40,93 |

Em termos de redução das necessidades de aquecimento, a aplicação do sistema em todos os modelos actua de forma benéfica. Os melhores resultados foram obtidos nos modelos com solário em toda a fachada Sul e com solário integrado para as soluções com maior área de envidraçado, sendo estas reduções de 40% a 48%. Nos restantes modelos, para as mesmas soluções, foram obtidas reduções das necessidades de aquecimento entre 19% a 32%. É de referir um comportamento idêntico das soluções construtivas com vidro duplo com muro e vidro simples sem muro para os três primeiros modelos. No modelo com o solário integrado as soluções construtivas com vidros duplos e simples com muro têm comportamentos idênticos, assim como as soluções sem muro.

Relativamente às necessidades de arrefecimento dos modelos da fracção autónoma com o solário, registaram-se reduções entre 3% a 15% em todos com as soluções construtivas óptimas, excepto no caso do primeiro modelo, com as soluções construtivas com maior área de envidraçado, para o qual se obteve um aumento das necessidades de arrefecimento de 7% a 10%.

Como já foi referido, as necessidades de aquecimento são as mais condicionantes do clima de Bragança, pelo que os modelos de solário mais eficazes nas diminuições destas necessidades são os que têm maiores reduções das necessidades energéticas totais, como se pode observar na figura 4.24. As maiores reduções das necessidades energéticas foram obtidas para os modelos com solário em toda a fachada Sul e com solário integrado, para as soluções com vidro duplo sem muro, tendo sido de 38% em ambos os casos.

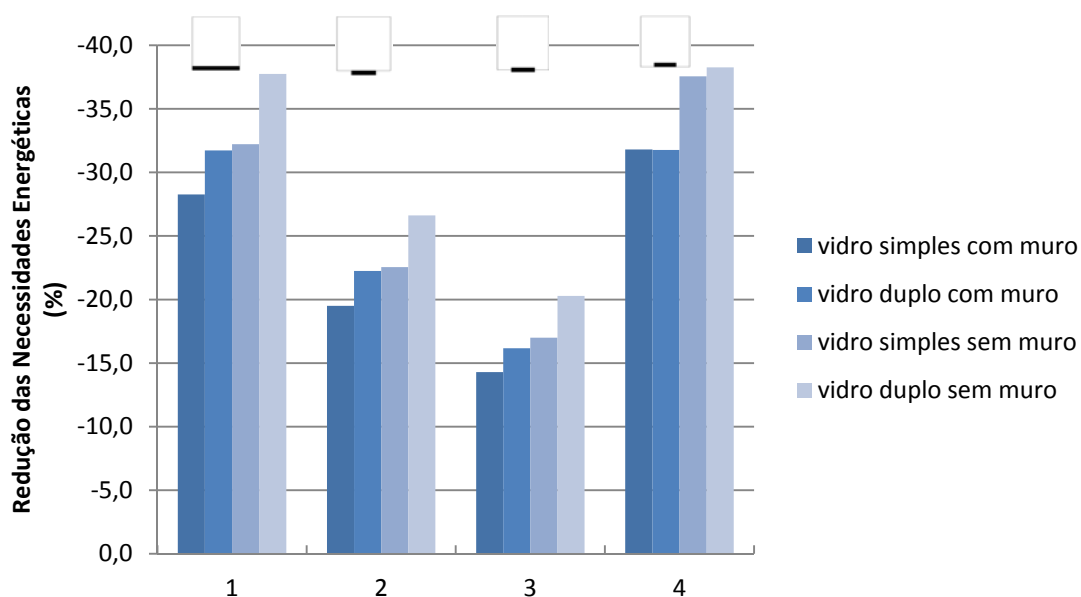


Figura 4.24 - Redução das Necessidades Energéticas para as soluções óptimas em Bragança

Para o modelo da fracção autónoma com solário integrado, as soluções com muro apresentam a mesma eficiência energética a nível global, independentemente do tipo de vidro, assim como as soluções sem muro. Nos restantes modelos são as soluções de vidro duplo com muro e de vidro simples sem muro que se comportam da mesma forma, como se pode observar na figura 4.24.

Como o clima de Bragança é mais rigoroso na estação de aquecimento a aplicação deste tipo de sistema solar passivo apresenta claras vantagens.

#### 4.5. COMPARAÇÃO COM SISTEMA ETICS

Tendo sido já demonstrada a viabilidade de aplicação do sistema solar passivo em estudo à fracção autónoma, torna-se necessário saber até que ponto será mais eficaz na redução das necessidades energéticas do que outro tipo de soluções utilizadas em obras de reabilitação, como o sistema ETICS.

Relativamente ao sistema ETICS, considerou-se a aplicação de uma camada de EPS com 3cm de espessura em toda a fachada. A espessura de acordo com o que é mais utilizado neste tipo de intervenção [8]. Para a comparação com o sistema ETICS foram escolhidos os modelos de solário que apresentaram, em cada zona térmica, o melhor e o pior comportamento térmico.

A eficácia das duas soluções foi também comparada considerando que a edifício apresenta inicialmente uma solução construtiva de parede dupla ao nível da envolvente exterior.



#### 4.5.1. MODELO #4

Para este modelo foram obtidas reduções das necessidades energéticas superiores às alcançadas com a aplicação de ETICS, tanto com as paredes simples como dupla, como se pode observar na figura 4.25. O comportamento térmico do modelo com o solário aplicado à fracção autónoma foi superior nos períodos de aquecimento e arrefecimento em relação ao modelo com sistema ETICS.

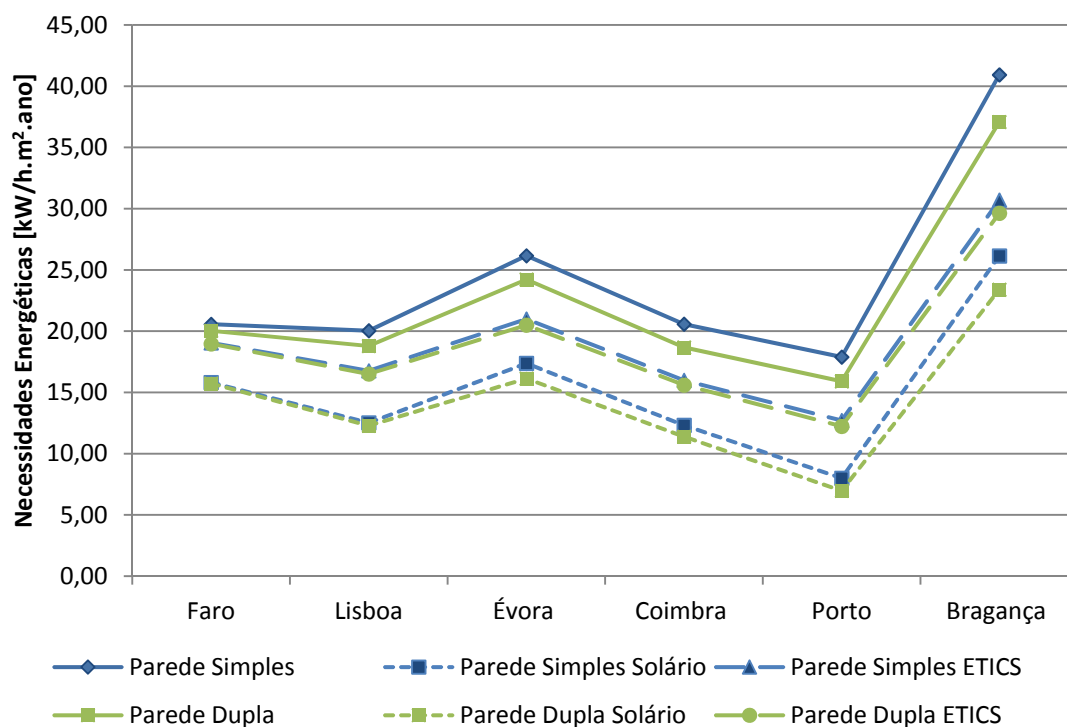


Figura 4.25 - Necessidades Energéticas de Climatização para o modelo #4 com várias soluções construtivas

Relativamente às soluções construtivas da envolvente, as reduções das necessidades energéticas foram ligeiramente superiores para o modelo com parede dupla e nas cidades em que o período de aquecimento é mais rigoroso, como é o caso de Bragança, o que se deve ao facto de o coeficiente de condutibilidade térmica das paredes duplas ser inferior ao das paredes simples, pelo que as perdas de calor pela envolvente são inferiores.

Para este modelo, a implementação de um solário apresenta maior potencial do ponto de vista energético que a aplicação de ETICS em toda a envolvente exterior. É de referir que, para o modelo da fracção autónoma com o solário integrado, foram registados reduções das necessidades energéticas significativas tanto para climas em que o período de arrefecimento é mais rigoroso, caso de Faro, como para climas em que o período de aquecimento é mais rigoroso, caso de Bragança, como se pode verificar na figura 4.25. No modelo da fracção autónoma com ETICS o melhor desempenho foi registado para a cidade do Porto e Bragança, onde o período de aquecimento é mais rigoroso e as soluções com ETICS apenas apresentam reduções das necessidades de aquecimento, agravando as necessidades de arrefecimento.

### 4.5.2. MODELO #3

Neste caso as reduções mais elevadas das necessidades energéticas variaram consoante a cidade e a solução construtiva da envolvente, como se pode observar na figura 4.26, sendo que as soluções com solário obtiveram o melhor desempenho para cidades em que o período de arrefecimento era mais gravoso, caso de Faro e Lisboa, independentemente da solução construtiva em questão. Para as restantes cidades os modelos com as soluções de solário obtiveram resultados muito idênticos aos das soluções do sistema ETICS tendo por base a parede dupla. Para as cidades de Évora e Porto, com a solução construtiva de parede dupla, a implementação do solário foi a que obteve os melhores resultados. Em Coimbra e Bragança registaram-se os melhores resultados com sistema ETICS.

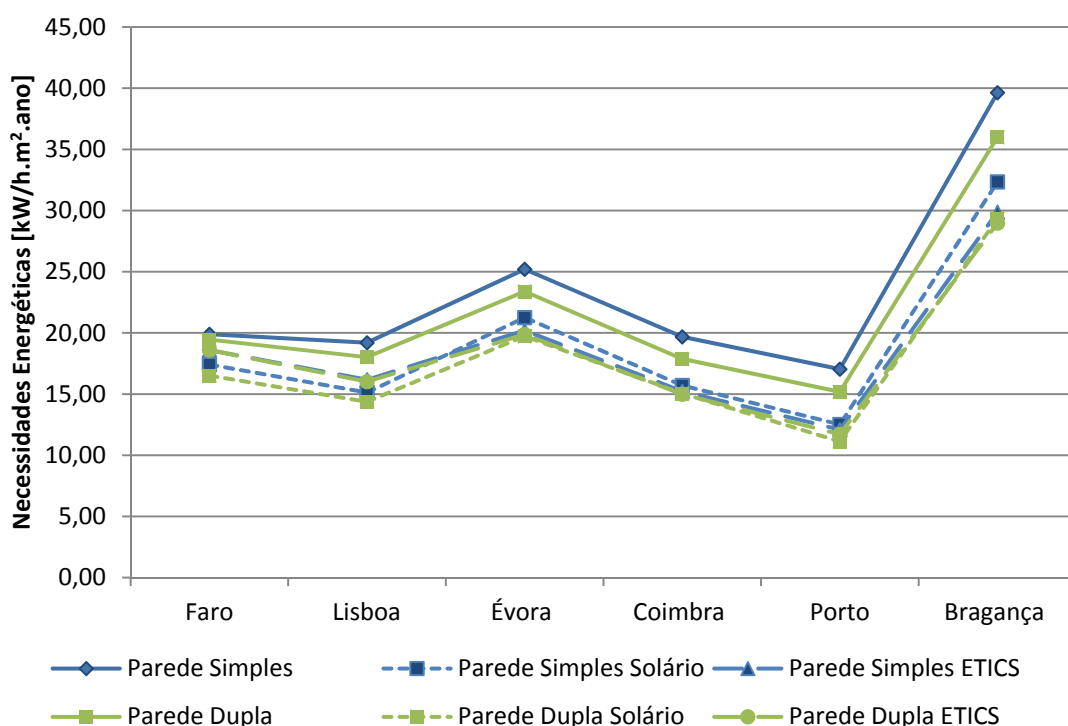


Figura 4.26 - Necessidades Energéticas de Climatização para o modelo #3 com várias soluções construtivas

Mais uma vez observou-se que o sistema ETICS teve um impacto positivo nas necessidades de aquecimento e o sistema solar passivo tanto reduziu as necessidades de aquecimento como as de arrefecimento em todas as cidades. Porém registaram-se maiores reduções das necessidades de aquecimento com o sistema ETICS, demonstrando que esta solução é a mais eficiente em termos de redução das necessidades energéticas totais nas cidades em que as necessidades de aquecimento são as mais gravosas.

