Francisco da Silva Costa

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Desempenho energético de edifícios residenciais no contexto da regulamentação térmica com recurso ao Energy Plus e TRNSYS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Arguente: Prof. Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão
Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro 2012

Desempenho energético de edifícios residenciais no contexto da regulamentação térmica com recurso ao Energy Plus e TRNSYS

Agradecimentos

Agradeço ao professor Daniel Aelenei, pela escolha do tema, da orientação sobre a presente dissertação, e ainda pelo acompanhamento pessoal e contínua formação na área da avaliação do comportamento térmico de edifícios desenvolvido durante o percurso curricular do mestrado.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pela criação de elementos fundamentais para a formação profissional como engenheiro civil, com especial relevância para as inúmeras aulas assistidas e discussão crítica de diversos temas do ramo em várias defesas de nota prestadas.

Agradeço à minha família por me acolher novamente no seu lar, após me encontrar distante durante 5 anos, e me apoiar emocionalmente e economicamente ao longo desta jornada. No mesmo patamar coloco dois grandes amigos, o Hugo Santos e o Vitor Marques, que apesar da distância nada impediu a manutenção, desenvolvimento de novos laços e resolução de problemas ocorridos.

Agradeço ainda aos colegas de faculdade pela companhia regular, realização de trabalhos de grupo e noites de estudo, nomeadamente Carlos Rosa, Vitor Lopes, André Farinha, Joana Roseiro, Miguel Peres, entre inúmeras outras pessoas importantes a nível pessoal.

Resumo

No contexto actual em que a eficiência energética dos edifícios é um tópico de importância crescente na Europa, a caracterização adequada dos fenómenos de transferência de calor dos diversos elementos construtivos e ocupacionais das habitações torna-se fundamental para a análise da eficiência do comportamento térmico das habitações.

A eficiência do comportamento térmico dos edifícios depende de diversos parâmetros intrínsecos, como os materiais e soluções construtivas adoptadas, a área de vãos envidraçados e seus sombreamentos, os processos de renovação do ar, a ocupação e actividades realizadas no interior do edifício, entre outros, e parâmetros extrínsecos como a temperatura exterior, radiação solar incidente e restantes condições climáticas. A conjugação e optimização dos parâmetros intrínsecos com os parâmetros extrínsecos permite a caracterização do comportamento térmico dum edifício e sua classificação energética.

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) em vigor desde 2006, corresponde ao instrumento legislativo utilizado actualmente em Portugal utilizado para a caracterização do desempenho térmico dos edifícios. Por outro lado, as ferramentas de simulação computacional de comportamento térmico de edifícios disponíveis, como o Energy Plus e o TRNSYS, podem assumir um papel relevante na avaliação e optimização do desempenho energético de edifícios, devido às suas grandes potencialidades associadas.

O presente trabalho surge com o objectivo da realização de uma análise ao comportamento térmico habitacional, recorrendo às três ferramentas mencionadas, RCCTE, Energy Plus e TRNSYS. Os resultados obtidos permitem a directa comparação dos parâmetros associados ao comportamento térmico, possibilitando a identificação dos principais vantagens associadas à utilização das ferramentas de simulação computacional e respectiva análise do desempenho energético de edifícios residenciais.

Termos chave: Comportamento térmico, simulação, RCCTE, Energy Plus e TRNSYS.

Abstract

In the present context in which energy efficiency in buildings is an issue of growing importance in Europe, the correctly characterization of the phenomena of heat transfer in various construction elements and occupation of housing becomes fundamental for analyzing the efficiency of the thermal behavior of buildings.

The efficiency of the thermal performance of buildings depends on various intrinsic parameters, such as materials and constructive solutions adopted, the area of glazing and their shadowing devices, the process of renewing the interior air, the occupation and activities performed inside the building, among others, and extrinsic parameters, namely the exterior temperature, solar radiance and general weather conditions. The combination and optimization of the intrinsic parameters, according to the extrinsic parameters, permits the characterization of thermal behavior of the building and its energy rating.

The thermal behavior regulation for residential buildings (RCCTE), in vigor since 2006, corresponds to the current legal document in Portugal to characterize the thermal behavior of buildings. The computational simulation tools for thermal behavior of buildings, such as Energy Plus and TRNSYS, can play a significant role to evaluate the energy performance of buildings, due to their enormous potentialities.

The following paper has the objective to review a housing thermal behavior, using the three mentioned tools, RCCTE, Energy Plus and TRNSYS. The results allow the comparison of key parameters associated with the thermal behavior, enabling the identification of the main advantages in using the computational tools and the analysis of the energy performance of residential buildings.

Keywords: Thermal behavior, simulation , RCCTE, Energy Plus and TRNSYS.

Índice de Matérias

Índice de Figuras

Índice de Quadros

Capítulo 1 Introdução

1.1. Motivação e enquadramento do tema

O paradigma da utilização eficiente de energia toma principal relevância no contexto actual, perante uma sociedade fortemente dependente de recursos energéticos convencionais limitados, devido aos seus impactes ambientais negativos e crise económica. Face aos consumos energéticos "excessivos" associados à construção, utilização e manutenção de edifícios, vários países têm promovido estudos e medidas com o objectivo de inverter essa tendência. Como resultados dessas medidas foram criados instrumentos legais com o objectivo da limitação das necessidades energéticas e avaliação crítica das características térmicas de edifícios. Com o aumento das potencialidades e acessibilidade a métodos convencionais, têm surgido ferramentas de simulação computacional que permitem um maior detalhe e a análise de parâmetros associados ao comportamento energético dos edifícios.

Em Portugal, o primeiro instrumento legislativo surgiu em 1990, denominado Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de Fevereiro [1]. No final do século passado, o governo português subscreveu ao Protocolo de Quioto, tendo-se comprometido a implementar medidas para redução das emissões de gases contribuintes para o aquecimento global e efeito de estufa em todos os sectores consumidores de energia, incluindo os edifícios. Mais recentemente, com o objectivo de cumprir os parâmetros definidos pela Directiva n.º 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, nomeadamente a implementação de medidas pertinentes com visibilidade técnica e económica na melhoria do comportamento nos edifícios, adopção de uma metodologia de cálculo do desempenho energético e obrigatoriedade da certificação energética dos edifícios, foi necessário a elaboração de um novo RCCTE.

O novo RCCTE, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril [2], revogou o anterior Decreto-Lei n.º 40/90. O RCCTE, actualmente em vigor, estabelece a metodologia de cálculo para os índices térmicos fundamentais e os seus valores máximos admissíveis, nomeadamente as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, as necessidades nominais anuais de energia para produção de águas quentes sanitárias e necessidades nominais de energia primária. Com uma metodologia de cálculo simples e acessível, o RCCTE baseia-se numa abordagem em regime quase estacionário na análise do comportamento térmico do edifício, considerando temperaturas de referência para o interior da habitação e parâmetros constantes ao longo do tempo para o clima envolvente, em função da zona climática de implantação do edifício.

A evolução recente do ramo informático e potencialidades associadas permitiu o desenvolvimento de uma nova área de avaliação do comportamento térmico de edifícios, onde a realização de simulações computacionais em ferramentas específicas permitem uma crítica análise das soluções elaboradas e respectivo desempenho energético dos edifícios. Devido à capacidade de processamentos em simultâneo, as ferramentas informáticas possibilitam a análise dos fenómenos em regime dinâmico, na qual se efectua uma contínua interacção entre o interior da habitação com a envolvente ambiental ao longo do período de análise.

No que respeita às ferramentas computacionais, são inúmeras as ferramentas aplicadas na avaliação e optimização do comportamento energético dos edifícios, nos quais se englobam o Energy Plus [3] , o TRNSYS [4], o HEED [5], o eQUEST [6], o Energy-10 [7], entre outros. A decisão da aplicação do Energy Plus no presente trabalho associa-se à facilidade de utilização, tendo em conta a sua frequente utilização em diversas disciplinas do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A segunda ferramenta computacional utilizada, TRNSYS, foi escolhida com base nas boas referências internacionais e projectos elaborados, possuindo o Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências de Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa a respectiva licença de utilização.

O Energy Plus [3] é uma ferramentas computacional desenvolvida pelo Departamento da Energia dos Estados Unidos da América (*U.S. Department of Energy*), com origem na combinação da programação de dois softwares anteriormente desenvolvidos (BLAST e DOE-2,) que permite a elaboração da estrutura física do edifício, definição de equipamentos interiores e a criação de parâmetros desejados para a obtenção de resultados. O TRNSYS [4] é um programa de simulação de sistemas transitórios, desenvolvido pela Universidade de *Wisconsin*, *Madison* nos Estados Unidos da América em parceria com diversos centros científicos de outros países. Esta ferramenta permite a associação de diversos componentes individuais para a criação do sistema em estudo e sua análise, apresentando um componente específico na definição de um edifício e introdução dos parâmetros associados às respectivas soluções construtivas.

A utilização destas ferramentas em fase de projecto pode conduzir a uma optimização do comportamento térmico para determinados locais, com consequências que se traduzem numa redução dos consumos energéticos ao longo da vida útil do edifício.

1.2. Objectivos

O presente trabalho tem como objectivo principal a avaliação do desempenho térmico de edifícios residenciais recorrendo às ferramentas de simulação computacional Energy Plus e TRNSYS, no contexto da regulamentação térmica nacional, RCCTE, visando os principais elementos associados às ferramentas computacionais. Para além do objectivo principal do trabalho são ainda definidos os seguintes objectivos:

1. Avaliação do comportamento térmico da habitação perante os factores principais de alteração do balanço energético, nomeadamente a transferência de calor pela envolvente opaca, a transferência de calor pelos vãos envidraçados, transferência de calor devido à renovação do ar interior e ganhos internos da habitação, recorrendo ao RCCTE, Energy Plus e TRNSYS;

2. Comparação entre resultados obtidos com recurso às ferramentas de simulação em regime dinâmico (Energy Plus e TRNSYS) e aos equivalentes fornecidos pela regulamentação legislacional em vigor em Portugal (RCCTE), avaliando as suas diferenças em função das metodologias aplicadas e implicações na eficiência energética;

3. Análise do desempenho térmico e da evolução da temperatura no interior da habitação perante as condições ambientais típicas das principais zonas climáticas de Portugal;

4. Potenciar a utilização e funcionamento correcto das ferramentas de simulação computacional Energy Plus e TRNSYS, no contexto das exigências regulamentares em Portugal, servindo como referência bibliográfica e base de resultados para futuros estudos recorrendo a ambas as ferramentas.

1.3. Estrutura

O presente trabalho estrutura-se nos seguintes capítulos:

Capítulo 1. Introdução

Capítulo 2. Descrição das ferramentas de avaliação do comportamento térmico de edifícios
Apresentação das ferramentas de avaliação do comportamento térmico de edifícios empregadas no estudo realizado, nomeadamente o RCCTE, Energy Plus e TRNSYS. Descrição das principais

referências das ferramentas, o seu funcionamento e a interface de introdução de dados e recolha de resultados. Comparação das principais características associadas às três ferramentas.

Capítulo 3. Metodologia de trabalho

Descrição da metodologia e procedimentos utilizados no trabalho para o cumprimento dos objectivos propostos e análise de resultados.

Capítulo 4. Avaliação das trocas de calor associadas à envolvente opaca

Descrição dos fenómenos físicos associados à transferência de calor pela envolvente opaca dos edifícios. Apresentação dos resultados obtidos com recurso às três ferramentas utilizadas e discussão crítica.

Capítulo 5. Influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico

Definição do balanço energético e ganhos solares associados à existência de vãos envidraçados e influência de sombreamentos horizontais fixos na envolvente da habitação. Apresentação dos resultados obtidos com recurso às três ferramentas utilizadas e discussão crítica dos mesmos.

Capítulo 6. Comportamento térmico perante a renovação do ar interior das habitações

Descrição dos fenómenos físicos associadas à transferência de calor devido à renovação do ar no interior da habitação para garantir as condições de conforto propostas. Apresentação dos resultados obtidos com recurso às três ferramentas utilizadas e discussão crítica dos mesmos.

Capítulo 7. Definição dos ganhos internos das habitações

Descrição de ganhos energéticos associados à ocupação e actividades realizadas na habitação e utilização de iluminação e equipamentos no seu interior. Apresentação dos resultados obtidos com recurso às três ferramentas utilizadas e discussão crítica dos mesmos.

Capítulo 8. Alteração da localização de implantação do edifício

Apresentação do estudo associado à alteração do local de implantação do edifício, com o registo da influência nas necessidades energéticas em locais com um regime de aquecimento e arrefecimento mais rigorosos.

Capítulo 9. Conclusões

Neste capitulo final apresenta-se o sumário do conteúdo da tese, resultados obtidos e principais conclusões associadas.

Capítulo 2 Descrição das ferramentas de avaliação do comportamento térmico de edifícios

No presente capítulo são descritas as ferramentas de avaliação do comportamento térmico de edifícios utilizadas no desenvolvimento do trabalho. A abordagem das ferramentas é feita procurando a descrição da metodologia e algoritmos de cálculo dos parâmetros associados à eficiência energética dos edifícios e consequentes necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento. No caso das ferramentas computacionais é feita também uma abordagem à interface gráfica de introdução de dados e recolha de resultados, aplicada pelo utilizador. O capítulo encontra-se dividido na descrição do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (subsecção 2.1), do Energy Plus (subsecção 2.2) e do TRNSYS (subsecção 2.3). A subsecção 2.4 apresenta a comparação das principais características associadas às três ferramentas utilizadas.

2.1. Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril [2], procura estabelecer as regras na execução do projecto de edifícios com os seguintes objectivos:

- Garantir as exigências de conforto térmico de aquecimento e arrefecimento;
- Garantir as exigências da qualidade do ar no interior dos edifícios por ventilação;
- Satisfazer das necessidades de água quente sanitária sem dispêndio excessivo de energia;
- Garantir a eficiência de sistemas e limitação de energia primária;
- Minimizar as situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas.

À luz das definições existentes no RCCTE, o conceito de "fracção autónoma" corresponde a cada uma das partes de um edifício dotados de contador individual de consumo de energia, separada do resto do edifício por uma barreira física continua, com direito de propriedade ou fruição transmissível autonomamente. O RCCTE aplica-se obrigatoriamente a cada uma das fracções autónomas de todos os

novos edifícios de habitação e de todos os novos edifícios de serviços (sem sistemas de climatização centralizados ou com sistemas de climatização de potência inferior a 25 kW). O regulamento aplica-se ainda a grandes intervenções de remodelação, alteração da envolvente ou na elaboração de instalações de preparação de águas quentes sanitárias a realizar nos dois tipos de edifícios mencionados.

O actual Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios apresenta-se como uma reformulação do regulamento aprovado em 1990, no Decreto-Lei 40/90 de 6 de Fevereiro [1]. O antigo RCCTE constituiu um marco significativo na melhoria da qualidade da construção em Portugal, com a prática de colocação de elementos de isolamento térmico na envolvente dos edifícios.

A elaboração de um novo RCCTE [2] surgiu na sequência da publicação da Directiva n.º 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [8], à luz do qual se tornou necessária a melhoria da qualidade dos edifícios, aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos edifícios, metodologia de cálculo para a contabilização das necessidades energéticas e certificação energética dos edifícios. Perante as exigências da referida EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*), o novo RCCTE foi elaborado de modo a ter em conta o nível de exigências nos contextos social, económico e energético, promovendo a melhoria da qualidade térmica dos edifícios. O novo RCCTE baseia-se em métodos normalizados na determinação das necessidades energéticas, recorrendo à imposição de valores limite de necessidades energéticas, características mínimas de referência para parâmetros associados à transferência de energia com o exterior e obrigatoriedade de instalação de painéis solares na preparação de águas quentes sanitárias.

2.1.1. Metodologia de cálculo

O RCCTE baseia-se em métodos normalizados descritos na norma EN ISO 13790 [9] no cálculo das necessidades energéticas do edifício, permitindo uma flexibilidade e escala de comparabilidade dos resultados obtidos pelos técnicos profissionais com competências para a sua elaboração. No cálculo das necessidades energéticas, o RCCTE define as condições interiores de referência:

- Para as condições ambientes de conforto uma temperatura do ar de 20 ºC na estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25 ºC e 50 % de humidade relativa na estação de arrefecimento;
- Para garantir a qualidade do ar interior, a taxa de referência da renovação do ar é de 0,6 renovações por hora;
- O consumo de referência de água quente sanitária para habitações é de 40 litros de água quente a 60 ºC por pessoa e por dia.

2.1.1.1. Condições climáticas e envolventes do edifício

Na aplicação dos procedimentos de cálculo indicados no RCCTE, utiliza-se uma abordagem em regime quase estacionário, ou seja, considera-se que a temperatura interior da habitação apresenta valores constantes durante a estação convencional de arrefecimento e aquecimento, sendo que a temperatura exterior se encontra definida em função do número de graus-dias de aquecimento e valor médio da temperatura do ar exterior na estação de arrefecimento (para cada concelho de Portugal).

O RCCTE introduz o conceito de zonamento climático do local de implantação, sendo o país dividido em três zonas climáticas de Inverno (I_1, I_2 e I_3) e em três zonas climáticas de Verão (V_1, V_2 e V_3), subdividindo-se a última em região Norte e região Sul. No quadro III.1 do RCCTE encontra-se a distribuição dos conselhos de Portugal segundo as zonas climáticas, com valores de referência para o número de graus-dias de aquecimento (GD) e a duração da estação de aquecimento, aplicados no cálculo de trocas de calor com a envolvente exterior, durante a estação de aquecimento. No quadro III.8 do RCCTE encontra-se indicado o valor médio da temperatura do ar exterior na estação convencional de arrefecimento.

Os valores de energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento e intensidade da radiação solar para a estação convencional de arrefecimento são indicados nos quadros III.8 e III.9 do RCCTE, respectivamente. O valor da energia solar média é afectada pelos factores de redução associados à orientação (X_i), indicados no quadro IV.4 do RCCTE, de acordo com o octante de orientação da parede vertical. Para uma correcta definição dos ganhos solares referentes aos vãos envidraçados do edifício, o RCCTE considera a influência de protecções móveis e palas de sombreamento utilizadas com o objectivo de diminuir a radiação solar incidente nos envidraçados.

A definição da geometria do edifício consiste na definição da área de cada elemento construtivo e classificação de acordo com o seu posicionamento (parede, cobertura, pavimento), envolvente (exterior, interior, em contacto com solo) e função (opaca, vão envidraçado, ponte térmica). Esta classificação é necessária para a aplicação das metodologias adequadas de cálculo em cada situação. O registo da associação entre vãos envidraçados e as suas palas de sombreamento verticais e horizontais permite a posterior afectação no cálculo da radiação solar incidente nos vãos envidraçados.

2.1.1.2. Determinação das necessidades energéticas

Na caracterização do comportamento térmico do edifício é necessário o cálculo das necessidades nominais de aquecimento, necessidades nominais de arrefecimento, necessidades energéticas para preparação de águas quentes sanitárias (não abordados no âmbito do trabalho) e necessidades nominais globais de energia útil para energia primária, para posterior classificação de eficiência energética.

As necessidades nominais globais de energia primária (*Ntc*) de um edifício são calculadas com base na seguinte equação:

$$Ntc = 0{,}1 \times \left(Nic/\eta i\right) \times F_{pui} + 0{,}1 \times \left(Nvc/\eta v\right) \times F_{puv} + Nac \times F_{pua} \qquad \left(kgep\,/\,m^2.ano\right) \tag{2.1}$$

em que:

Nic - necessidades nominais de aquecimento (kWh/m^2.ano);

Nvc - necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m^2.ano);

Nac - necessidades nominais de preparação de águas quentes sanitárias (kWh/m^2.ano);

F_{pu} - factor de conversão entre energia útil e energia primária (kgep/kWh);

η - eficiência nominal dos equipamento utilizados.

De acordo com o RCCTE, nenhuma fracção autónoma pode possuir um valor de *Ntc* superior a um valor limite de necessidades nominais globais de energia primária (*Nt*), calculado com base na expressão seguinte:

$$Ntc = 0{,}9 \times \left(0{,}01 \times Ni + 0{,}01 \times Nv + 0{,}15 \times Na\right) \quad \left(kgep\,/\,m^2.ano\right) \tag{2.2}$$

em que:

Ni - valor limite das necessidades de energia para aquecimento (kWh/m^2.ano);

Nv - valor limite das necessidades de energia para arrefecimento (kWh/m^2.ano);

Na - valor limite das necessidades de energia para preparação de AQS (kWh/m^2.ano).

O parâmetro referente às necessidades nominais de aquecimento exprime a quantidade de energia útil necessária para manter em permanência uma fracção autónoma a uma temperatura interior de referência, considerada 20 ºC, durante a estação de aquecimento. De acordo com o RCCTE, a estação convencional de aquecimento corresponde ao período do ano, posterior a 1 de Outubro, com início no

primeiro decendio em que a temperatura média diária é inferior a 15 ºC e com termo no último decendio com a temperatura média diária ainda inferior a 15 ºC, anterior a 31 de Maio.

O quadro 2.1 apresenta de uma forma sintética a metodologia de cálculo para determinação das necessidades nominais de aquecimento (*Nic*) e seus valores limite (*Ni*), de acordo com o RCCTE.

Quadro 2.1 - Necessidades nominais de aquecimento e valores limite

Necessidades nominais de aquecimento

$$Nic = \left(Q_t + Q_v - Q_{gu}\right) / A_p \qquad \left(kWh / m^2.ano\right)$$

Q_t - perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios (kWh);
Q_v - perdas de calor resultantes da renovação de ar (kWh);
Q_{gu} - ganhos úteis devido à iluminação, equipamentos, ocupantes e ganhos solares através de envidraçados (kWh);
A_p - área útil de pavimento (m^2).