A viabilidade de aplicação do sistema solar passivo é superior à do sistema ETICS nas cidades de Faro e Lisboa, independentemente da solução base. Para as outras cidades, que contam com a parede simples como solução construtiva da envolvente exterior, a aplicação de ETICS tem maior

potencial de aplicação. Nos modelos com parede dupla, sendo as diferenças pouco significativas, pode-se considerar que o sistema ETICS e o sistema solar passivo têm um potencial de aplicação idêntico.



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nos países membros da União Europeia têm vindo a ser implementadas políticas de redução do consumo energético com o objectivo de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, assim como proteger as economias de choques energéticos externos. Estas políticas têm visado vários sectores, nomeadamente o sector doméstico, em que se prevê uma redução do consumo energético em 20% até 2020.

Relativamente ao território nacional, parte do edificado existente apresenta um baixo nível de conforto térmico e elevados consumos energéticos provenientes da climatização do ambiente interior. Tendo em vista a redução do consumo energético de climatização destes edifícios surge a oportunidade da aplicação de técnicas solares passivas.

Dos vários tipos de sistemas solares passivos existentes, o alvo de estudo foi um sistema de ganho isolado denominado solário, aplicado a uma fracção autónoma de um edifício multifamiliar. A aplicação deste sistema teve em vista a redução das necessidades energéticas de climatização da fracção autónoma.

Com o intuito de analisar a aplicação deste sistema foram utilizados dois programas de análise dinâmica do comportamento térmico dos edifícios, o TRNSYS e o EnergyPlus, pois só através de uma análise dinâmica é que é possível o cálculo mais aproximado do real das necessidades energéticas de climatização de um edifício, dada a natureza altamente dinâmica dos fenómenos físicos inerentes ao seu comportamento térmico.

Para a análise mais detalhada deste tipo de sistema concluiu-se que o EnergyPlus seria a ferramenta mais indicada, especialmente pela forma como calcula os ganhos solares. Para além disso, esta ferramenta dispõe de vários parâmetros para análise do comportamento térmico dos edifícios, entre elas ventilação natural, vários tipos de sombreamento e a possibilidade definir períodos de funcionamento para os parâmetros, o que permite a utilização destas estratégias na simulação da fracção autónoma com o solário. Apesar de o TRNSYS também ser uma ferramenta de análise dinâmica está mais limitada nestes aspectos.

Numa primeira análise em regime dinâmico dos modelos da fracção autónoma com solário registaram-se reduções significativas das necessidades energéticas de aquecimento e o agravamento das necessidades energéticas de arrefecimento. Assim sendo, notou-se a necessidade de implementação de estratégias de arrefecimento mais eficazes de modo a evitar o sobreaquecimento no período de Verão. Porém, em termos de necessidades energéticas totais de climatização, obtiveram-se melhorias em algumas cidades, o que demonstrou o potencial de aplicação do sistema.

Com o intuito de otimizar o solário foi realizada uma análise de sensibilidade de vários parâmetros do sistema através da ferramenta de análise dinâmica EnergyPlus. Os parâmetros analisados foram a área e tipo de envidraçado, dispositivos de sombreamento, ventilação natural e o período de utilização destes dois últimos parâmetros.

O grupo de soluções construtivas com ventilação natural e estores internos com elevado coeficiente de reflexão, juntamente com um planeamento de funcionamento adaptado a cada cidade, foram os que obtiveram maiores reduções das necessidades energéticas de climatização. Deste modo a melhor solução construtiva para cada cidade distinguiu-se apenas no tipo e na área do envidraçado.

O modelo da fracção autónoma com solário registou as menores reduções das necessidades energéticas de climatização na cidade de Faro, o que se deveu ao facto deste tipo de sistema solar passivo ter menor eficiência na redução das necessidades de arrefecimento e o clima desta cidade ser mais rigoroso no período de arrefecimento. Ainda assim, nesta cidade foram obtidas reduções das necessidades energéticas de climatização na ordem dos 23%. Nas cidades em que as necessidades de aquecimento são as mais gravosas obtiveram-se maiores reduções das necessidades energéticas anuais com a aplicação do sistema. Na cidade do Porto o modelo da fracção autónoma com solário registou reduções das necessidades energéticas totais até 55%. Dos resultados obtidos observou-se uma maior eficiência do sistema quando aplicado em climas com o período de aquecimento mais gravoso que o período de arrefecimento.

Relativamente à geometria do solário, os melhores resultados, em todas as cidades, foram obtidos para o modelo da fracção autónoma com o solário de 4m de largura, integrado, o que é justificado por este tipo de solário estar menos exposto ao ambiente exterior, o que resulta em menores trocas de calor entre o solário e o ambiente exterior.

De modo a analisar o potencial de aplicação do solário comparou-se com a solução habitualmente aplicada em obras de reabilitação térmica, o sistema ETICS, tendo aplicado 3cm de espessura de isolamento. Este estudo foi realizado para duas soluções construtivas de envolvente exterior da fracção autónoma - parede simples e parede dupla. A comparação dos dois sistemas foi feita para os modelos de solário de 4m de largura, integrado e adjacente, que foram os que obtiveram as maiores e menores reduções das necessidades energéticas. Dos resultados obtidos concluiu-se que o solário tem maior potencial de aplicação que o sistema ETICS, no caso do modelo da fracção autónoma com varanda integrada, o que se justifica com o facto de o solário conseguir reduções, tanto das necessidades de aquecimento, como também das necessidades de arrefecimento, enquanto o sistema ETICS apenas tem um impacto positivo nas necessidades de aquecimento. Na comparação

do sistema ETICS com o solário com pior desempenho observou-se que, para as cidades em que o período de arrefecimento é mais gravoso, o solário é a solução com maiores reduções. Para as restantes cidades os valores de reduções com solário ou com o sistema ETICS são idênticos.

Com as análises efectuadas ficou demonstrado o potencial do sistema solar passivo de ganho isolado denominado por solário, em várias cidades de Portugal continental.

Para futuros desenvolvidos sugere-se uma análise técnico-económica de modo a calcular-se o período de retorno da aplicação deste sistema solar passivo. Com uma análise económica também será possível obter-se uma comparação do ponto de vista financeiro entre a aplicação do solário e do sistema ETICS, sendo possível averiguar as soluções mais viáveis para cada caso.





## BIBLIOGRAFIA

- [1] MINISTÉRIO DA ECONOMIA, DA INOVAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO – *Plano Novas Energias.ENE2020*. s/d. <http://www.portugal.gov.pt/pt/GC18/Documentos/> (09/05/2011)
- [2] PIERALDO, Isolani – *Eficiência Energética em Edifícios Residenciais*. Intelligent Energy Europe, Maio 2008, <http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/454D170F-48C9-484A-9868-DEC14FBF46BA/803/> (15/05/2011)
- [3] MALDONADO, Eduardo – *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive*, Brussels, Intelligent Energy Europe, 2011
- [4] DECRETO-LEI nº 80/2006 pags. 2468-2513
- [5] SILVA, P.; ALMEIDA, M.; BRAGANÇA, L.; MESQUITA, VASCO. – *Metodologia de Simulação com Vista à Reabilitação Energeticamente Eficiente*, pp.932-936. Porto PATORREB 2009, 2009
- [6] INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA – *Estatísticas da Construção e Habitação 2009*, Junho 2010. [http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes\\_\(09/05/2011\)](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes_(09/05/2011))
- [7] KLEIN, S.A., et al. - TRNSYS, A Transient Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin – Madison, USA, 2007.
- [8] ENERGYPLUS, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY – Energy Efficiency & Renewable Energy, Energy Plus Energy Simulation Software. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> (10/2010)
- [9] INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA – *CENSOS 2001*, Lisboa 2002
- [10] SOUSA, Hipólito – *Melhoria do Comportamento Térmico e Mecânico das Alvenarias por Actuação na Geometria dos Elementos*, 1996, FEUP
- [11] SANTOS, C.; RODRIGUES, R.; VILHENA, A. – *Reabilitação Térmica no Sector Residencial*, pp.993-998, Porto PATORREB 2009, 2009
- [12] PINA SANTOS, Carlos – *Evolução das Soluções de Paredes Face a Novas Exigências Regulamentares*, em Seminário sobre Paredes de Alvenaria. Lisboa, LNEC, 2007.
- [13] GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. – *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*, INETI. Lisboa, Novembro 2004.
- [14] HOLTZ, M. – *Design Information Booklet No.3 – Design Guidelines: An International Summary*, International Energy Agency: Solar Heating And Cooling Program, Julho 1990, <http://www.iea-shc.org/publications/task.aspx?Task=8> (14/04/2011)
- [15] <http://www.greenspec.co.uk/passive-solar-sunspaces.php> (16/06/2011)
- [16] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) – *Passive Solar Design for the Home*, Fevereiro 2001
- [17] GRUNEWALD, S.; ROTTENSTEINER, S. – *Task 37 Advanced Housing Renovation with Solar & Conservation – Apartment Buildings in Dornbirn*, International Energy Agency, Novembro 2004.

- [18] GONÇALVES, H.; OLIVEIRA PANÃO, M. – *Eficiência Energética na Cidade: Estratégias para a Promoção da Capacidade Natural de Aquecimento e Arrefecimento dos Edifícios*, XII Congresso Ibérico e VII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, Lisboa, Novembro 2006.
- [19] EICKER, Ursula – *Solar Technologies for Building*. Estugarda, Wiley, 2001
- [20] MENDONÇA, Paulo, *Dissertação de Doutoramento - Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*, Universidade do Minho, 2005.
- [21] HENRIQUES, Fernando - *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Lisboa, UNL-FCT, 2007.
- [22] PINA DOS SANTOS, C., MATIAS, L. – *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios – ITE 50*, Lisboa, LNEC, 2006
- [23] ATHIENITIS, A. K., SANTAMOURIS, M. – *Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings*, Londres, James and James, 2002
- [24] – RASMUSSEN, Elise – *Task 37 Advanced Housing Renovation with Solar & Conservation – APT Building in Engelsby, DK*, International Energy Agency, Novembro 2004.
- [25] GONÇALVES, Helder, et al – *Passive Solar Buildings in Portugal*. Lisboa, INETI, Março 2009
- [26] AELENEI, Daniel – *RCCTE “Light”*. Monte de Caparica, UNL-FCT, Setembro 2008.
- [27] THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF THE ILLINOIS AND THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA THROUGH THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, *Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running EnergyPlus*, USA, October 2010.
- [28] GWILLIAM, J.; JONES, P.; WANG, L. – *Case Study of Zero Energy House Design in UK*, Cardiff University, United Kingdom 2009.
- [29] ARCURI, N.; OLIVETI, G.; SIMONE, M. - *Solar heat gains and operative temperature in attached sunspaces*, University of Calabria, Italia, 2010.
- [30] THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF THE ILLINOIS AND THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA THROUGH THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, *EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations*, USA, October 2010.
- [31] THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF THE ILLINOIS AND THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA THROUGH THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, *Input Output Reference – The Encyclopedia Reference to EnergyPlus Input and Output*, USA, October 2010.
- [32] SOLAR ENERGY LABORATORY, *TRNSYS 16 Volume 1 – Getting Started*, University of Wisconsin, Madison, USA, March 2007.
- [33] FISSORE, A.; MOTTARD J. – *Thermal Simulation of an Attached Sunspace and its Experimental Validation*, University of Concepción, Chile, 2006.
- [34] CRAWLEY, Drury, et al - *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*, U.S. Department of Energy, USA, 2006
- [35] SOLAR ENERGY LABORATORY, *TRNSYS 16 Volume 6 – Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild*, University of Wisconsin, Madison, USA, March 2007.