Valores limite de necessidades de aquecimento

a) Para $FF \leq 0{,}5 \Rightarrow Ni = 4{,}5 + 0{,}0359 \times GD$;

b) Para $0{,}5 < FF \leq 1{,}0 \Rightarrow Ni = 4{,}5 + \left(0{,}021 + 0{,}037 \times FF\right) \times GD$;

c) Para $1{,}0 < FF \leq 1{,}5 \Rightarrow Ni = \left[4{,}5 + \left(0{,}021 + 0{,}037 \times FF\right) \times GD\right]\left(1{,}2 - 0{,}2 \times FF\right)$;

d) Para $FF > 1{,}5 \Rightarrow Ni = 4{,}05 + 0{,}06885 \times GD$.

Ni - valor limite das necessidades de energia para aquecimento (kWh/m^2.ano);
FF - factor de forma (m^{-1});
GD - graus dias de aquecimento (ºC);

$$FF = \left[A_{ext} + \sum\left(\tau \times A_{\text{int}}\right)\right] / V \qquad \left(m^{-1}\right)$$

τ - coeficiente associado ao quociente entre a área que separa o espaço útil interior do espaço não útil, pela área do elemento que separa o espaço não útil do ambiente exterior (m^2/m^2);
A_{ext} - área da envolvente exterior (m^2);
A_{int} - área da envolvente interior (m^2);
V - volume interior (m^3).

O parâmetro referente às necessidades nominais de arrefecimento (*Nvc*) exprime a quantidade de energia útil necessária para manter em permanência uma fracção autónoma a uma temperatura interior de referência, considerada 25 ºC, durante a estação de arrefecimento. De acordo com o RCCTE, a estação convencional de arrefecimento corresponde aos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, nos quais as temperaturas exteriores são superiores comparativamente com o restante período anual.

O quadro 2.2 apresenta de uma forma sintética a metodologia de cálculo para determinação das necessidades nominais de arrefecimento (*Nvc*) e seus valores limite (*Nv*), de acordo com o RCCTE.

Quadro 2.2 - Necessidades nominais de arrefecimento e valores limite

Necessidades nominais de arrefecimento

$$Nvc = Q_g \times (1-\eta) / A_p \qquad (kWh / m^2.ano)$$

Q_g - ganhos totais brutos (kWh);
$Q_t + Q_v$ - perdas térmicas totais (kWh);
η - factor de utilização de ganhos térmicos;
A_p - área útil de pavimento (m²).

$$\eta = \frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{a+1}} \quad \text{onde} \quad \gamma = \frac{Q_g}{Q_t + Q_v}$$

Classe de inércia térmica:

Fraca	a = 1,8	$I_t < 150$kg/m²
Média	a = 2,6	$150 < I_t < 400$kg/m²
Forte	a = 4,2	$I_t > 400$kg/m²

I_t - índice de massa superficial por metro quadrado de área de pavimento.

Valores limite de necessidades de arrefecimento

Em função do zonamento climático:

a) Zona V_1 (Norte) $Nv = 16$ kWh/m².ano;
b) Zona V_1 (Sul), $Nv = 22$ kWh/m².ano;
c) Zona V_2 (Norte), $Nv = 18$ kWh/m².ano;
d) Zona V_2 (Sul), $Nv = 32$ kWh/m².ano;
e) Zona V_3 (Norte), $Nv = 26$ kWh/m².ano;
f) Zona V_3 (Sul), $Nv = 32$ kWh/m².ano.

Elaborado de acordo com as disposições da norma europeia EN ISO 13790 [9], a metodologia em regime quase estacionário do RCCTE consiste numa estimativa numérica de comparação dos fenómenos directamente relacionados com a diferença de temperatura interior e exterior, como transferência de calor pela envolvente opaca e renovação de ar, e os restantes parâmetros, como ganhos solares e ganhos internos [10]. As necessidades nominais de aquecimento resultam da soma algébrica das perdas de calor por condução através da envolvente opaca do edifício, perdas de calor resultantes da renovação do ar e ganhos de calor úteis, com formulação média em regime permanente, integradas ao longo da estação de aquecimento. Os processos envolvidos no cálculo das necessidades de arrefecimento são de natureza dinâmica, apresentando o RCCTE uma metodologia simplificada, considerando os ganhos totais do edifício em condições de Verão, afectados pelo factor de utilização de ganhos que estabelece uma comparação entre as perdas térmicas e ganhos térmicos.

2.1.1.3. Formulação de resultados

Os dados associados à geometria do edifício e soluções construtivas adoptadas são introduzidos em folhas de cálculo padrão, indicadas no RCCTE. Em conjunto com os dados de referência e os pressupostos climáticos adoptados no RCCTE, realizam-se os cálculos associados às necessidades nominais de aquecimento (*Nic*) e necessidades nominais de arrefecimento (*Nvc*). A determinação das necessidades nominais de preparação de águas quentes sanitárias (*Nac*) e necessidades globais de energia primária (*Ntc*), complementam o processo de avaliação de comportamento térmico.

De acordo com o referido, o RCCTE adopta estratégias distintas para estimar as necessidades energéticas na estação de aquecimento e arrefecimento, sendo as diferenças apresentas de uma forma sintética no quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Parâmetros térmicos considerados pelo RCCTE

Estação convencional de aquecimento	**Estação convencional de arrefecimento**
Perdas térmicas associadas à envolvente opaca exterior e interior do edifício	Perdas térmicas associadas à envolvente opaca exterior do edifício
Perdas térmicas associadas aos vãos envidraçados exteriores	Perdas térmicas associadas aos vãos envidraçados exteriores
Perdas térmicas associadas à renovação do ar	Perdas térmicas associadas à renovação do ar
Ganhos solares pelos vãos envidraçados	Ganhos solares pela envolvente opaca e vãos envidraçados exteriores
Ganhos internos	Ganhos internos

2.2. Energy Plus

O Energy Plus [3] é uma ferramenta computacional de simulação do comportamento energético de edifícios, desenvolvida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (*U.S. Department of Energy*). A primeira versão do programa 1.0 foi lançada em 2001, encontrando-se actualmente na versão 6.0. A última versão do Energy Plus está disponível para uso gratuito podendo ser descarregada no website da secção Eficiência Energética e Energias Renováveis do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América [11].

O Energy Plus origina da combinação das potencialidades de dois programas desenvolvidos e utilizados no final dos anos 80 e início dos anos 90, o BLAST [12] e DOE-2 [13]. O Energy Plus representa uma evolução em relação às estruturas, potencialidades, facilidade de utilização comparativamente com os programas precedentes, devido à linguagem FORTRAN90 utilizada.

Os dois programas precedentes do Energy Plus fizeram objecto de vários estudos como por exemplo no desenvolvimento do *Building Energy Simulation Test* (BESTEST) [14] da Agência Internacional de Energia. A ferramenta Energy Plus também entrou no conjunto de testes com objectivo da avaliação do comportamento térmico de edifícios, realizados no *Building Energy Simulation Test for HVAC Models* (HVAC BESTEST) [15] da AIE e em vários artigos expostos na *Building Simulation Conference 2009* [16], [17].

O Energy Plus relaciona vários módulos de simulação que em conjunto permitem a estimativa das necessidades energéticas do edifício. O ponto central da simulação é a integração de fenómenos de balanço calorífico dos elementos constituintes edifício e seus sistemas energéticos quando expostos a diferentes meios ambientes e condições de funcionamento. A figura 2.1 apresenta a estrutura do Energy Plus e os módulos utilizados na simulação do comportamento energético edifício.

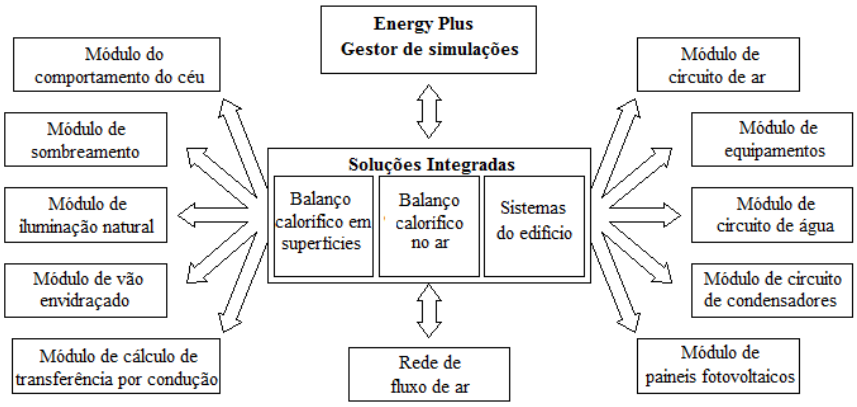


Figura 2.1 - Estrutura e módulos do Energy Plus [17]

O Energy Plus é um programa de análise energética e simulação da carga térmica em edifícios. Baseado na introdução de dados associados à geometria do edifício, soluções construtivas, sistemas mecânicos e outros, o Energy Plus estima as necessidades de aquecimento e arrefecimento para manter o edifício entre valores de temperatura definidos, o consumo de energia de equipamentos e outros parâmetros de simulação desejados para avaliar a eficácia energética do edifício.

Esta ferramenta de simulação computacional utiliza uma abordagem do tipo dinâmica no fenómeno de transferência de energia entre o edifício e o meio exterior, na qual o interior da habitação se encontra em constante interacção com o meio exterior ao longo do período de simulação. Na realização deste tipo de abordagem, o Energy Plus aplica ficheiros climáticos com a definição detalhada de parâmetros relacionados com o comportamento do meio ambiente local, nomeadamente a temperatura exterior, humidade, radiação e orientação solar, entre outros.

Na sua biblioteca de ficheiros climáticos, o Energy Plus apresenta dados para as regiões de Bragança, Coimbra, Évora, Faro, Lisboa e Porto, cidades de Portugal continental, e ainda do Funchal e Lajes, para as regiões autónomas. Os ficheiros climáticos de Lisboa e do Funchal foram sintetizados pelo INETI (actual Laboratório Nacional de Energia e Geologia) com a conjugação de dados próprios e dados recolhidos ao Instituto de Meteorologia entre 1951 e 1980, realizando a sua actualização. Os ficheiros climáticos das restantes localidades portuguesas são elaborados com base em resultados da investigação de dados climáticos internacionais para cálculos energéticos (IWEC - *International Weather for Energy Calculations*).

No cálculo das necessidades energéticas do edifício, o Energy Plus realiza o cálculo do balanço calorífico no interior das zonas térmicas definidas, com base na seguinte equação:

$$C_z \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{i=1}^{Nsi} \dot{Q}_{gi} + \sum_{i=1}^{N\sup} h_{si} A_i \left(\theta_{si} - \theta_i\right) + \sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_{\inf} C_p \left(\theta_e - \theta_i\right) + \dot{m}_{coup} C_p \left(\theta_{zones} - \theta_i\right) + Q_{sis} \quad (J) \qquad (2.3)$$

em que:

$C_z \frac{d\theta_i}{dt}$ - energia armazenada na zona (J);

$\sum_{i=1}^{Nsi} \dot{Q}_{gi}$ - somatório de cargas internas por convecção (J);

$\sum_{i=1}^{N\sup} h_{si} A_i \left(\theta_{si} - \theta_i\right)$ - transferência de calor por convecção das superfícies interiores (J);

$\sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_{\inf} C_p \left(\theta_e - \theta_i\right)$ - transferência de calor devido a infiltrações do ar exterior (J);

$\dot{m}_{coup} C_p \left(\theta_{zones} - \theta_i\right)$ - transferência de calor devido a trocas de ar entre zonas (J);

Q_{sis} - fluxo de calor associado aos sistemas instalados (J).

O algoritmo de cálculo do Energy Plus permite a realização do processamento das variáveis existentes na equação, em permanente alteração devido à mudança dos parâmetros interiores e exteriores da habitação que condicionam o comportamento térmico do edifício.

2.2.1. Interface de introdução de dados

Um dos objectivos do Energy Plus é a apresentação de uma modelação do edifício e introdução de dados graficamente acessível e de fácil utilização, possuindo um grafismo semelhante aos restantes programas aplicados nos sistemas operativos comuns no meio informático. Neste subcapítulo encontra-se detalhado o funcionamento do programa Energy Plus e os campos de introdução de dados para a definição do edifício e suas necessidades energéticas.

2.2.1.1. Funcionalidade EP-Launch

A figura 2.2 apresenta a funcionalidade "EP-Launch" presente na ferramenta Energy Plus, cuja função é a selecção de ficheiros associados à realização da simulação, como o ficheiro climático, a edição do ficheiro Energy Plus, resultados obtidos, visualização do edifício projectado, entre outros.

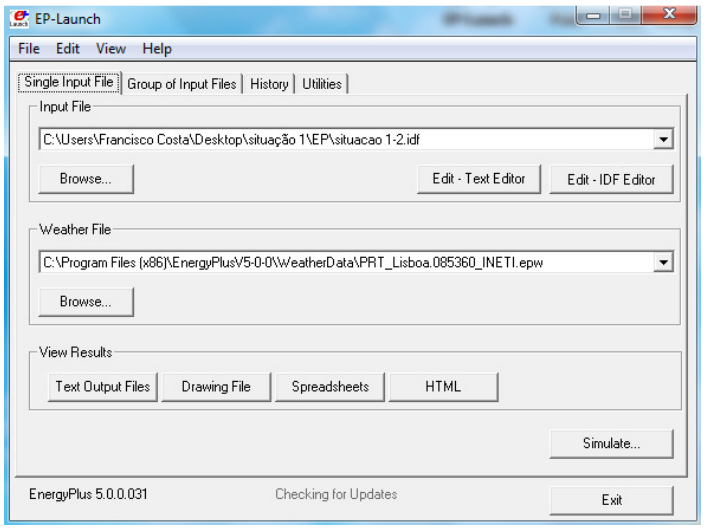


Figura 2.2 - Interface visual da funcionalidade EP-Launch

2.2.1.2. Disposição do IDF Editor

O executável principal do Energy Plus é o "IDF Editor", encontrando-se os vários parâmetros de simulação dispostos em classes de objectos. As classes subdividem-se em campos, onde são introduzidos os dados necessários para a simulação do comportamento térmico do edifício. O "IDF Editor" apresenta ainda uma breve explicação dos dados a introduzir nos respectivos campos, facilitando a compreensão geral do parâmetro.

2.2.1.3. Parâmetros de simulação

A classe referente aos parâmetros de simulação serve para introduzir os parâmetros básicos na realização da simulação, como a identificação da versão do programa (versão utilizada 5.0), os controlos da simulação, o nome do edifício, propriedades do terreno (próximo do oceano, centro urbano, subúrbios e rural) e distribuição solar, o sombreamento do edifício com o valor predefinido pelo programa de alteração significativa na posição solar de 20 em 20 dias, os algoritmos de cálculo detalhados para transferência de calor, o factor multiplicativo do volume de zonas, e o intervalo de resultados da simulação (*Timestep*). A figura 2.3 apresenta a interface do "IDF Editor" associado ao campo do edifício na classe parâmetros de simulação.

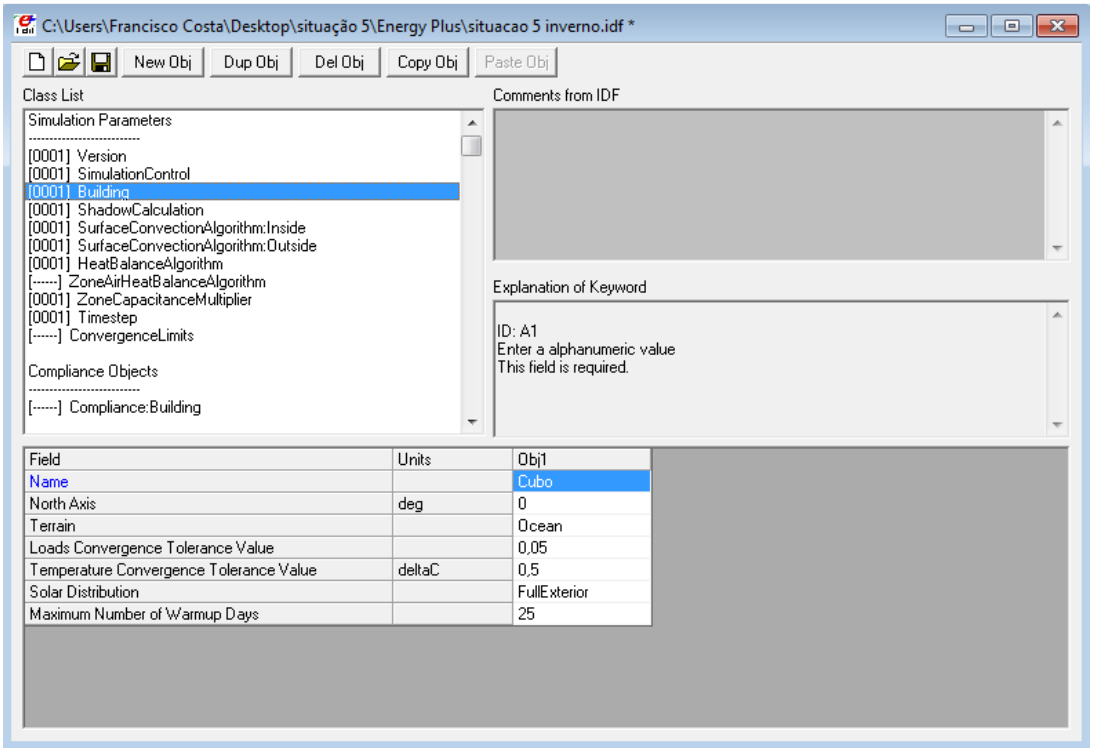


Figura 2.3 - Interface do IDF Editor relativo ao campo do edifício

2.2.1.4. Localização e clima

Na classe localização e clima encontram-se diversos parâmetros associados ao local de implantação de edifício e o seu meio exterior, sendo necessário o preenchimento dos campos relativos ao período de tempo de análise (*Run Period*) e a temperatura do solo.

A definição do período de análise segue o pressuposto adoptado no RCCTE, iniciando a estação convencional de arrefecimento a 1 de Junho e terminando a 30 de Setembro. A análise do ficheiro climático a utilizar na simulação, permite registar o valor da temperatura média diária, datando-se assim a estação convencional de aquecimento, com início no primeiro decendio em que o valor de temperatura é inferior a 15 ºC e com termo no último decendio em que a temperatura ainda se encontra inferior a 15 ºC. Este pressuposto permite a comparação directa dos parâmetros térmicos e necessidades de aquecimento entre o RCCTE e Energy Plus. A figura 2.4 apresenta a definição da estação de aquecimento e arrefecimento no campo *Run Period*, de acordo com o ficheiro climático do Energy Plus para o concelho de Lisboa.

O Energy Plus apresenta um utilitário que permite obter a temperatura do solo mensal através do ficheiro climático, sendo necessário a sua definição para o cálculo da trocas de calor com elementos construtivos do edifício em contacto com o solo.

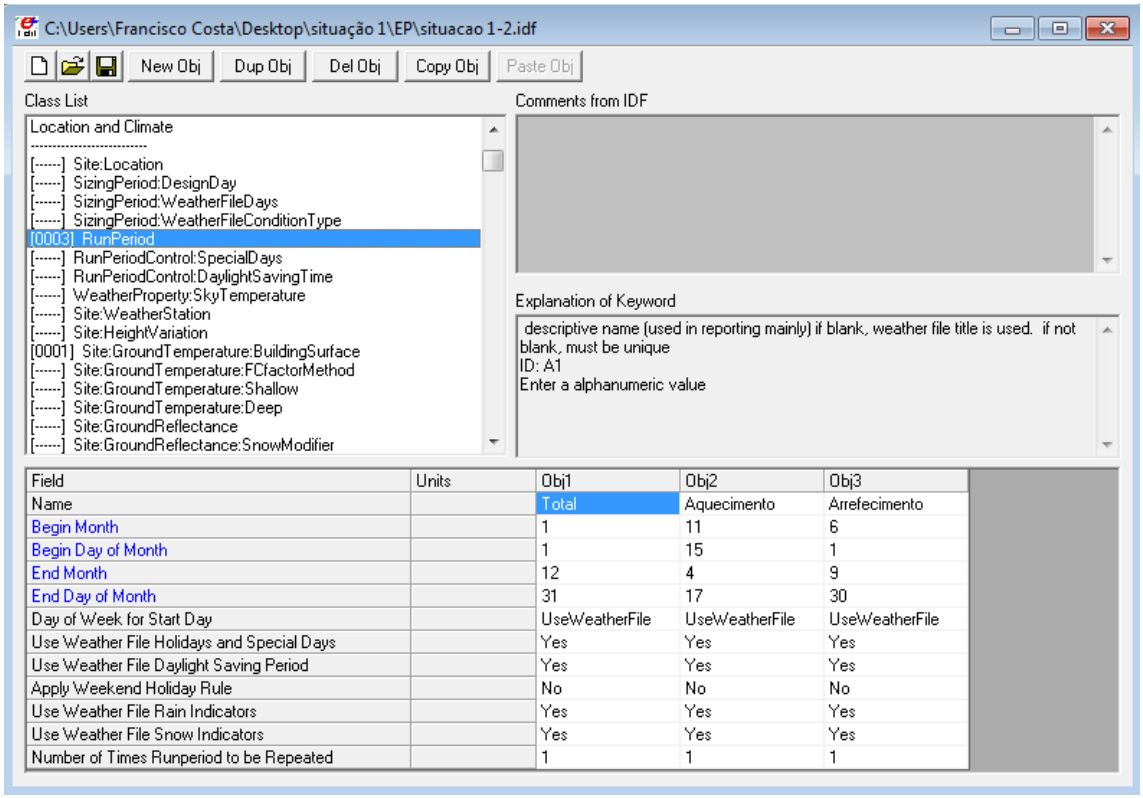


Figura 2.4 - Definição da estação convencional de arrefecimento e aquecimento para Lisboa

2.2.1.5. Horários

Uma das potencialidades das ferramentas de simulação computacional é a definição de horários de ocupação e actividades realizadas no edifício, horários para iluminação artificial, equipamentos e activação de dispositivos de oclusão nocturna, entre outros. A classe relativa aos horários (*Schedules*) apresenta elevada importância na definição dos ganhos internos do edifício, sendo abordada em detalhe no capítulo 7 da presente dissertação.