[36] SOLAR ENERGY LABORATORY, *TRNSYS 16 Volume 5 – Mathematical Reference*, University of Wisconsin, Madison, USA, March 2007

[37] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) – *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007*, USA, 2010.

[38] INTERNACIONAL ENERGY AGENCY – *Energy Simulation Test and Diagnostic Method – Multi-Zone Non-Airflow In Depth Diagnostic Cases: MZ320-MZ360*.

[39] BRUN, Adrien, et al – *Behavioural Comparison of Some Predictive Tools Used in a Low-Energy Building*, IBPSA CONFERENCE, Glasgow, Julho 2009.



**ANEXO A - RESULTADOS DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS DOS MODELOS INICIAIS DA  
FRACÇÃO AUTÓNOMA**

Anexo A – Quadro 1 - Necessidades energéticas da fracção autónoma com varanda com largura de toda a fachada Sul

| Zona Climática | Necessidades Energéticas [kW/h.m <sup>2</sup> .ano] |       |       |            |       |       |       |       |       |
|----------------|---|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | RCCTE   |       |       | EnergyPlus |       |       | RCCTE |       |       |
|                | Nic   | Nvc   | Total | Nic        | Nvc   | Total | Nic   | Nvc   | Total |
| Faro           | 15,14   | 11,52 | 26,66 | 1,51       | 17,47 | 18,98 | 6,42  | 10,91 | 17,33 |
| Lisboa         | 15,16   | 11,52 | 26,68 | 5,70       | 12,44 | 18,14 | 10,47 | 10,37 | 20,84 |
| Évora          | 19,61   | 11,78 | 31,39 | 10,41      | 13,62 | 24,04 | 20,72 | 10,58 | 31,30 |
| Coimbra        | 20,55   | 2,32  | 22,87 | 9,55       | 8,69  | 18,25 | 18,11 | 6,89  | 25,00 |
| Porto          | 23,47   | 2,17  | 25,64 | 13,48      | 2,65  | 16,14 | 23,17 | 1,65  | 24,82 |
| Bragança       | 58,55   | 2,32  | 60,87 | 31,28      | 6,91  | 38,19 | 52,65 | 4,13  | 56,78 |

Anexo A – Quadro 2 - Necessidades energéticas da fracção autónoma com varanda adjacente de 4m

| Zona Climática | Necessidades Energéticas [kW/h.m <sup>2</sup> .ano] |       |       |            |       |       |       |       |       |
|----------------|---|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | RCCTE   |       |       | EnergyPlus |       |       | RCCTE |       |       |
|                | Nic   | Nvc   | Total | Nic        | Nvc   | Total | Nic   | Nvc   | Total |
| Faro           | 15,14   | 11,52 | 26,66 | 1,32       | 19,37 | 20,69 | 5,69  | 12,77 | 18,46 |
| Lisboa         | 15,16   | 11,52 | 26,68 | 5,11       | 14,12 | 19,23 | 9,89  | 12,04 | 21,94 |
| Évora          | 19,61   | 11,78 | 31,39 | 9,75       | 15,20 | 24,95 | 19,57 | 12,23 | 31,80 |
| Coimbra        | 20,55   | 2,32  | 22,87 | 8,81       | 10,33 | 19,14 | 17,30 | 8,30  | 25,60 |
| Porto          | 23,47   | 2,17  | 25,64 | 12,63      | 3,68  | 16,31 | 22,16 | 2,42  | 24,58 |
| Bragança       | 58,55   | 2,32  | 60,87 | 30,14      | 8,13  | 38,27 | 51,31 | 5,31  | 56,62 |

Anexo A – Quadro 3 - Necessidades energéticas da fracção autónoma com varanda semi-integrada de 4m

| Zona Climática | Necessidades Energéticas [kW/h.m <sup>2</sup> .ano] |       |       |            |       |       |        |       |       |
|----------------|---|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
|                | RCCTE   |       |       | EnergyPlus |       |       | TRNSYS |       |       |
|                | Nic   | Nvc   | Total | Nic        | Nvc   | Total | Nic    | Nvc   | Total |
| Faro           | 16,76   | 10,88 | 27,64 | 1,70       | 18,19 | 19,89 | 5,85   | 12,36 | 18,21 |
| Lisboa         | 16,98   | 10,88 | 27,86 | 6,20       | 12,99 | 19,20 | 10,03  | 11,66 | 21,69 |
| Évora          | 21,74   | 11,11 | 32,85 | 10,91      | 14,29 | 25,20 | 19,86  | 11,86 | 31,73 |
| Coimbra        | 22,78   | 2,00  | 24,78 | 10,26      | 9,42  | 19,68 | 17,51  | 7,98  | 25,49 |
| Porto          | 25,74   | 1,89  | 27,63 | 13,97      | 3,08  | 17,04 | 22,45  | 2,25  | 24,69 |
| Bragança       | 61,98   | 2,00  | 63,98 | 32,19      | 7,45  | 39,64 | 51,67  | 5,07  | 56,74 |

Anexo A – Quadro 4 - Necessidades energéticas da fracção autónoma com varanda integrada de 4m

| Zona Climática | Necessidades Energéticas [kW/h.m <sup>2</sup> .ano] |       |       |            |       |       |        |       |       |
|----------------|---|-------|-------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
|                | RCCTE   |       |       | EnergyPlus |       |       | TRNSYS |       |       |
|                | Nic   | Nvc   | Total | Nic        | Nvc   | Total | Nic    | Nvc   | Total |
| Faro           | 18,06   | 10,60 | 28,66 | 2,06       | 18,50 | 20,56 | 6,49   | 11,47 | 17,96 |
| Lisboa         | 18,47   | 10,59 | 29,06 | 6,86       | 13,18 | 20,04 | 10,58  | 10,84 | 21,42 |
| Évora          | 23,44   | 10,80 | 34,24 | 11,57      | 14,59 | 26,16 | 20,81  | 11,12 | 31,93 |
| Coimbra        | 24,57   | 1,86  | 26,43 | 10,90      | 9,67  | 20,58 | 18,26  | 7,32  | 25,58 |
| Porto          | 27,54   | 1,76  | 29,30 | 14,65      | 3,24  | 17,89 | 23,33  | 1,95  | 25,27 |
| Bragança       | 64,67   | 1,86  | 66,53 | 33,24      | 7,68  | 40,93 | 52,79  | 4,67  | 57,46 |





**ANEXO B - RESULTADOS DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS DA COMPARAÇÃO DA  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA APLICAÇÃO DO SOLÁRIO COM AS FERRAMENTAS DE ANÁLISE  
DINÂMICA**

Anexo B – Quadro 1 - Resumo das simulações realizadas na comparação da eficiência energética da aplicação do solário com as ferramentas de análise dinâmica

| Simulação | Tipo de vidro | Área do envidraçado  | Sombreamento |
|-----------|---------------|----------------------|--------------|
| #1        | Vidro Simples | com muro opaco de 1m | sem estore   |
| #2        |               | sem muro opaco de 1m |              |
| #3        |               | com muro opaco de 1m | com estore   |
| #4        |               | sem muro opaco de 1m |              |

Anexo B – Quadro 2 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #1 em relação ao modelo inicial sem solário através do Eplus

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 0,10                             | -93,62           | 29,35                            | 67,99            | 29,45                               | 55,15            |
| Lisboa         | 1,88                             | -67,01           | 22,45                            | 80,50            | 24,33                               | 34,15            |
| Évora          | 5,04                             | -51,56           | 23,10                            | 69,54            | 28,14                               | 17,07            |
| Coimbra        | 4,71                             | -50,73           | 17,58                            | 102,18           | 22,28                               | 22,12            |
| Porto          | 7,01                             | -47,99           | 9,24                             | 247,92           | 16,25                               | 0,69             |
| Bragança       | 20,76                            | -33,62           | 14,15                            | 104,89           | 34,92                               | -8,56            |

Anexo B – Quadro 3 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #2 em relação ao modelo inicial sem solário através do EPlus

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 0,00                             | -100,00          | 34,43                            | 97,08            | 34,43                               | 81,42            |
| Lisboa         | 1,03                             | -81,87           | 26,38                            | 112,12           | 27,42                               | 51,17            |
| Évora          | 3,65                             | -64,98           | 26,97                            | 97,97            | 30,62                               | 27,38            |
| Coimbra        | 3,49                             | -63,49           | 21,05                            | 142,20           | 24,54                               | 34,51            |
| Porto          | 5,38                             | -60,08           | 12,05                            | 354,04           | 17,44                               | 8,04             |
| Bragança       | 18,47                            | -40,96           | 16,96                            | 145,56           | 35,43                               | -7,22            |

Anexo B – Quadro 4 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #3 em relação ao modelo inicial sem solário através do EPlus

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 0,10                             | -93,62           | 24,18                            | 38,40            | 24,28                               | 27,92            |
| Lisboa         | 1,88                             | -67,01           | 17,15                            | 37,87            | 19,03                               | 0,26             |
| Évora          | 5,04                             | -51,56           | 17,81                            | 30,72            | 22,85                               | -4,93            |
| Coimbra        | 4,71                             | -50,73           | 17,58                            | 102,18           | 22,28                               | 22,12            |
| Porto          | 7,01                             | -47,99           | 4,87                             | 83,33            | 11,88                               | -26,38           |
| Bragança       | 20,76                            | -33,62           | 9,10                             | 31,71            | 29,86                               | -21,80           |

Anexo B – Quadro 5 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #4 em relação ao modelo inicial sem solário através do EPlus

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 0,00                             | -100,00          | 27,98                            | 60,12            | 27,98                               | 47,40            |
| Lisboa         | 1,03                             | -81,87           | 19,76                            | 58,86            | 20,79                               | 9,99             |
| Évora          | 3,65                             | -64,98           | 20,33                            | 49,24            | 23,98                               | -0,24            |
| Coimbra        | 3,49                             | -63,49           | 14,40                            | 65,63            | 17,89                               | -1,97            |
| Porto          | 5,38                             | -60,07           | 6,19                             | 133,09           | 11,57                               | -28,30           |
| Bragança       | 18,47                            | -40,96           | 10,42                            | 50,77            | 28,88                               | -24,36           |

Anexo B – Quadro 6 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #1 em relação ao modelo inicial sem solário através do TRNSYS

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 3,20                             | -50,16           | 17,84                            | 63,43            | 21,04                               | 21,36            |
| Lisboa         | 6,86                             | -34,50           | 16,78                            | 61,85            | 23,64                               | 13,43            |
| Évora          | 13,73                            | -33,72           | 16,28                            | 53,81            | 30,01                               | -4,13            |
| Coimbra        | 12,43                            | -31,35           | 11,94                            | 73,26            | 24,37                               | -2,52            |
| Porto          | 16,22                            | -29,99           | 5,25                             | 218,11           | 21,47                               | -13,51           |
| Bragança       | 41,73                            | -20,75           | 8,35                             | 102,30           | 50,08                               | -11,80           |

Anexo B – Quadro 7 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #2 em relação ao modelo inicial sem solário através do TRNSYS

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 2,17                             | -66,14           | 19,42                            | 77,98            | 21,60                               | 24,60            |
| Lisboa         | 5,83                             | -44,38           | 17,75                            | 71,19            | 23,57                               | 13,11            |
| Évora          | 12,03                            | -41,90           | 17,67                            | 66,95            | 29,70                               | -5,10            |
| Coimbra        | 11,06                            | -38,93           | 13,14                            | 90,71            | 24,20                               | -3,20            |
| Porto          | 14,64                            | -36,84           | 6,08                             | 268,62           | 20,71                               | -16,55           |
| Bragança       | 40,19                            | -23,66           | 9,13                             | 121,16           | 49,32                               | -13,13           |

Anexo B – Quadro 8 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #3 em relação ao modelo inicial sem solário através do TRNSYS

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 3,20                             | -50,16           | 13,48                            | 23,50            | 16,68                               | -3,78            |
| Lisboa         | 6,86                             | -34,50           | 12,18                            | 17,47            | 19,04                               | -8,65            |
| Évora          | 13,73                            | -33,72           | 12,63                            | 19,32            | 26,36                               | -15,79           |
| Coimbra        | 12,43                            | -31,35           | 8,60                             | 24,81            | 21,03                               | -15,87           |
| Porto          | 16,22                            | -29,99           | 3,07                             | 85,97            | 19,29                               | -22,29           |
| Bragança       | 41,73                            | -20,75           | 6,07                             | 47,10            | 47,80                               | -15,81           |

Anexo B – Quadro 9 – Necessidades energéticas com percentagem de redução da simulação #4 em relação ao modelo inicial sem solário através do TRNSYS

| Zona climática | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro           | 2,17                             | -66,14           | 13,94                            | 27,69            | 16,11                               | -7,06            |
| Lisboa         | 5,83                             | -44,38           | 12,65                            | 22,06            | 18,48                               | -11,33           |
| Évora          | 12,03                            | -41,90           | 13,06                            | 23,39            | 25,09                               | -19,83           |
| Coimbra        | 11,06                            | -38,93           | 8,97                             | 30,16            | 20,02                               | -19,89           |
| Porto          | 14,64                            | -36,84           | 3,20                             | 93,91            | 17,83                               | -28,15           |
| Bragança       | 40,19                            | -23,66           | 6,30                             | 52,64            | 46,49                               | -18,11           |

**ANEXO C - RESULTADOS DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS DA ANÁLISE DE  
SENSIBILIDADE**

Anexo C – Quadro 1 – Lista de simulações do modelo #1

| Simulação | Tipo de Vidro do solário | Área de Envidraçado do solário | Sombreamento do solário                             | Ventilação Natural                      | Planeamento de funcionamento das estratégias de arrefecimento |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---|---|---|
| #1        | Simples                  | Com muro opaco                 | -   | -                                       | -   |
| #2        | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #3        | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #4        | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #5        | Simples                  | Com muro opaco                 | Persiana exterior                                   | -                                       | Período de arrefecimento definido no RCCTE                    |
| #6        | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #7        | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #8        | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #9        | Simples                  | Com muro opaco                 | Estore interior com baixo coeficiente de reflexão   | -                                       | Período de arrefecimento definido no RCCTE                    |
| #10       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #11       | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #12       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #13       | Simples                  | Com muro opaco                 | Estore interior com elevado coeficiente de reflexão | -                                       | Período de arrefecimento definido no RCCTE                    |
| #14       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #15       | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #16       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #17       | Simples                  | Com muro opaco                 | Persiana exterior                                   | Abertura com área de 2,4 m <sup>2</sup> | Período de arrefecimento definido no RCCTE                    |
| #18       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #19       | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #20       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #21       | Simples                  | Com muro opaco                 | Estore interior com baixo coeficiente de reflexão   | Abertura com área de 2,4 m <sup>2</sup> | Período de arrefecimento definido no RCCTE                    |
| #22       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #23       | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #24       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #25       | Simples                  | Com muro opaco                 | Estore interior com elevado coeficiente de reflexão | Abertura com área de 2,4 m <sup>2</sup> | Período de arrefecimento definido no RCCTE                    |
| #26       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #27       | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #28       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #29       | Simples                  | Com muro opaco                 | Estore interior com elevado coeficiente de reflexão | Abertura com área de 2,4 m <sup>2</sup> | Período de arrefecimento otimizado diferente para cada cidade |
| #30       | Duplo                    |                                |   |   |   |
| #31       | Simples                  | Sem muro opaco                 |   |   |   |
| #32       | Duplo                    |                                |   |   |   |

Anexo C – Quadro 2 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #1 em Faro

| Faro      |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 0,10                             | -93,6            | 29,35                            | 68,0             | 29,45                               | 55,2             |
| 2         | 0,01                             | -99,3            | 30,22                            | 73,0             | 30,23                               | 59,3             |
| 3         | 0,00                             | -100,0           | 34,43                            | 97,1             | 34,43                               | 81,4             |
| 4         | 0,00                             | -100,0           | 37,04                            | 112,0            | 37,04                               | 95,2             |
| 5         | 0,10                             | -93,6            | 24,68                            | 41,2             | 24,77                               | 30,5             |
| 6         | 0,01                             | -99,3            | 25,48                            | 45,9             | 25,49                               | 34,3             |
| 7         | 0,00                             | -100,0           | 28,50                            | 63,1             | 28,50                               | 50,2             |
| 8         | 0,00                             | -100,0           | 30,71                            | 75,8             | 30,71                               | 61,8             |
| 9         | 0,10                             | -93,6            | 27,13                            | 55,3             | 27,23                               | 43,4             |
| 10        | 0,01                             | -99,3            | 28,70                            | 64,3             | 28,71                               | 51,3             |
| 11        | 0,00                             | -100,0           | 32,09                            | 83,7             | 32,09                               | 69,1             |
| 12        | 0,00                             | -100,0           | 35,61                            | 103,8            | 35,61                               | 87,6             |
| 13        | 0,10                             | -93,6            | 24,18                            | 38,4             | 24,28                               | 27,9             |
| 14        | 0,01                             | -99,3            | 25,85                            | 48,0             | 25,86                               | 36,3             |
| 15        | 0,00                             | -100,0           | 27,98                            | 60,1             | 27,98                               | 47,4             |
| 16        | 0,00                             | -100,0           | 31,41                            | 79,8             | 31,41                               | 65,5             |
| 17        | 0,10                             | -93,6            | 22,12                            | 26,6             | 22,21                               | 17,0             |
| 18        | 0,01                             | -99,3            | 22,52                            | 28,9             | 22,53                               | 18,7             |
| 19        | 0,00                             | -100,0           | 25,84                            | 47,9             | 25,84                               | 36,2             |
| 20        | 0,00                             | -100,0           | 27,34                            | 56,5             | 27,34                               | 44,0             |
| 21        | 0,10                             | -93,6            | 22,06                            | 26,3             | 22,16                               | 16,8             |
| 22        | 0,01                             | -99,3            | 22,50                            | 28,8             | 22,52                               | 18,6             |
| 23        | 0,00                             | -100,0           | 25,85                            | 48,0             | 25,85                               | 36,2             |
| 24        | 0,00                             | -100,0           | 27,38                            | 56,7             | 27,38                               | 44,3             |
| 25        | 0,10                             | -93,6            | 21,33                            | 22,1             | 21,42                               | 12,9             |
| 26        | 0,01                             | -99,3            | 22,00                            | 25,9             | 22,01                               | 16,0             |
| 27        | 0,00                             | -100,0           | 24,70                            | 41,4             | 24,70                               | 30,1             |
| 28        | 0,00                             | -100,0           | 26,55                            | 51,9             | 26,55                               | 39,9             |
| 29        | 0,10                             | -93,3            | 15,76                            | -9,8             | 15,86                               | -16,4            |
| 30        | 0,01                             | -99,2            | 15,93                            | -8,8             | 15,94                               | -16,0            |
| 31        | 0,00                             | -100,0           | 17,06                            | -2,4             | 17,06                               | -10,1            |
| 32        | 0,00                             | -100,0           | 17,36                            | -0,6             | 17,36                               | -8,5             |

Anexo C – Quadro 3 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #1 em Lisboa

| Lisboa    |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 1,88                             | -67,0            | 22,45                            | 80,5             | 24,33                               | 34,2             |
| 2         | 1,40                             | -75,4            | 23,09                            | 85,6             | 24,49                               | 35,0             |
| 3         | 1,03                             | -81,9            | 26,38                            | 112,1            | 27,42                               | 51,2             |
| 4         | 0,48                             | -91,5            | 28,27                            | 127,3            | 28,75                               | 58,5             |
| 5         | 1,88                             | -67,0            | 17,69                            | 42,2             | 19,57                               | 7,9              |
| 6         | 1,40                             | -75,4            | 18,24                            | 46,7             | 19,65                               | 8,3              |
| 7         | 1,03                             | -81,9            | 20,35                            | 63,6             | 21,38                               | 17,9             |
| 8         | 0,48                             | -91,5            | 21,80                            | 75,3             | 22,28                               | 22,9             |
| 9         | 1,88                             | -67,0            | 20,14                            | 61,9             | 22,02                               | 21,4             |
| 10        | 1,40                             | -75,4            | 21,49                            | 72,8             | 22,89                               | 26,2             |
| 11        | 1,03                             | -81,9            | 23,90                            | 92,2             | 24,93                               | 37,5             |
| 12        | 0,48                             | -91,5            | 26,73                            | 114,9            | 27,21                               | 50,0             |
| 13        | 1,88                             | -67,0            | 17,15                            | 37,9             | 19,03                               | 4,9              |
| 14        | 1,40                             | -75,4            | 18,57                            | 49,3             | 19,97                               | 10,1             |
| 15        | 1,03                             | -81,9            | 19,76                            | 58,9             | 20,79                               | 14,6             |
| 16        | 0,48                             | -91,5            | 22,45                            | 80,5             | 22,93                               | 26,4             |
| 17        | 1,88                             | -67,0            | 14,84                            | 19,3             | 16,72                               | -7,8             |
| 18        | 1,40                             | -75,4            | 14,95                            | 20,2             | 16,36                               | -9,8             |
| 19        | 1,03                             | -81,9            | 17,40                            | 39,9             | 18,44                               | 1,7              |
| 20        | 0,48                             | -91,5            | 18,10                            | 45,5             | 18,58                               | 2,4              |
| 21        | 1,88                             | -67,0            | 14,66                            | 17,9             | 16,54                               | -8,8             |
| 22        | 1,40                             | -75,4            | 14,80                            | 19,0             | 16,20                               | -10,7            |
| 23        | 1,03                             | -81,9            | 17,18                            | 38,1             | 18,21                               | 0,4              |
| 24        | 0,48                             | -91,5            | 17,89                            | 43,9             | 18,37                               | 1,3              |
| 25        | 1,88                             | -67,0            | 14,03                            | 12,8             | 15,91                               | -12,3            |
| 26        | 1,40                             | -75,4            | 14,38                            | 15,6             | 15,78                               | -13,0            |
| 27        | 1,03                             | -81,9            | 16,22                            | 30,4             | 17,25                               | -4,9             |
| 28        | 0,48                             | -91,5            | 17,22                            | 38,5             | 17,70                               | -2,4             |
| 29        | 2,11                             | -63,0            | 11,16                            | -10,3            | 13,27                               | -26,8            |
| 30        | 1,59                             | -72,1            | 11,24                            | -9,7             | 12,83                               | -29,3            |
| 31        | 1,15                             | -79,8            | 12,16                            | -2,3             | 13,31                               | -26,6            |
| 32        | 0,54                             | -90,5            | 12,33                            | -0,9             | 12,87                               | -29,1            |