2.2.1.6. Soluções construtivas

A introdução dos materiais e soluções construtivas realiza-se na classe *Surface Construction Elements*. A definição do tipo de materiais, com a sua espessura, coeficiente de condutibilidade térmica, massa volúmica e calor específico efectua-se no campo *Material*. Nesta classe ainda é introduzida a solução associada ao vão envidraçado, nomeadamente as propriedades do vidro, espaço de ar e dispositivos de oclusão nocturna.

As soluções construtivas (*Construction*) do edifício são elaboradas com a ordenação dos materiais utilizados do exterior para o interior do edifício, como se verifica na figura 2.5.

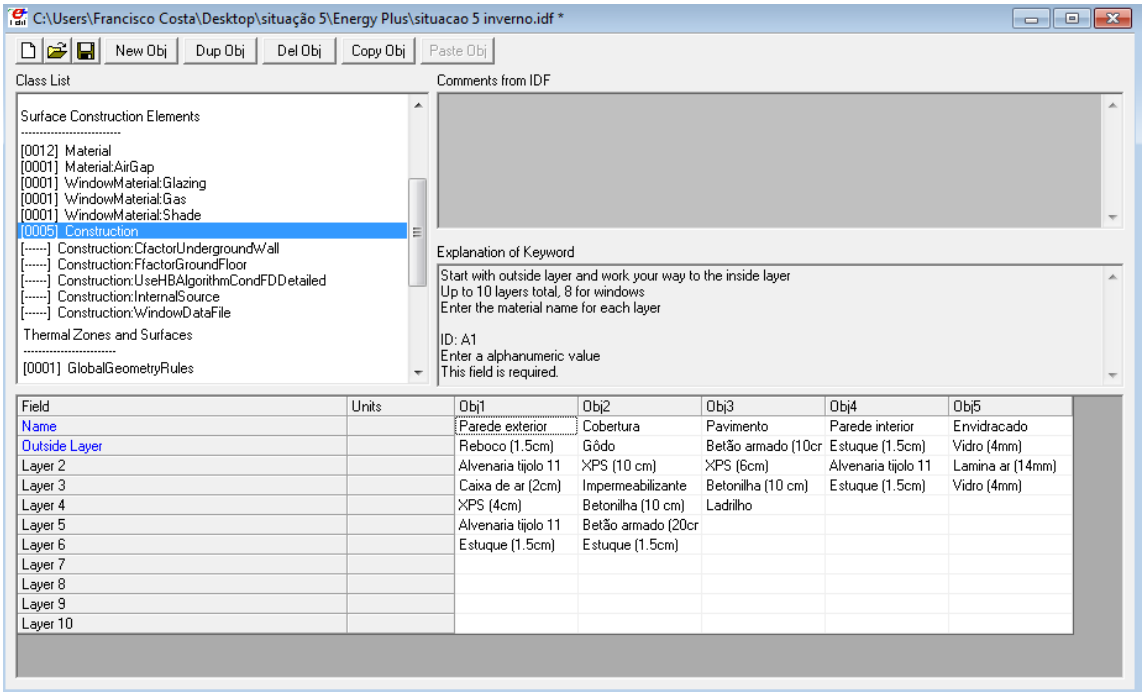


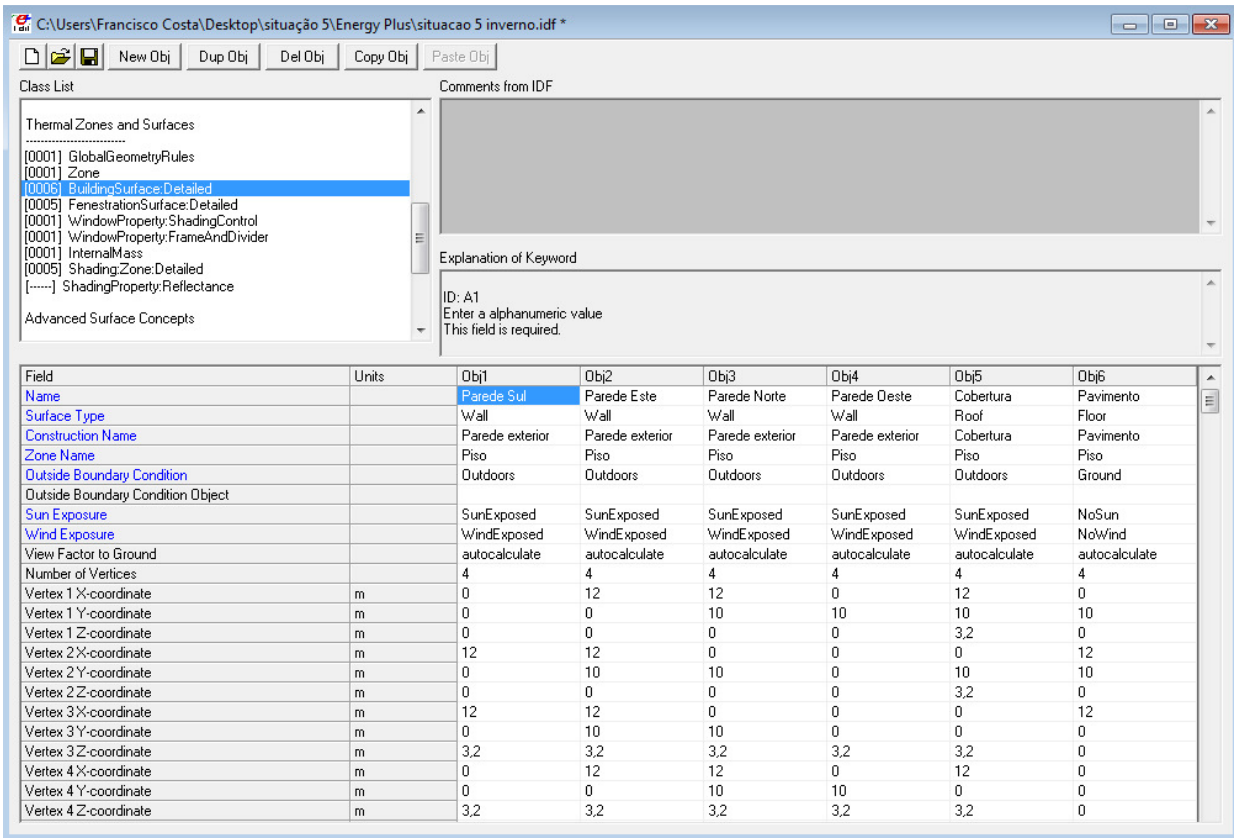
Figura 2.5 - Campo de introdução das soluções construtivas do edifício

2.2.1.7. Zonas térmicas e elementos construtivos

A definição das zonas térmicas a analisar realiza-se no campo *Zone*. Para edifício habitacionais, o conceito de zona térmica considera-se semelhante ao conceito de fracção autónoma indicado no RCCTE, sendo os espaços não aquecidos detalhados como zonas térmicas distintas (garagens ou vão de escada).

A introdução de dados relativos à geometria do edifício, como elementos construtivos, vãos envidraçados, palas de sombreamento e paredes internas, realiza-se nos campos *Building Surface*, *Fenestration Surface*, *Shading Zone* e *Internal Mass*, respectivamente. Utiliza-se um sistema de coordenadas tridimensionais para a definição da geometria do edifício e a sua orientação é escolhida de acordo com as preferências do utilizador no campo denominado *Global Geometry Rules*.

A figura 2.6 apresenta o campo *Building Surface: Detailed,* no qual são introduzidas as coordenadas dos elementos construtivos do edifício, sendo necessário definir a solução construtiva do mesmo, a envolvente (exterior, solo, adiabática ou outra zona) e a exposição à radiação solar e ao vento.



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Parede Sul	Parede Este	Parede Norte	Parede Oeste	Cobertura	Pavimento
Surface Type		Wall	Wall	Wall	Wall	Roof	Floor
Construction Name		Parede exterior	Parede exterior	Parede exterior	Parede exterior	Cobertura	Pavimento
Zone Name		Piso	Piso	Piso	Piso	Piso	Piso
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Ground
Outside Boundary Condition Object							
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	NoSun
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	NoWind
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0	12	12	0	12	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0	10	10	10	10
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	0	0	0	3,2	0
Vertex 2 X-coordinate	m	12	12	0	0	0	12
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	10	10	0	10	10
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	3,2	0
Vertex 3 X-coordinate	m	12	12	0	0	0	12
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	10	10	0	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	0
Vertex 4 X-coordinate	m	0	12	12	0	12	0
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	0	10	10	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	0

Figura 2.6 - Campo de introdução da geometria dos elementos construtivos

Os dados relativos à geometria dos vãos envidraçados e das palas de sombreamento encontram-se definidos nos campos *Fenestration Surface: Detailed* e *Shading Zone: Detailed*, respectivamente, seguindo o mesmo princípio de coordenadas cartesianas. No campo *Internal Mass*, o utilizador introduz a solução construtiva das paredes interiores e a sua área superficial, para efeitos de dimensionamento da inércia térmica.

2.2.1.8. Ganhos internos

Na classe *Internal Gains* são introduzidos os ganhos internos de cada zona associados à ocupação, iluminação artificial e equipamentos. No campo *People* é indicado o número de ocupantes, o seu horário de ocupação, actividades realizadas e a fracção de energia radiante. Os campos de iluminação e equipamentos eléctricos são semelhantes, sendo necessário introduzir o método de cálculo (nível de energia, watts por área ou watts por pessoa), o horário de utilização e a fracção de energia radiante.

2.2.1.9. Renovação do ar interior

No campo *Zone Infiltration: Design Flow Rate* são introduzidos os dados associados à renovação do ar interior de cada zona térmica devido a trocas de ar com o exterior, com a indicação do número de renovações de ar por hora. O Energy Plus apresenta um sistema de cálculo de trocas de ar entre diferentes zonas térmicas, podendo ser escolhidos outros métodos de cálculo para a ventilação do ar interior em conjunto com a adopção de um horário específico para a sua activação.

2.2.1.10. Equipamento AVAC e intervalo de temperatura no interior da habitação

Para o cálculo das necessidades energéticas do edifício é necessário definir um sistema de aquecimento e arrefecimento fictício no campo Zone *HVAC: Ideal Loads Air System*, complementado na classe *Zone HVAC Equipment Connections*, com a definição das conexões do equipamento na zona.

Na definição das temperaturas de conforto no interior da habitação recorre-se a um termóstato, no campo *Thermostat Setpoint: Dual Setpoint*. Os valores de temperatura de referência são 20 ºC e 25 ºC para a estação de aquecimento e arrefecimento, respectivamente, permitindo a directa comparação com os resultados obtidos no RCCTE.