Anexo C – Quadro 4 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #1 em Évora

| Évora     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 5,04                             | -51,6            | 23,10                            | 69,5             | 28,14                               | 17,1             |
| 2         | 4,32                             | -58,6            | 23,67                            | 73,8             | 27,99                               | 16,4             |
| 3         | 3,65                             | -65,0            | 26,97                            | 98,0             | 30,62                               | 27,4             |
| 4         | 2,43                             | -76,7            | 28,73                            | 110,9            | 31,16                               | 29,6             |
| 5         | 5,04                             | -51,6            | 18,36                            | 34,8             | 23,40                               | -2,6             |
| 6         | 4,32                             | -58,6            | 18,85                            | 38,4             | 23,17                               | -3,6             |
| 7         | 3,65                             | -65,0            | 20,95                            | 53,7             | 24,59                               | 2,3              |
| 8         | 2,43                             | -76,7            | 22,28                            | 63,5             | 24,71                               | 2,8              |
| 9         | 5,04                             | -51,6            | 20,77                            | 52,4             | 25,81                               | 7,4              |
| 10        | 4,32                             | -58,6            | 22,06                            | 61,9             | 26,37                               | 9,7              |
| 11        | 3,65                             | -65,0            | 24,44                            | 79,4             | 28,09                               | 16,9             |
| 12        | 2,43                             | -76,7            | 27,16                            | 99,3             | 29,58                               | 23,1             |
| 13        | 5,04                             | -51,6            | 17,81                            | 30,7             | 22,85                               | -4,9             |
| 14        | 4,32                             | -58,6            | 19,17                            | 40,7             | 23,48                               | -2,3             |
| 15        | 3,65                             | -65,0            | 20,33                            | 49,2             | 23,98                               | -0,2             |
| 16        | 2,43                             | -76,7            | 22,90                            | 68,1             | 25,33                               | 5,4              |
| 17        | 5,04                             | -51,6            | 15,57                            | 14,3             | 20,61                               | -14,3            |
| 18        | 4,32                             | -58,6            | 15,62                            | 14,7             | 19,94                               | -17,1            |
| 19        | 3,65                             | -65,0            | 18,06                            | 32,6             | 21,71                               | -9,7             |
| 20        | 2,43                             | -76,7            | 18,64                            | 36,8             | 21,06                               | -12,4            |
| 21        | 5,04                             | -51,6            | 15,51                            | 13,9             | 20,56                               | -14,5            |
| 22        | 4,32                             | -58,6            | 15,59                            | 14,4             | 19,90                               | -17,2            |
| 23        | 3,65                             | -65,0            | 18,05                            | 32,5             | 21,70                               | -9,7             |
| 24        | 2,43                             | -76,7            | 18,65                            | 36,9             | 21,08                               | -12,3            |
| 25        | 5,04                             | -51,6            | 14,80                            | 8,6              | 19,84                               | -17,4            |
| 26        | 4,32                             | -58,6            | 15,09                            | 10,8             | 19,41                               | -19,3            |
| 27        | 3,65                             | -65,0            | 16,95                            | 24,4             | 20,59                               | -14,3            |
| 28        | 2,43                             | -76,7            | 17,85                            | 31,0             | 20,27                               | -15,7            |
| 29        | 6,11                             | -41,3            | 12,62                            | -7,4             | 18,73                               | -22,1            |
| 30        | 5,36                             | -48,5            | 12,68                            | -6,9             | 18,04                               | -24,9            |
| 31        | 4,52                             | -56,6            | 13,65                            | 0,2              | 18,17                               | -24,4            |
| 32        | 3,23                             | -69,0            | 13,82                            | 1,4              | 17,04                               | -29,1            |

Anexo C – Quadro 5 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #1 em Coimbra

| Coimbra   |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 4,71                             | -50,7            | 17,58                            | 102,2            | 22,28                               | 22,1             |
| 2         | 4,05                             | -57,6            | 18,10                            | 108,2            | 22,15                               | 21,4             |
| 3         | 3,49                             | -63,5            | 21,05                            | 142,2            | 24,54                               | 34,5             |
| 4         | 2,49                             | -74,0            | 22,66                            | 160,7            | 25,15                               | 37,8             |
| 5         | 4,71                             | -50,7            | 12,71                            | 46,2             | 17,42                               | -4,6             |
| 6         | 4,05                             | -57,6            | 13,19                            | 51,7             | 17,24                               | -5,5             |
| 7         | 3,49                             | -63,5            | 14,80                            | 70,3             | 18,29                               | 0,2              |
| 8         | 2,49                             | -74,0            | 16,04                            | 84,5             | 18,52                               | 1,5              |
| 9         | 4,71                             | -50,7            | 15,26                            | 75,6             | 19,97                               | 9,4              |
| 10        | 4,05                             | -57,6            | 16,49                            | 89,7             | 20,55                               | 12,6             |
| 11        | 3,49                             | -63,5            | 18,54                            | 113,3            | 22,03                               | 20,7             |
| 12        | 2,49                             | -74,0            | 21,09                            | 142,7            | 23,58                               | 29,2             |
| 13        | 4,71                             | -50,7            | 12,29                            | 41,4             | 17,00                               | -6,8             |
| 14        | 4,05                             | -57,6            | 13,60                            | 56,5             | 17,66                               | -3,2             |
| 15        | 3,49                             | -63,5            | 14,40                            | 65,6             | 17,89                               | -2,0             |
| 16        | 2,49                             | -74,0            | 16,83                            | 93,6             | 19,31                               | 5,9              |
| 17        | 4,71                             | -50,7            | 10,24                            | 17,7             | 14,94                               | -18,1            |
| 18        | 4,05                             | -57,6            | 10,30                            | 18,5             | 14,36                               | -21,3            |
| 19        | 3,49                             | -63,5            | 12,23                            | 40,7             | 15,72                               | -13,8            |
| 20        | 2,49                             | -74,0            | 12,76                            | 46,8             | 15,24                               | -16,5            |
| 21        | 4,71                             | -50,7            | 10,36                            | 19,1             | 15,06                               | -17,4            |
| 22        | 4,05                             | -57,6            | 10,46                            | 20,3             | 14,51                               | -20,5            |
| 23        | 3,49                             | -63,5            | 12,52                            | 44,1             | 16,01                               | -12,3            |
| 24        | 2,49                             | -74,0            | 13,11                            | 50,8             | 15,59                               | -14,5            |
| 25        | 4,71                             | -50,7            | 9,54                             | 9,7              | 14,24                               | -21,9            |
| 26        | 4,05                             | -57,6            | 9,86                             | 13,4             | 13,91                               | -23,8            |
| 27        | 3,49                             | -63,5            | 11,23                            | 29,2             | 14,72                               | -19,3            |
| 28        | 2,49                             | -74,0            | 12,10                            | 39,2             | 14,59                               | -20,0            |
| 29        | 5,35                             | -44,0            | 7,96                             | -8,4             | 13,31                               | -27,1            |
| 30        | 4,65                             | -51,3            | 8,10                             | -6,8             | 12,75                               | -30,1            |
| 31        | 3,91                             | -59,0            | 8,85                             | 1,8              | 12,76                               | -30,1            |
| 32        | 2,82                             | -70,5            | 9,10                             | 4,7              | 11,92                               | -34,7            |

Anexo C – Quadro 6 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #1 no Porto

| Porto     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 7,01                             | -48,0            | 9,24                             | 247,9            | 16,25                               | 0,7              |
| 2         | 6,10                             | -54,8            | 9,73                             | 266,5            | 15,83                               | -1,9             |
| 3         | 5,38                             | -60,1            | 12,05                            | 354,0            | 17,44                               | 8,0              |
| 4         | 4,04                             | -70,0            | 13,56                            | 410,9            | 17,60                               | 9,1              |
| 5         | 7,01                             | -48,0            | 5,23                             | 97,1             | 12,25                               | -24,1            |
| 6         | 6,10                             | -54,8            | 5,56                             | 109,5            | 11,66                               | -27,8            |
| 7         | 5,38                             | -60,1            | 6,58                             | 147,8            | 11,96                               | -25,9            |
| 8         | 4,04                             | -70,0            | 7,54                             | 184,1            | 11,58                               | -28,2            |
| 9         | 7,01                             | -48,0            | 7,26                             | 173,5            | 14,27                               | -11,5            |
| 10        | 6,10                             | -54,8            | 8,34                             | 214,4            | 14,44                               | -10,5            |
| 11        | 5,38                             | -60,1            | 9,79                             | 268,9            | 15,18                               | -6,0             |
| 12        | 4,04                             | -70,0            | 12,16                            | 358,0            | 16,20                               | 0,4              |
| 13        | 7,01                             | -48,0            | 4,87                             | 83,3             | 11,88                               | -26,4            |
| 14        | 6,10                             | -54,8            | 5,86                             | 120,9            | 11,96                               | -25,9            |
| 15        | 5,38                             | -60,1            | 6,19                             | 133,1            | 11,57                               | -28,3            |
| 16        | 4,04                             | -70,0            | 8,20                             | 208,8            | 12,24                               | -24,2            |
| 17        | 7,01                             | -48,0            | 3,35                             | 26,4             | 10,37                               | -35,8            |
| 18        | 6,10                             | -54,8            | 3,34                             | 25,7             | 9,43                                | -41,5            |
| 19        | 5,38                             | -60,1            | 4,53                             | 70,5             | 9,91                                | -38,6            |
| 20        | 4,04                             | -70,0            | 4,82                             | 81,7             | 8,86                                | -45,1            |
| 21        | 7,01                             | -48,0            | 3,35                             | 26,2             | 10,36                               | -35,8            |
| 22        | 6,10                             | -54,8            | 3,35                             | 26,3             | 9,45                                | -41,4            |
| 23        | 5,38                             | -60,1            | 4,62                             | 74,1             | 10,00                               | -38,0            |
| 24        | 4,04                             | -70,0            | 4,96                             | 86,8             | 9,00                                | -44,2            |
| 25        | 7,01                             | -48,0            | 2,83                             | 6,5              | 9,84                                | -39,0            |
| 26        | 6,10                             | -54,8            | 2,98                             | 12,3             | 9,08                                | -43,7            |
| 27        | 5,38                             | -60,1            | 3,70                             | 39,4             | 9,08                                | -43,7            |
| 28        | 4,04                             | -70,0            | 4,24                             | 59,9             | 8,28                                | -48,7            |
| 29        | 7,25                             | -46,2            | 2,71                             | 2,0              | 9,96                                | -38,3            |
| 30        | 6,31                             | -53,2            | 2,80                             | 5,5              | 9,11                                | -43,5            |
| 31        | 5,51                             | -59,1            | 3,22                             | 21,1             | 8,72                                | -45,9            |
| 32        | 4,14                             | -69,3            | 3,39                             | 27,6             | 7,53                                | -53,4            |

Anexo C – Quadro 7 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #1 em Bragança

| Bragança  |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 20,76                            | -33,6            | 14,15                            | 104,9            | 34,92                               | -8,6             |
| 2         | 19,35                            | -38,1            | 14,61                            | 111,5            | 33,96                               | -11,1            |
| 3         | 18,47                            | -41,0            | 16,96                            | 145,6            | 35,43                               | -7,2             |
| 4         | 16,14                            | -48,4            | 18,27                            | 164,5            | 34,41                               | -9,9             |
| 5         | 20,76                            | -33,6            | 9,55                             | 38,2             | 30,31                               | -20,6            |
| 6         | 19,36                            | -38,1            | 9,85                             | 42,6             | 29,20                               | -23,5            |
| 7         | 18,47                            | -41,0            | 10,88                            | 57,5             | 29,35                               | -23,2            |
| 8         | 16,14                            | -48,4            | 11,59                            | 67,7             | 27,73                               | -27,4            |
| 9         | 20,76                            | -33,6            | 11,93                            | 72,7             | 32,70                               | -14,4            |
| 10        | 19,36                            | -38,1            | 13,07                            | 89,2             | 32,43                               | -15,1            |
| 11        | 18,47                            | -41,0            | 14,51                            | 110,1            | 32,98                               | -13,6            |
| 12        | 16,14                            | -48,4            | 16,75                            | 142,5            | 32,89                               | -13,9            |
| 13        | 20,76                            | -33,6            | 9,10                             | 31,7             | 29,86                               | -21,8            |
| 14        | 19,36                            | -38,1            | 10,21                            | 47,8             | 29,57                               | -22,6            |
| 15        | 18,47                            | -41,0            | 10,42                            | 50,8             | 28,88                               | -24,4            |
| 16        | 16,14                            | -48,4            | 12,34                            | 78,6             | 28,48                               | -25,4            |
| 17        | 20,77                            | -33,6            | 7,20                             | 4,3              | 27,97                               | -26,8            |
| 18        | 19,36                            | -38,1            | 7,10                             | 2,8              | 26,46                               | -30,7            |
| 19        | 18,47                            | -41,0            | 8,40                             | 21,6             | 26,87                               | -29,6            |
| 20        | 16,14                            | -48,4            | 8,36                             | 21,1             | 24,50                               | -35,8            |
| 21        | 20,77                            | -33,6            | 7,29                             | 5,6              | 28,06                               | -26,5            |
| 22        | 19,36                            | -38,1            | 7,21                             | 4,4              | 26,57                               | -30,4            |
| 23        | 18,47                            | -41,0            | 8,62                             | 24,8             | 27,09                               | -29,1            |
| 24        | 16,14                            | -48,4            | 8,63                             | 24,9             | 24,77                               | -35,1            |
| 25        | 20,77                            | -33,6            | 6,62                             | -4,1             | 27,39                               | -28,3            |
| 26        | 19,36                            | -38,1            | 6,73                             | -2,6             | 26,09                               | -31,7            |
| 27        | 18,47                            | -41,0            | 7,51                             | 8,7              | 25,98                               | -32,0            |
| 28        | 16,14                            | -48,4            | 7,77                             | 12,5             | 23,91                               | -37,4            |
| 29        | 20,79                            | -33,5            | 6,61                             | -4,4             | 27,40                               | -28,3            |
| 30        | 19,37                            | -38,1            | 6,70                             | -3,1             | 26,07                               | -31,7            |
| 31        | 18,48                            | -40,9            | 7,40                             | 7,1              | 25,88                               | -32,2            |
| 32        | 16,15                            | -48,4            | 7,62                             | 10,3             | 23,77                               | -37,8            |

Anexo C – Quadro 8 – Lista de simulações dos modelos #2, #3 e #4

| Simulação | Tipo de Vidro do solário | Área de Envidraçado do solário | Sombreamento do solário                             | Ventilação Natural          | Planeamento de funcionamento das estratégias de arrefecimento |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---|-----------------------------|---|
| #1        | Simple                   | Com muro opaco                 | -   | -                           | -   |
| #2        | Duplo                    |                                |   |                             |   |
| #3        | Simple                   | Sem muro opaco                 |   |                             |   |
| #4        | Duplo                    |                                |   |                             |   |
| #5        | Simple                   | Com muro opaco                 | Estore interior com elevado coeficiente de reflexão | Abertura com área de 0,8 m2 | Período de arrefecimento otimizado diferente para cada cidade |
| #6        | Duplo                    |                                |   |                             |   |
| #7        | Simple                   | Sem muro opaco                 |   |                             |   |
| #8        | Duplo                    |                                |   |                             |   |

Anexo C – Quadro 9 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #2 em Faro

| Faro      |                               |               |                               |               |                                  |               |
|-----------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|
| Simulação | Nic [kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença [%] | Nvc [kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença [%] | Nanual [kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença [%] |
| 1         | 0,76                          | -42,5         | 26,56                         | 37,1          | 27,32                            | 32,1          |
| 2         | 0,55                          | -58,6         | 27,00                         | 39,4          | 27,54                            | 33,1          |
| 3         | 0,33                          | -75,1         | 30,42                         | 57,1          | 30,75                            | 48,7          |
| 4         | 0,10                          | -92,3         | 31,73                         | 63,8          | 31,84                            | 53,9          |
| 5         | 0,78                          | -40,6         | 16,12                         | -16,8         | 16,90                            | -18,3         |
| 6         | 0,56                          | -57,3         | 16,30                         | -15,8         | 16,87                            | -18,5         |
| 7         | 0,34                          | -74,5         | 17,20                         | -11,2         | 17,54                            | -15,2         |
| 8         | 0,10                          | -92,1         | 17,51                         | -9,6          | 17,61                            | -14,9         |

Anexo C – Quadro 10 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #2 em Lisboa

| Lisboa    |                               |               |                               |               |                                  |               |
|-----------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|
| Simulação | Nic [kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença [%] | Nvc [kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença [%] | Nanual [kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença [%] |
| 1         | 3,49                          | -31,8         | 20,47                         | 45,0          | 23,96                            | 24,6          |
| 2         | 3,01                          | -41,1         | 20,83                         | 47,5          | 23,84                            | 24,0          |
| 3         | 2,53                          | -50,5         | 23,62                         | 67,3          | 26,15                            | 36,0          |
| 4         | 1,87                          | -63,5         | 24,63                         | 74,4          | 26,50                            | 37,8          |
| 5         | 3,76                          | -26,3         | 11,49                         | -18,6         | 15,26                            | -20,7         |
| 6         | 3,27                          | -36,0         | 11,58                         | -18,0         | 14,85                            | -22,8         |
| 7         | 2,74                          | -46,3         | 12,35                         | -12,6         | 15,09                            | -21,5         |
| 8         | 2,03                          | -60,2         | 12,50                         | -11,5         | 14,54                            | -24,4         |

Anexo C – Quadro 11 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #2 em Évora

| Évora     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 7,17                             | -26,4            | 21,07                            | 38,6             | 28,24                               | 13,2             |
| 2         | 6,53                             | -33,0            | 21,36                            | 40,5             | 27,89                               | 11,8             |
| 3         | 5,34                             | -45,2            | 25,08                            | 65,0             | 30,42                               | 21,9             |
| 4         | 4,98                             | -48,9            | 25,03                            | 64,7             | 30,01                               | 20,3             |
| 5         | 8,14                             | -16,4            | 12,95                            | -14,8            | 21,09                               | -15,4            |
| 6         | 7,53                             | -22,7            | 13,03                            | -14,3            | 20,56                               | -17,6            |
| 7         | 6,85                             | -29,7            | 13,83                            | -9,0             | 20,68                               | -17,1            |
| 8         | 5,89                             | -39,6            | 13,98                            | -8,0             | 19,87                               | -20,4            |

Anexo C – Quadro 12 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #2 em Coimbra

| Coimbra   |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 6,60                             | -25,1            | 15,62                            | 51,3             | 22,22                               | 16,1             |
| 2         | 5,98                             | -32,1            | 15,88                            | 53,7             | 21,86                               | 14,2             |
| 3         | 5,50                             | -37,7            | 18,28                            | 77,0             | 23,77                               | 24,2             |
| 4         | 4,64                             | -47,3            | 19,07                            | 84,7             | 23,71                               | 23,9             |
| 5         | 7,19                             | -18,5            | 8,40                             | -18,6            | 15,59                               | -18,6            |
| 6         | 6,53                             | -25,9            | 8,57                             | -17,0            | 15,10                               | -21,1            |
| 7         | 5,94                             | -32,6            | 9,15                             | -11,4            | 15,09                               | -21,2            |
| 8         | 5,03                             | -42,9            | 9,44                             | -8,6             | 14,47                               | -24,4            |

Anexo C – Quadro 13 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #2 no Porto

| Porto     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 9,31                             | -26,3            | 7,91                             | 115,1            | 17,22                               | 5,6              |
| 2         | 8,56                             | -32,2            | 8,18                             | 122,3            | 16,74                               | 2,7              |
| 3         | 7,98                             | -36,8            | 9,91                             | 169,4            | 17,90                               | 9,7              |
| 4         | 6,85                             | -45,8            | 10,67                            | 190,1            | 17,52                               | 7,4              |
| 5         | 9,56                             | -24,3            | 2,95                             | -19,8            | 12,51                               | -23,3            |
| 6         | 8,80                             | -30,3            | 3,06                             | -16,8            | 11,87                               | -27,2            |
| 7         | 8,16                             | -35,4            | 3,40                             | -7,7             | 11,56                               | -29,1            |
| 8         | 6,99                             | -44,6            | 3,59                             | -2,5             | 10,58                               | -35,1            |

Anexo C – Quadro 14 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #2 em Bragança

| <b>Bragança</b> |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação       | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1               | 23,84                            | -20,9            | 12,65                            | 55,6             | 36,49                               | -4,7             |
| 2               | 22,70                            | -24,7            | 12,90                            | 58,7             | 35,60                               | -7,0             |
| 3               | 22,08                            | -26,8            | 14,86                            | 82,8             | 36,93                               | -3,5             |
| 4               | 20,32                            | -32,6            | 15,58                            | 91,7             | 35,90                               | -6,2             |
| 5               | 23,91                            | -20,7            | 6,89                             | -15,2            | 30,81                               | -19,5            |
| 6               | 22,75                            | -24,5            | 7,00                             | -13,8            | 29,76                               | -22,2            |
| 7               | 22,11                            | -26,7            | 7,53                             | -7,3             | 29,64                               | -22,6            |
| 8               | 20,34                            | -32,5            | 7,75                             | -4,7             | 28,09                               | -26,6            |

Anexo C – Quadro 15 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #3 em Faro

| <b>Faro</b> |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação   | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1           | 1,28                             | -24,8            | 22,11                            | 21,6             | 23,39                               | 17,6             |
| 2           | 1,09                             | -35,9            | 22,37                            | 23,0             | 23,46                               | 17,9             |
| 3           | 0,84                             | -50,7            | 24,21                            | 33,1             | 25,05                               | 25,9             |
| 4           | 0,54                             | -68,2            | 25,02                            | 37,6             | 25,56                               | 28,5             |
| 5           | 1,32                             | -22,6            | 15,70                            | -13,7            | 17,02                               | -14,4            |
| 6           | 1,12                             | -34,3            | 15,84                            | -12,9            | 16,96                               | -14,8            |
| 7           | 0,86                             | -49,7            | 16,32                            | -10,3            | 17,18                               | -13,7            |
| 8           | 0,55                             | -67,6            | 16,54                            | -9,1             | 17,09                               | -14,1            |

Anexo C – Quadro 16 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #3 em Lisboa

| <b>Lisboa</b> |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|---------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação     | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1             | 4,67                             | -24,8            | 16,53                            | 27,2             | 21,20                               | 10,4             |
| 2             | 4,30                             | -30,7            | 16,73                            | 28,8             | 21,03                               | 9,6              |
| 3             | 3,83                             | -38,2            | 18,16                            | 39,8             | 22,00                               | 14,6             |
| 4             | 3,17                             | -48,9            | 18,77                            | 44,5             | 21,94                               | 14,3             |
| 5             | 4,92                             | -20,6            | 11,17                            | -14,0            | 16,09                               | -16,2            |
| 6             | 4,55                             | -26,6            | 11,24                            | -13,5            | 15,79                               | -17,8            |
| 7             | 4,06                             | -34,5            | 11,63                            | -10,5            | 15,70                               | -18,2            |
| 8             | 3,37                             | -45,6            | 11,75                            | -9,6             | 15,12                               | -21,2            |

Anexo C – Quadro 17 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #3 em Évora

| Évora     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 8,92                             | -18,2            | 17,48                            | 22,3             | 26,41                               | 4,8              |
| 2         | 8,48                             | -22,3            | 17,64                            | 23,4             | 26,12                               | 3,6              |
| 3         | 7,92                             | -27,4            | 19,08                            | 33,5             | 27,00                               | 7,1              |
| 4         | 7,08                             | -35,1            | 19,64                            | 37,4             | 26,72                               | 6,0              |
| 5         | 9,72                             | -10,9            | 12,70                            | -11,1            | 22,43                               | -11,0            |
| 6         | 9,29                             | -14,8            | 12,77                            | -10,7            | 22,06                               | -12,5            |
| 7         | 8,73                             | -20,0            | 13,20                            | -7,6             | 21,93                               | -13,0            |
| 8         | 7,94                             | -27,3            | 13,32                            | -6,8             | 21,25                               | -15,7            |