É de referir ainda que o Energy Plus apresenta diversas potencialidades na introdução de parâmetros associados a sistemas instalados nos edifícios, como rede de águas, bombas de elevação, geradores eléctricos, painéis fotovoltaicos e diversos métodos de arrefecimento e aquecimento, servindo como ferramenta para avaliação da eficiência energética dos sistemas mencionados.

2.2.2. Interface de resultados obtidos após simulação

A escolha das variáveis de resultados desejadas realiza-se no campo *Output:Variable*, sendo necessário a introdução precedente de relatório de variáveis avançadas no campo *Output: Diagnostics*. O manual de utilização *Input Output Reference* [19] apresenta a definição e significado das diversas variáveis de resultados obtidos na simulação recorrendo ao Energy Plus.

As principais variáveis necessárias para a análise do comportamento térmico do edifício encontram-se indicadas no quadro 2.4, definidas em função dos resultados desejados e comparação com o RCCTE.

Quadro 2.4 - Variáveis de resultados utilizadas no Energy Plus

Nome da variável	**Resultado**
Outdoor Dry Bulb	Temperatura de bolbo seco exterior
Zone Mean Air Temperature	Temperatura média do ar no interior da zona
Zone Opaque Surface Inside Face Conduction Gain Energy	Ganhos térmicos referentes à condução de calor pela envolvente opaca
Zone Opaque Surface Inside Face Conduction Loss Energy	Perdas térmicas referentes à condução de calor pela envolvente opaca
Zone Infiltration Sensible Heat Loss	Perdas térmicas associados à renovação de ar
Zone Infiltration Sensible Heat Gain	Ganhos térmicos associados à renovação de ar
Zone People Total Heat Gain	Ganhos internos associados à ocupação
Zone Lights Total Heat Gain	Ganhos internos associados à iluminação
Zone Electric Equipment Total Heat Gain	Ganhos internos associados ao equipamento
Zone Window Heat Gain	Ganhos térmicos associados aos vãos envidraçados
Zone Window Heat Loss	Perdas térmicas associados aos vãos envidraçados
Zone Transmitted Solar	Ganhos solares pelos vãos envidraçados
Ideal Loads Air Heating Energy	Necessidades nominais de aquecimento
Ideal Loads Air Total Cooling Energy	Necessidades nominais de arrefecimento

Após a realização da simulação, o Energy Plus fornece os resultados em folhas de cálculo, sendo necessário o seu processamento e tratamento na conversão de unidades comparáveis com o RCCTE.

2.3. TRNSYS

O TRNSYS (*TRaNsient SYstem Simulation program*) [4] é uma ferramenta computacional de simulação energética de sistemas transitórios, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin-Madison, dos Estados Unidos da América (*Solar Energy Laboratory SEL, Univ. of Wisconsin-Madison* [20]), parcialmente patrocinado pelo governo dos Estados Unidos da América. Actualmente encontram-se empresas de engenharia especializadas na análise do comportamento térmico de edifícios, como a TRANSSOLAR Energietechnik GmbH [21] e a TESS - *Thermal Energy Systems Specialists* [22] em parceria com a Universidade de Wisconsin-Madison no desenvolvimento do TRNSYS.

A versão mais recente do TRNSYS é a 17, lançada em Julho de 2010. O Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa possui a licença de utilizador do TRNSYS 16.01.0003 de Março de 2007. A utilização do TRNSYS necessita da aquisição da respectiva licença, adquirida a distribuidores mundiais.

O TRNSYS trata-se duma ferramenta computacional conceituada que beneficiou de melhorias significativas ao longo dos anos de existência em virtude da contribuição de inúmeros especialistas. A avaliação realizada pelo TRNSYS do comportamento térmico de edifícios foi estudada no *Building Energy Simulation Test* (BESTEST e HVAC BESTEST) [14], [15] da Agência Internacional de Energia. O TRNSYS é patrocinador da conferência *Building Simulation Conference*, com vários artigos publicados na realização de análises recorrendo à ferramenta [16], [17], [23], [24].

O TRNSYS é um programa de simulação de sistemas transitórios com uma estrutura modular e flexível, sendo a sua utilização adequada para a análise de sistemas em regime transitório. A versatilidade do programa TRNSYS permite a simulação de um edifício e de vários sistemas associados, como a distribuição de água quente, sistemas aquecimento, ventilação e ar condicionado, sistemas de recolha de energia solar e outras aplicações. A elaboração de um sistema consiste na definição dos seus modelos de componentes (*Types*) e a interligação dos seus dados (*Connections*), possuindo cada componente um conjunto pré-definido de dados de entrada e saída.

O software TRNSYS consiste em três programas: o TRNSYS Simulation Studio para criação dos sistemas desejados com os seus respectivos componentes e ligações, o TRNBuild para a introdução de dados específicos para os edifícios e o TRNEdit que permite a modificação e criação de componentes.

Tratando-se de um programa de simulação de sistemas transitórios, o TRNSYS realiza uma simulação dinâmica do sistema com o meio exterior, através de ficheiros climáticos fornecidos pelo programa Meteonorm v.5, publicado pela empresa METEOTEST [25]. A base de dados do TRNSYS

engloba ficheiros climáticos de 237 localidades dos Estados Unidos da América e mais de 1000 localidades em 150 países, das quais 16 referentes a Portugal, nomeadamente Angra do Heroísmo, Bragança, Castelo Branco, Coimbra, Corvo, Évora, Faro, Funchal, Lisboa, Penhas Douradas, Ponta Delgada, Porto e Porto Santo.

No componente relativo ao edifício multizona (*Type 56*), para caracterização do seu comportamento energético, o TRNSYS realiza o cálculo do balanço calorífico no interior das zonas térmicas, com base no seguinte modelo matemático:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{\inf,i} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,i} + \dot{Q}_{cp\lg,i} \qquad \text{(kJ)} \tag{2.4}$$

em que:

$\dot{Q}_i$ - energia armazenada na zona (kJ);

$\dot{Q}_{surf,i}$ - transferência de calor por convecção de todas as superfícies interiores (kJ);

$\dot{Q}_{\inf,i}$ - transferência de calor devido a infiltrações de ar exterior (kJ);

$\dot{Q}_{vent}$ - transferência de calor devido a ventilação provocadas de equipamento (kJ);

$\dot{Q}_{g,i}$ - ganhos internos por convecção (kJ);

$\dot{Q}_{cp\lg,i}$ - transferência de calor devido a trocas de calor com outras zonas ou fronteiras (kJ).

Substituindo os parâmetros indicados na equação (2.4) por cálculos expeditos obtém-se a equação:

$$\dot{Q}_i = h_{si} A_i \left(\theta_{si} - \theta_i\right) + \dot{m}_{\inf} C_p \left(\theta_e - \theta_i\right) + \dot{m}_{vent} C_p \left(\theta_e - \theta_i\right) + \dot{Q}_{g,i} + \dot{m}_{coup} C_p \left(\theta_{zones} - \theta_i\right) \tag{2.5}$$

A figura 2.7 apresenta a esquematização do processo do balanço calorífico no interior de uma zona térmica, com as variáveis indicadas na equação anterior.

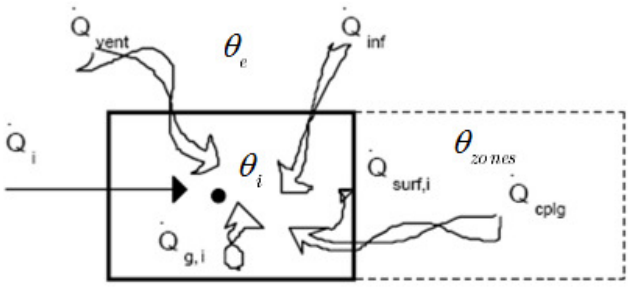


Figura 2.7 - Balanço calorífico no interior da zona referente ao TRNSYS [26]

2.3.1. Simulation Studio

O principal programa do TRNSYS é o Simulation Studio, no qual são realizados os projectos dos sistemas em análise. A figura 2.8 apresenta a interface do programa, onde se escolhe os componentes da respectiva biblioteca (representada no campo direito), a interligação entre os vários componentes e a escolha dos parâmetros de simulação.

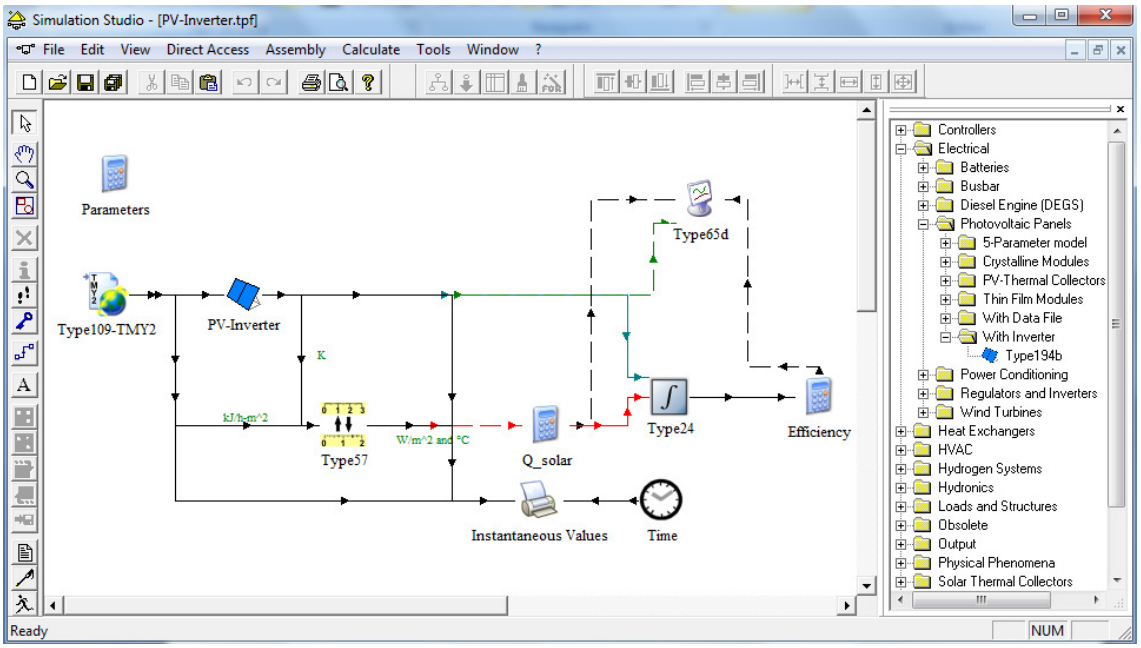


Figura 2.8 - Sistema de painéis fotovoltaicos na interface do Simulation Studio

O TRNSYS apresenta uma biblioteca pré-definida de componentes, denominados *Types*, para a elaboração de diversos projectos, divididos em 12 classificações: controladores, eléctricos, permutadores de calor, AVAC, sistemas de hidrogénio, hidráulica (bombas elevatórias e condutas), estruturas e cargas (edifícios, janelas e sombreamento), obsoletos (componentes de versões anteriores fora de uso), componentes de saída (impressora e histogramas), fenómenos físicos, colectores solares, armazenamento térmico, utilitários (conversão de unidades, funções de cálculo) e ficheiros climáticos.

A abertura dos componentes com um duplo clique permite consultar os parâmetros associados a cada componente e suas informações de unidades e valores máximos. Cada um dos componentes apresenta dados de entrada e saída de dados, *input* e *output*, respectivamente.

Os vários componentes são ligados através de *connections*, nos quais os dados de saída de um componente se tornam os dados de entrada de outro, como indicado na figura 2.9. A associação correcta dos dados dos componentes de um sistema é fundamental para uma adequada simulação.

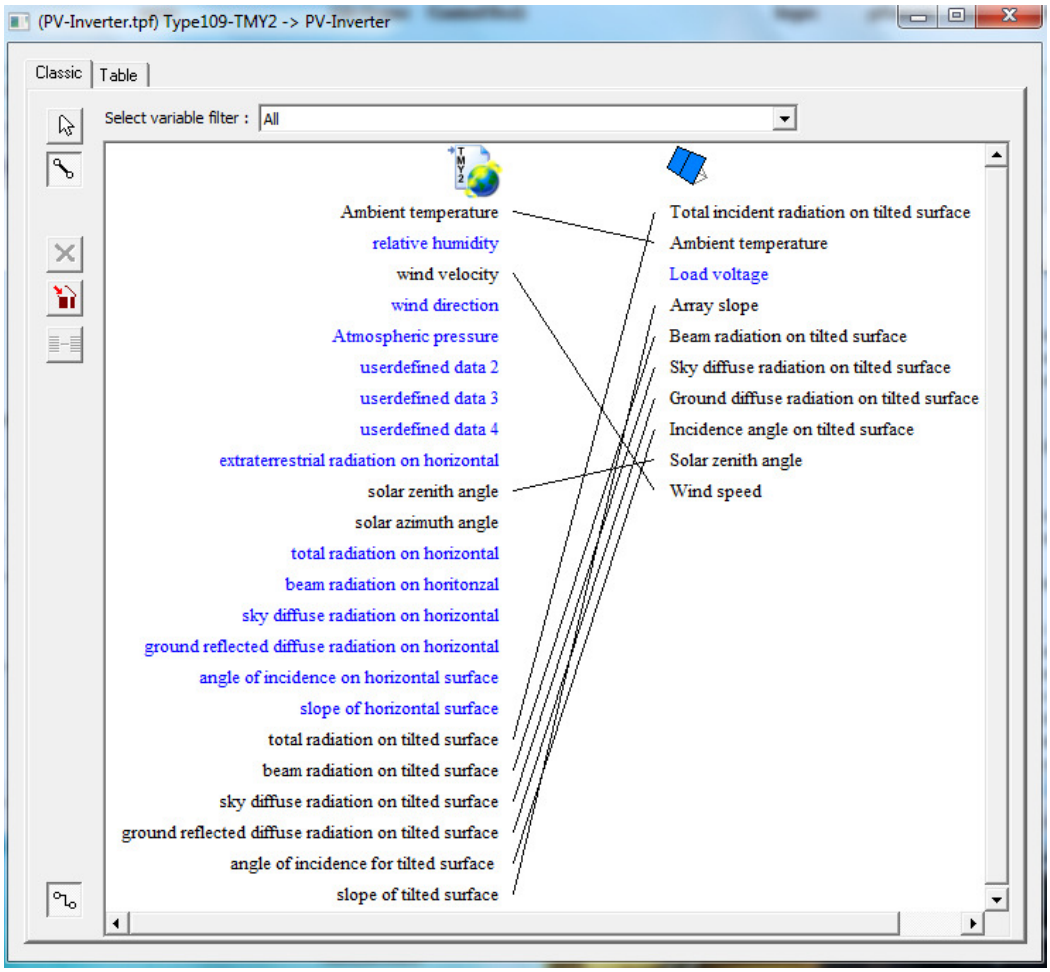


Figura 2.9 - Ligações entre os componentes de ficheiro climático e painel fotovoltaico

2.3.1.1. Elaboração de um sistema associado ao componente de um edifício

Para a avaliação do comportamento térmico de edifícios, o TRNSYS apresenta um assistente virtual constituído por 10 procedimentos na criação de um sistema de um edifício multizona. Em seguida apresenta-se os procedimentos na elaboração dum sistema simples:

1) Criação dum novo projecto com base num sistema de um edifício (*Building Project Multizone*);
2) Criação de zonas térmicas do edifício numa grelha de referência em que cada quadrado negro representa uma zona. Este método permite a definição automática das envolventes de cada zona;
3) Definição da geometria simplificada de cada zona, nomeadamente as dimensões de comprimento, largura e altura, de acordo com a figura 2.10;
4) Definição da orientação do edifício em relação ao eixo norte, percentagem de vãos envidraçados em cada fachada e escolha do ficheiro climático a utilizar na simulação;

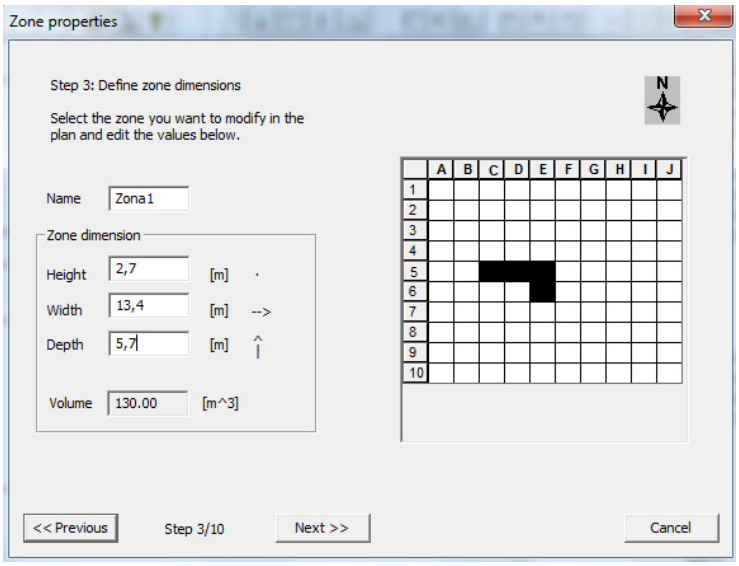


Figura 2.10 - Procedimento de definição da geometria das zonas térmicas

5) Definição de parâmetros de infiltração (valor de renovações por hora) e ventilação, como o tipo (natural ou mecânico) e valores associados de trocas caloríficas;

6) Introdução das características de aquecimento e de arrefecimento, com a definição de valores de temperatura desejadas no interior do edifício;

7) Procedimento associado aos ganhos internos no interior do edifício relativos à ocupação e iluminação;

8) Definição da geometria das palas de sombreamento horizontais e verticais em cada fachada do edifício, de acordo com a figura 2.11;

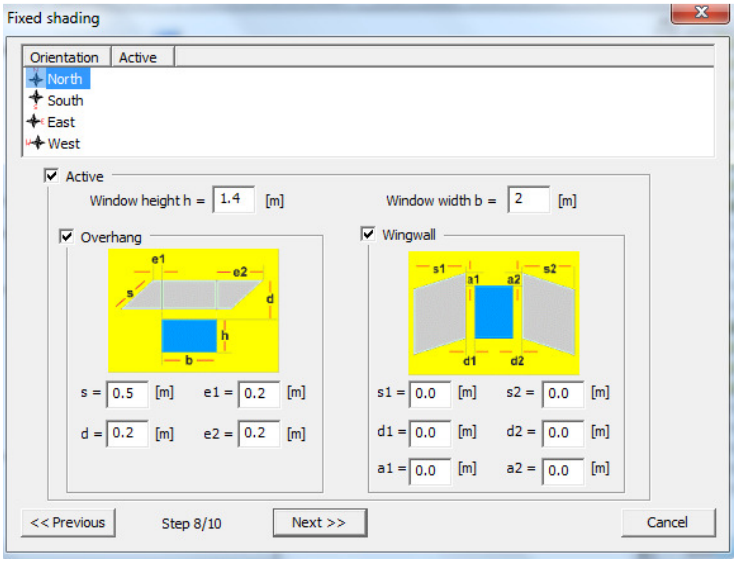


Figura 2.11 - Procedimento relativo à definição de palas de sombreamento

9) Definição da activação de sombreamentos móveis em cada uma das fachadas do edifício;

10) Resumo e criação do sistema, semelhante ao apresentado na figura 2.12.

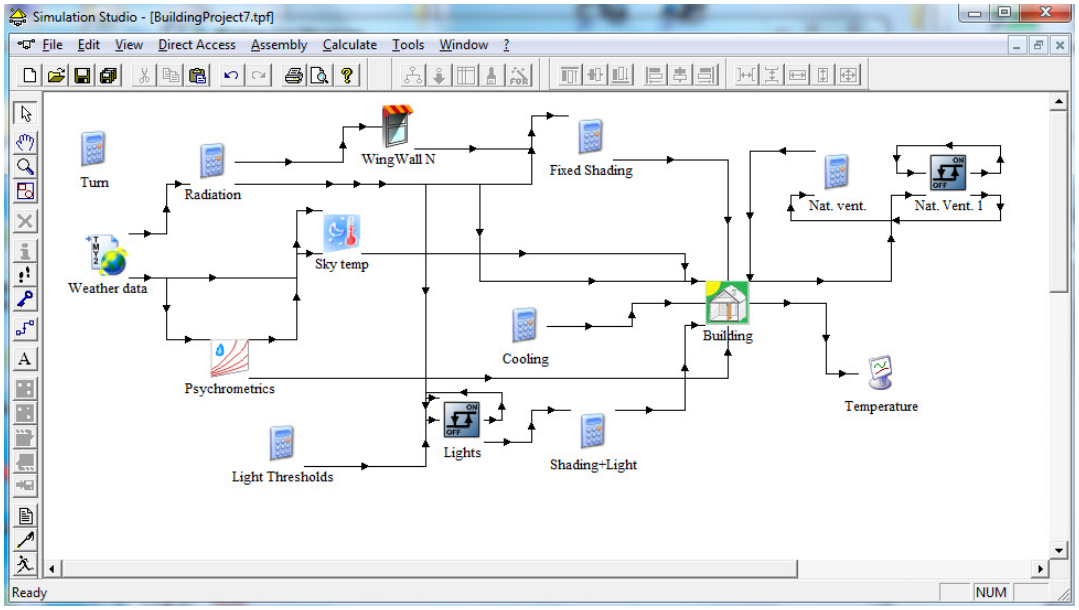


Figura 2.12 - Sistema TRNSYS de um edifício multizona

A alteração dos parâmetros do componente do edifício é realizada recorrendo ao programa TRNBuild. Na execução do assistente, recomenda-se a manter em branco os procedimentos n.º 6 e n.º 7, pois a sua definição realiza-se detalhadamente no programa referido. O utilizador tem a possibilidade de alterar ou adicionar os componentes do sistema e verificar as suas ligações e respectivos dados de entrada e saída.