Anexo C – Quadro 18 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #3 em Coimbra

| Coimbra   |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 8,07                             | -21,3            | 12,60                            | 33,8             | 20,68                               | 5,1              |
| 2         | 7,59                             | -26,0            | 12,76                            | 35,5             | 20,35                               | 3,4              |
| 3         | 7,14                             | -30,5            | 14,04                            | 49,1             | 21,18                               | 7,6              |
| 4         | 6,41                             | -37,5            | 14,56                            | 54,7             | 20,98                               | 6,6              |
| 5         | 8,74                             | -14,9            | 8,14                             | -13,5            | 16,88                               | -14,2            |
| 6         | 8,23                             | -19,8            | 8,26                             | -12,3            | 16,49                               | -16,2            |
| 7         | 7,71                             | -24,8            | 8,57                             | -9,0             | 16,28                               | -17,3            |
| 8         | 6,94                             | -32,3            | 8,76                             | -7,0             | 15,70                               | -20,2            |

Anexo C – Quadro 19 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #3 no Porto

| Porto     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 11,31                            | -19,0            | 5,54                             | 80,2             | 16,85                               | -1,1             |
| 2         | 10,77                            | -22,9            | 5,67                             | 84,3             | 16,44                               | -3,5             |
| 3         | 10,21                            | -26,9            | 6,54                             | 112,5            | 16,75                               | -1,7             |
| 4         | 9,25                             | -33,8            | 6,94                             | 125,5            | 16,18                               | -5,0             |
| 5         | 11,59                            | -17,0            | 2,69                             | -12,5            | 14,29                               | -16,2            |
| 6         | 11,04                            | -20,9            | 2,77                             | -10,0            | 13,81                               | -19,0            |
| 7         | 10,46                            | -25,1            | 2,93                             | -4,7             | 13,39                               | -21,4            |
| 8         | 9,47                             | -32,2            | 3,05                             | -0,7             | 12,52                               | -26,5            |



Anexo C – Quadro 20 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #3 em Bragança

| <b>Bragança</b> |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação       | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1               | 27,25                            | -15,3            | 10,06                            | 35,0             | 37,31                               | -5,9             |
| 2               | 26,44                            | -17,8            | 10,20                            | 36,9             | 36,64                               | -7,6             |
| 3               | 25,85                            | -19,7            | 11,25                            | 51,0             | 37,10                               | -6,4             |
| 4               | 24,44                            | -24,1            | 11,70                            | 57,0             | 36,14                               | -8,8             |
| 5               | 27,35                            | -15,0            | 6,63                             | -11,0            | 33,97                               | -14,3            |
| 6               | 26,53                            | -17,6            | 6,70                             | -10,1            | 33,23                               | -16,2            |
| 7               | 25,93                            | -19,4            | 6,97                             | -6,4             | 32,90                               | -17,0            |
| 8               | 24,50                            | -23,9            | 7,10                             | -4,7             | 31,60                               | -20,3            |

Anexo C – Quadro 21 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #4 em Faro

| <b>Faro</b> |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação   | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1           | 0,02                             | -99,2            | 26,09                            | 41,0             | 26,10                               | 26,9             |
| 2           | 0,03                             | -98,7            | 25,30                            | 36,7             | 25,32                               | 23,2             |
| 3           | 0,00                             | -100,0           | 29,93                            | 61,7             | 29,93                               | 45,5             |
| 4           | 0,00                             | -100,0           | 29,50                            | 59,4             | 29,50                               | 43,4             |
| 5           | 0,02                             | -99,2            | 15,80                            | -14,6            | 15,81                               | -23,1            |
| 6           | 0,03                             | -98,7            | 15,89                            | -14,1            | 15,91                               | -22,6            |
| 7           | 0,00                             | -100,0           | 16,58                            | -10,4            | 16,58                               | -19,4            |
| 8           | 0,00                             | -100,0           | 16,72                            | -9,6             | 16,72                               | -18,7            |

Anexo C – Quadro 22 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #4 em Lisboa

| <b>Lisboa</b> |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|---------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação     | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1             | 1,44                             | -79,0            | 19,46                            | 47,6             | 20,90                               | 4,3              |
| 2             | 1,56                             | -77,2            | 18,92                            | 43,5             | 20,48                               | 2,2              |
| 3             | 0,62                             | -91,0            | 22,38                            | 69,8             | 23,00                               | 14,8             |
| 4             | 0,61                             | -91,1            | 22,10                            | 67,6             | 22,71                               | 13,3             |
| 5             | 1,58                             | -76,9            | 11,26                            | -14,6            | 12,85                               | -35,9            |
| 6             | 1,71                             | -75,1            | 11,29                            | -14,3            | 13,00                               | -35,1            |
| 7             | 0,67                             | -90,2            | 11,85                            | -10,1            | 12,52                               | -37,5            |
| 8             | 0,66                             | -90,4            | 11,90                            | -9,7             | 12,56                               | -37,3            |

Anexo C – Quadro 23 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #4 em Évora

| Évora     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 4,82                             | -58,3            | 19,99                            | 36,9             | 24,81                               | -5,2             |
| 2         | 4,93                             | -57,3            | 19,49                            | 33,5             | 24,42                               | -6,7             |
| 3         | 3,16                             | -72,6            | 22,72                            | 55,7             | 25,89                               | -1,0             |
| 4         | 3,03                             | -73,8            | 22,47                            | 53,9             | 25,49                               | -2,6             |
| 5         | 5,82                             | -49,7            | 12,77                            | -12,5            | 18,59                               | -29,0            |
| 6         | 5,92                             | -48,8            | 12,79                            | -12,4            | 18,71                               | -28,5            |
| 7         | 4,09                             | -64,6            | 13,38                            | -8,3             | 17,48                               | -33,2            |
| 8         | 3,95                             | -65,9            | 13,43                            | -8,0             | 17,38                               | -33,6            |

Anexo C – Quadro 24 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #4 em Coimbra

| Coimbra   |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 4,53                             | -58,5            | 15,36                            | 58,7             | 19,88                               | -3,4             |
| 2         | 4,55                             | -58,3            | 14,87                            | 53,7             | 19,42                               | -5,6             |
| 3         | 3,08                             | -71,8            | 17,98                            | 85,8             | 21,05                               | 2,3              |
| 4         | 2,99                             | -72,5            | 17,73                            | 83,3             | 20,73                               | 0,7              |
| 5         | 5,14                             | -52,9            | 8,23                             | -14,9            | 13,37                               | -35,0            |
| 6         | 5,14                             | -52,8            | 8,32                             | -14,0            | 13,46                               | -34,6            |
| 7         | 3,53                             | -67,6            | 8,78                             | -9,2             | 12,32                               | -40,1            |
| 8         | 3,42                             | -68,6            | 8,92                             | -7,8             | 12,34                               | -40,0            |

Anexo C – Quadro 25 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #4 no Porto

| Porto     |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1         | 6,80                             | -53,6            | 7,26                             | 124,2            | 14,05                               | -21,4            |
| 2         | 6,90                             | -52,9            | 6,97                             | 115,3            | 13,87                               | -22,5            |
| 3         | 4,90                             | -66,6            | 9,12                             | 181,8            | 14,02                               | -21,6            |
| 4         | 4,74                             | -67,6            | 9,04                             | 179,4            | 13,79                               | -22,9            |
| 5         | 7,02                             | -52,1            | 2,72                             | -15,9            | 9,74                                | -45,5            |
| 6         | 7,12                             | -51,4            | 2,78                             | -14,2            | 9,89                                | -44,7            |
| 7         | 5,04                             | -65,6            | 3,03                             | -6,3             | 8,07                                | -54,9            |
| 8         | 4,88                             | -66,7            | 3,12                             | -3,6             | 8,00                                | -55,3            |

Anexo C – Quadro 26 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #4 em Bragança

| <b>Bragança</b> |                                  |                  |                                  |                  |                                     |                  |
|-----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Simulação       | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
| 1               | 21,22                            | -36,2            | 12,07                            | 57,1             | 33,29                               | -18,7            |
| 2               | 21,19                            | -36,3            | 11,70                            | 52,3             | 32,89                               | -19,6            |
| 3               | 18,46                            | -44,5            | 14,05                            | 82,8             | 32,51                               | -20,6            |
| 4               | 18,07                            | -45,6            | 13,87                            | 80,6             | 31,94                               | -22,0            |
| 5               | 21,23                            | -36,1            | 6,68                             | -13,1            | 27,91                               | -31,8            |
| 6               | 21,21                            | -36,2            | 6,72                             | -12,5            | 27,93                               | -31,8            |
| 7               | 18,48                            | -44,4            | 7,08                             | -7,9             | 25,55                               | -37,6            |
| 8               | 18,08                            | -45,6            | 7,19                             | -6,4             | 25,27                               | -38,3            |



**ANEXO D - RESULTADOS DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS DA ANÁLISE COMPARATIVA  
COM O SISTEMA ETICS**

Anexo D – Quadro 1 – Lista de simulações da análise comparativa com o sistema ETICS

| Simulação | Solução Construtiva                             |
|-----------|---|
| #1        | Solução Optimizada com Solário para cada cidade |
| #2        | Sistema ETICS                                   |
| #3        | Parede Dupla                                    |
| #4        | Parede Dupla com Solário                        |
| #5        | Parede Dupla com Sistema ETICS                  |

Anexo D – Quadro 2 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #1

| Cidade   | Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro     | #1        | 0,10                             | -98,2            | 15,76                            | 26,7             | 15,86                               | -16,4            |
|          | #2        | 0,35                             | -93,8            | 18,11                            | 45,6             | 18,46                               | -2,7             |
|          | #3        | 1,02                             | -82,0            | 17,75                            | 42,7             | 18,77                               | -1,1             |
|          | #4        | 0,26                             | -95,5            | 15,15                            | 21,8             | 15,41                               | -18,8            |
|          | #5        | 0,27                             | -95,3            | 18,22                            | 46,5             | 18,49                               | -2,6             |
| Lisboa   | #1        | 1,59                             | -72,1            | 11,24                            | -9,7             | 12,83                               | -29,3            |
|          | #2        | 2,54                             | -55,4            | 13,31                            | 7,0              | 15,85                               | -12,6            |
|          | #3        | 4,40                             | -22,7            | 12,77                            | 2,7              | 17,18                               | -5,3             |
|          | #4        | 1,15                             | -79,8            | 11,44                            | -8,0             | 12,59                               | -30,6            |
|          | #5        | 2,25                             | -60,4            | 13,43                            | 8,0              | 15,69                               | -13,5            |
| Évora    | #1        | 3,23                             | -69,0            | 13,82                            | 1,4              | 17,04                               | -29,1            |
|          | #2        | 5,79                             | -44,4            | 14,03                            | 3,0              | 19,81                               | -17,6            |
|          | #3        | 8,68                             | -16,6            | 13,77                            | 1,1              | 22,45                               | -6,6             |
|          | #4        | 2,55                             | -75,5            | 13,83                            | 1,5              | 16,38                               | -31,9            |
|          | #5        | 5,33                             | -48,8            | 14,11                            | 3,6              | 19,44                               | -19,1            |
| Coimbra  | #1        | 2,82                             | -70,5            | 9,10                             | 4,7              | 11,92                               | -34,7            |
|          | #2        | 5,18                             | -45,8            | 9,61                             | 10,5             | 14,79                               | -19,0            |
|          | #3        | 7,87                             | -17,6            | 9,06                             | 4,2              | 16,93                               | -7,2             |
|          | #4        | 2,26                             | -76,4            | 9,29                             | 6,9              | 11,54                               | -36,7            |
|          | #5        | 4,74                             | -50,4            | 9,75                             | 12,1             | 14,48                               | -20,6            |
| Porto    | #1        | 4,14                             | -69,3            | 3,39                             | 27,6             | 7,53                                | -53,4            |
|          | #2        | 8,04                             | -40,4            | 3,64                             | 37,0             | 11,68                               | -27,6            |
|          | #3        | 11,39                            | -15,5            | 3,01                             | 13,4             | 14,40                               | -10,7            |
|          | #4        | 3,54                             | -73,8            | 3,64                             | 37,0             | 7,18                                | -55,5            |
|          | #5        | 7,48                             | -44,5            | 3,78                             | 42,6             | 11,27                               | -30,2            |
| Bragança | #1        | 16,14                            | -48,4            | 7,77                             | 12,5             | 23,91                               | -37,4            |
|          | #2        | 21,77                            | -30,4            | 7,50                             | 8,6              | 29,27                               | -23,4            |
|          | #3        | 27,67                            | -11,5            | 7,13                             | 3,2              | 34,80                               | -8,9             |
|          | #4        | 14,60                            | -53,3            | 7,92                             | 14,7             | 22,53                               | -41,0            |
|          | #5        | 20,74                            | -33,7            | 7,60                             | 10,1             | 28,35                               | -25,8            |

Anexo D – Quadro 3 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #2

| Cidade   | Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro     | #1        | 0,56                             | -89,0            | 16,30                            | 15,4             | 16,87                               | -18,5            |
|          | #2        | 0,30                             | -94,2            | 19,39                            | 37,3             | 19,69                               | -4,8             |
|          | #3        | 0,89                             | -82,7            | 19,45                            | 37,7             | 20,33                               | -1,7             |
|          | #4        | 0,03                             | -99,4            | 17,52                            | 24,1             | 17,55                               | -15,2            |
|          | #5        | 0,22                             | -95,6            | 19,45                            | 37,7             | 19,67                               | -4,9             |
| Lisboa   | #1        | 2,03                             | -60,2            | 12,50                            | -11,5            | 14,54                               | -24,4            |
|          | #2        | 2,29                             | -55,3            | 14,49                            | 2,6              | 16,78                               | -12,8            |
|          | #3        | 3,94                             | -22,8            | 14,30                            | 1,3              | 18,24                               | -5,1             |
|          | #4        | 1,53                             | -70,1            | 12,63                            | -10,5            | 14,16                               | -26,3            |
|          | #5        | 2,04                             | -60,1            | 14,55                            | 3,0              | 16,59                               | -13,7            |
| Évora    | #1        | 5,89                             | -39,6            | 13,98                            | -8,0             | 19,87                               | -20,4            |
|          | #2        | 5,48                             | -43,8            | 15,15                            | -0,4             | 20,63                               | -17,3            |
|          | #3        | 8,15                             | -16,4            | 15,20                            | 0,0              | 23,34                               | -6,4             |
|          | #4        | 4,82                             | -50,5            | 13,95                            | -8,2             | 18,77                               | -24,8            |
|          | #5        | 5,05                             | -48,2            | 15,18                            | -0,1             | 20,23                               | -18,9            |
| Coimbra  | #1        | 5,03                             | -42,9            | 9,44                             | -8,6             | 14,47                               | -24,4            |
|          | #2        | 4,89                             | -44,5            | 10,73                            | 3,9              | 15,62                               | -18,4            |
|          | #3        | 7,29                             | -17,3            | 10,54                            | 2,0              | 17,83                               | -6,9             |
|          | #4        | 4,10                             | -53,4            | 9,58                             | -7,3             | 13,68                               | -28,5            |
|          | #5        | 4,50                             | -49,0            | 10,81                            | 4,7              | 15,31                               | -20,0            |
| Porto    | #1        | 6,99                             | -44,6            | 3,59                             | -2,5             | 10,58                               | -35,1            |
|          | #2        | 7,64                             | -39,5            | 4,43                             | 20,4             | 12,07                               | -26,0            |
|          | #3        | 10,71                            | -15,2            | 3,98                             | 8,1              | 14,68                               | -10,0            |
|          | #4        | 5,87                             | -53,5            | 3,82                             | 3,8              | 9,69                                | -40,6            |
|          | #5        | 7,13                             | -43,6            | 4,56                             | 23,8             | 11,68                               | -28,4            |
| Bragança | #1        | 21,21                            | -29,6            | 7,65                             | -5,9             | 28,86                               | -24,6            |
|          | #2        | 21,14                            | -29,9            | 8,41                             | 3,5              | 29,55                               | -22,8            |
|          | #3        | 26,71                            | -11,4            | 8,26                             | 1,7              | 34,97                               | -8,6             |
|          | #4        | 18,87                            | -37,4            | 7,72                             | -5,0             | 26,59                               | -30,5            |
|          | #5        | 20,17                            | -33,1            | 8,48                             | 4,3              | 28,65                               | -25,1            |

Anexo D – Quadro 4 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #3

| Cidade   | Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nannual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
| Faro     | #1        | 1,12                             | -82,0            | 16,30                            | 25,5             | 17,42                                | -12,4            |
|          | #2        | 0,30                             | -95,2            | 15,84                            | 21,9             | 16,13                                | -18,9            |
|          | #3        | 1,18                             | -80,9            | 18,27                            | 40,6             | 19,45                                | -2,2             |
|          | #4        | 0,73                             | -88,2            | 15,78                            | 21,5             | 16,51                                | -17,0            |
|          | #5        | 0,34                             | -94,4            | 18,26                            | 40,5             | 18,61                                | -6,5             |
| Lisboa   | #1        | 3,37                             | -45,6            | 11,75                            | -9,6             | 15,12                                | -21,2            |
|          | #2        | 2,29                             | -63,2            | 14,49                            | 11,5             | 16,78                                | -12,6            |
|          | #3        | 4,85                             | -21,8            | 13,17                            | 1,4              | 18,02                                | -6,1             |
|          | #4        | 2,57                             | -58,6            | 11,80                            | -9,2             | 14,37                                | -25,1            |
|          | #5        | 2,58                             | -58,4            | 13,43                            | 3,4              | 16,02                                | -16,6            |
| Évora    | #1        | 7,94                             | -27,3            | 8,57                             | -40,1            | 16,50                                | -34,5            |
|          | #2        | 5,48                             | -49,7            | 15,15                            | 6,0              | 20,63                                | -18,2            |
|          | #3        | 9,12                             | -16,4            | 14,27                            | -0,2             | 23,39                                | -7,2             |
|          | #4        | 6,53                             | -40,2            | 13,20                            | -7,6             | 19,73                                | -21,7            |
|          | #5        | 5,66                             | -48,1            | 14,21                            | -0,6             | 19,87                                | -21,2            |
| Coimbra  | #1        | 7,71                             | -24,8            | 9,44                             | 0,2              | 17,15                                | -12,8            |
|          | #2        | 4,89                             | -52,3            | 10,73                            | 13,9             | 15,62                                | -20,6            |
|          | #3        | 8,25                             | -19,6            | 9,63                             | 2,2              | 17,88                                | -9,2             |
|          | #4        | 6,39                             | -37,7            | 8,66                             | -8,1             | 15,05                                | -23,5            |
|          | #5        | 5,06                             | -50,7            | 9,92                             | 5,4              | 14,99                                | -23,8            |
| Porto    | #1        | 9,47                             | -32,2            | 3,05                             | -0,7             | 12,52                                | -26,5            |
|          | #2        | 7,64                             | -45,3            | 4,43                             | 44,0             | 12,07                                | -29,2            |
|          | #3        | 11,82                            | -15,4            | 3,36                             | 9,2              | 15,18                                | -10,9            |
|          | #4        | 7,88                             | -43,6            | 3,25                             | 5,7              | 11,13                                | -34,7            |
|          | #5        | 7,81                             | -44,1            | 3,91                             | 27,2             | 11,73                                | -31,2            |
| Bragança | #1        | 25,28                            | -21,5            | 7,07                             | -5,1             | 32,35                                | -18,4            |
|          | #2        | 21,14                            | -34,3            | 8,41                             | 12,9             | 29,55                                | -25,4            |
|          | #3        | 28,43                            | -11,7            | 7,56                             | 1,5              | 35,99                                | -9,2             |
|          | #4        | 22,26                            | -30,9            | 7,09                             | -4,8             | 29,35                                | -26,0            |
|          | #5        | 21,23                            | -34,0            | 7,75                             | 4,1              | 28,98                                | -26,9            |



Anexo D – Quadro 5 – Necessidades energéticas com percentagem de redução para o modelo #4

| Cidade   | Simulação | Nic<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nvc<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] | Nanual<br>[kWh/m <sup>2</sup> .ano] | Diferença<br>[%] |
|----------|-----------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| Faro     | #1        | 0,02                             | -99,8            | 15,80                            | 19,9             | 15,81                               | -23,1            |
|          | #2        | 0,62                             | -91,0            | 18,43                            | 39,8             | 19,05                               | -7,4             |
|          | #3        | 1,48                             | -78,4            | 18,56                            | 40,8             | 20,03                               | -2,6             |
|          | #4        | 0,00                             | -100,0           | 15,73                            | 19,4             | 15,73                               | -23,5            |
|          | #5        | 0,49                             | -92,8            | 18,48                            | 40,2             | 18,97                               | -7,7             |
| Lisboa   | #1        | 0,67                             | -90,2            | 11,85                            | -10,1            | 12,52                               | -37,5            |
|          | #2        | 3,25                             | -52,6            | 13,52                            | 2,6              | 16,77                               | -16,3            |
|          | #3        | 5,44                             | -20,6            | 13,35                            | 1,3              | 18,79                               | -6,2             |
|          | #4        | 0,38                             | -94,4            | 11,90                            | -9,7             | 12,29                               | -38,7            |
|          | #5        | 2,92                             | -57,3            | 13,58                            | 3,0              | 16,51                               | -17,6            |
| Évora    | #1        | 3,95                             | -65,9            | 13,43                            | -8,0             | 17,38                               | -33,6            |
|          | #2        | 6,58                             | -43,1            | 14,41                            | -1,3             | 20,99                               | -19,7            |
|          | #3        | 9,68                             | -16,3            | 14,55                            | -0,3             | 24,22                               | -7,4             |
|          | #4        | 2,82                             | -75,6            | 13,32                            | -8,8             | 16,13                               | -38,3            |
|          | #5        | 6,07                             | -47,5            | 14,43                            | -1,1             | 20,50                               | -21,6            |
| Coimbra  | #1        | 3,53                             | -67,6            | 8,78                             | -9,2             | 12,32                               | -40,1            |
|          | #2        | 5,94                             | -45,5            | 10,05                            | 3,9              | 15,99                               | -22,3            |
|          | #3        | 8,80                             | -19,3            | 9,88                             | 2,1              | 18,68                               | -9,2             |
|          | #4        | 2,53                             | -76,8            | 8,86                             | -8,4             | 11,39                               | -44,6            |
|          | #5        | 5,46                             | -49,9            | 10,14                            | 4,8              | 15,60                               | -24,2            |
| Porto    | #1        | 4,88                             | -66,7            | 3,12                             | -3,6             | 8,00                                | -55,3            |
|          | #2        | 8,74                             | -40,3            | 3,97                             | 22,5             | 12,71                               | -29,0            |
|          | #3        | 12,38                            | -15,5            | 3,53                             | 9,0              | 15,90                               | -11,1            |
|          | #4        | 3,66                             | -75,0            | 3,32                             | 2,4              | 6,98                                | -61,0            |
|          | #5        | 8,14                             | -44,5            | 4,10                             | 26,5             | 12,23                               | -31,6            |
| Bragança | #1        | 18,99                            | -42,9            | 7,15                             | -6,9             | 26,15                               | -36,1            |
|          | #2        | 22,80                            | -31,4            | 7,90                             | 2,9              | 30,70                               | -25,0            |
|          | #3        | 29,28                            | -11,9            | 7,79                             | 1,4              | 37,08                               | -9,4             |
|          | #4        | 16,22                            | -51,2            | 7,17                             | -6,6             | 23,39                               | -42,8            |
|          | #5        | 21,66                            | -34,9            | 7,98                             | 3,8              | 29,63                               | -27,6            |