Os principais componentes utilizados num sistema TRNSYS de simulação do comportamento energético de um edifício encontram-se enumerados no quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Componentes do sistema de simulação do comportamento energético do edifício

Componente	**Designação**	**Função**
Type 109	*Weather Data*	Associação a ficheiro climático
Type 69	*Sky Temperature*	Determinação da temperatura efectiva do céu, permitindo o cálculo da radiação de onda longa
Type 33	*Psychometrics*	Determinação de parâmetros relativos temperatura e humidade
Type 56	*Multi-zone Building*	Modelação do comportamento térmico do edifício
Type 34	*Overhang and Wingwall Shading*	Determinação da radiação solar incidente sobre o vão envidraçado sombreado pela pala
Type 2	*Differential Controller*	Controlador de equipamentos (*on/off*) como ventilação, iluminação artificial, entre outros.
	Equation	Permite realização de cálculos entre diversos componentes
Type 65	*Online Plotter*	Impressão de resultados de forma gráfica
Type 25	*Printer*	Impressão de resultados numéricos

2.3.2. TRNBuild

O programa TRNBuild, foi desenvolvido pela TRANSSOLAR Energiechnik GmbH, permitindo a introdução detalhada dos parâmetros associados ao componente do edifício criado no sistema. O programa apresenta uma interface própria distinta do Simulation Studio e o componente do edifício (*Type* 56) pode ser editado abrindo o ficheiro .bui criado ou directamente a partir do sistema.

A figura 2.13 exemplifica a interface do TRNBuild, composta pela barra de ferramentas de acesso rápido e três janelas. A primeira refere-se à designação do projecto e definição de dados de entrada e saída do componente, a segunda referente às zonas térmicas do projecto e a última apresenta a definição parâmetros da zona térmica, nomeadamente as soluções construtivas e dados do regime.

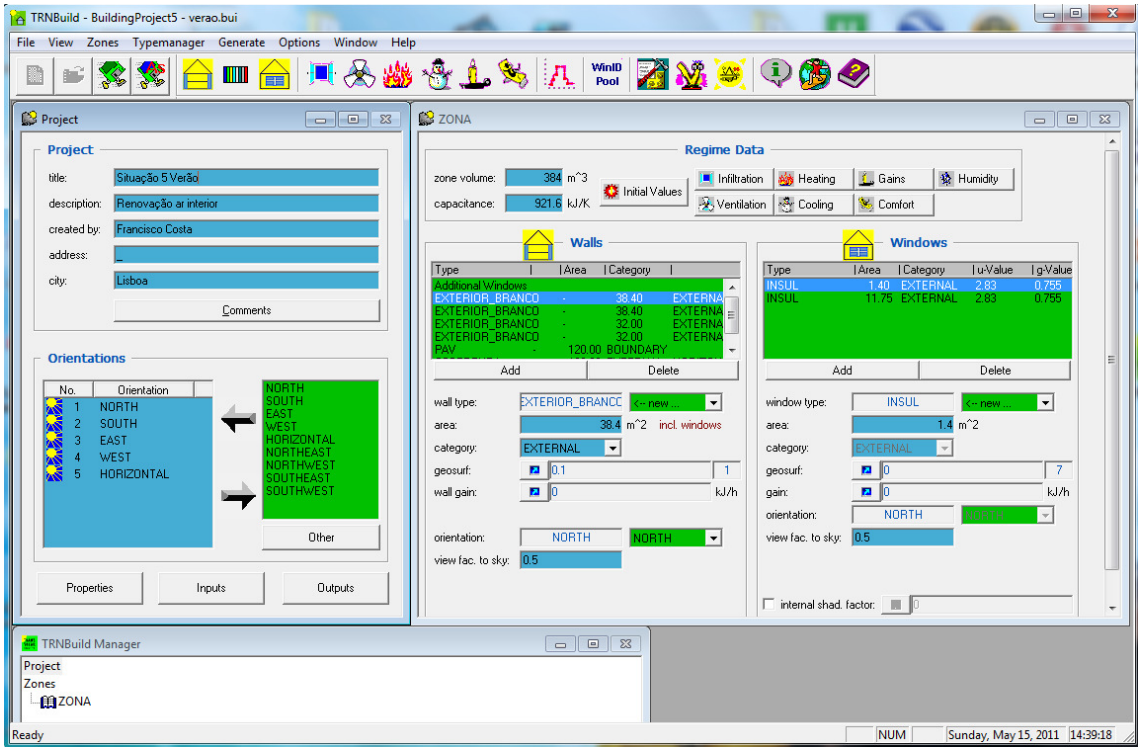


Figura 2.13 - Interface do programa TRNBuild

2.3.2.1. Definição de elementos construtivos

Após a conclusão do assistente de criação de um sistema de análise do comportamento térmico do edifício, realizado no Simulation Studio, a geometria do edifício e seus elementos construtivos ficam definidos. Verifica-se os dados introduzidos recorrendo ao TRNBuild, nomeadamente o tipo de

envolvente (*category*), a orientação e o *view factor to sky*, correspondendo aos valores 0, 0,5 ou 1 caso se trate de pavimentos, paredes verticais ou cobertura, respectivamente.

Para cada elemento construtivo define-se a solução construtiva e o tipo de envidraçado, com a escolha de soluções da biblioteca do TRNBuild ou com a criação de novas soluções.

2.3.2.2. Elaboração de soluções construtivas

Apesar do TRNBuild apresentar uma biblioteca de vários materiais utilizados em construção civil, para maior precisão de análise para efeitos de comparação com o RCCTE, são criados elementos com as características típicas de materiais, como o coeficiente de condutibilidade térmica, calor específico e massa volúmica. Após definição dos materiais a utilizar, realiza-se a conjugação dos mesmos para a elaboração das soluções construtivas, com a indicação da sua espessura, como analisado na figura 2.14.

A solução construtiva fica completa com a definição do coeficiente de absorção solar, relacionado com a rugosidade e tonalidade do revestimento das paredes. De acordo com o manual de utilização *TRNSYS 16: Volume 6 Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild* [26], nas superfícies de tonalidade branca o coeficiente de absorção solar toma o valor de 0,3. Os coeficientes de transferência de calor da parede encontram-se pré-definidos pelo TRNBuild.

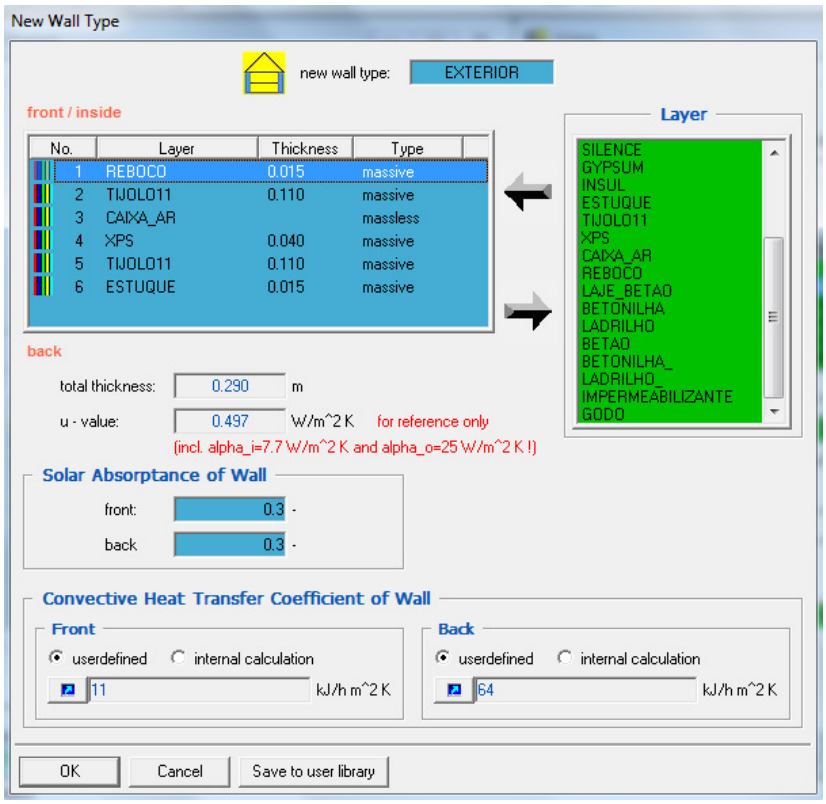


Figura 2.14 - Definição de um novo tipo de solução construtiva

2.3.2.3. Condições no interior do edifício

O TRNBuild permite uma fácil introdução de dados relativos às condições no interior do edifício e equipamentos utilizados, nomeadamente:

- Definição das perdas de calor devido a infiltrações nos vãos envidraçados;
- Definição da taxa de renovação do ar interior através de trocas com o exterior;
- Definição da temperatura interior em que se inicia o processo de aquecimento;
- Definição da temperatura interior em que se inicia o processo de arrefecimento;
- Definição dos ganhos internos associados a pessoas, computadores, iluminação artificial ou outros, e horários de ocupação ou utilização;
- Definição do conforto no interior baseado na indumentária dos ocupantes;
- Definição de modelos de variação de humidade no interior do edifício.

2.3.3. Recolha de resultados

A definição dos períodos de simulação realiza-se no campo *Assembly* > *Control Cards* do Simulation Studio. Para comparação directa de resultados obtidos com o RCCTE, define-se no TRNSYS a duração da estação de aquecimento e arrefecimento com o mesmo pressuposto do RCCTE. De acordo com o ficheiro climático aplicado no TRNSYS, no concelho de Lisboa o período de aquecimento inicia a 24 de Novembro e termina 5 de Abril. O período de arrefecimento refere-se aos quatro meses de verão, Junho, Julho, Agosto e Setembro. A introdução do período de simulação realiza-se com o número de horas anuais (total de 8760 horas), ou seja, a simulação referente ao período de aquecimento apresenta os intervalos de [7848,8760] e [0,2256] e a simulação referente ao período de arrefecimento apresenta o intervalo de [3624,6552].

O TRNSYS apresenta dois métodos distintos de obtenção de resultados. Um dos métodos consiste na saída de resultados pré-definidos para a avaliação do comportamento térmico de edifícios, no formato de dois ficheiros de texto. O primeiro ficheiro apresenta o resumo de trocas energéticas mensais associadas a infiltração, ventilação, radiação solar, ganhos internos e valores de necessidades de aquecimento e arrefecimento para o período de simulação. O segundo ficheiro apresenta os resultados do balanço energético total para os elementos construtivos de cada zona térmica durante o período de simulação, indicado na equação (2.13).

$$Balance = DQ_{air}dt + Q_{heat} - Q_{cool} + Q_{\inf} + Q_{vent} + Q_{coup} + Q_{trans} + Q_{G\,\mathrm{int}} + Q_{w} + Q_{sol} \quad \text{(kJ)} \qquad (2.13)$$

em que:

$Balance$ - balanço energético da zona, devendo apresentar um valor nulo (kJ);

$DQ_{air}dt$ - mudanças na energia interna da zona (kJ);

Q_{heat} - necessidades energéticas para aquecimento (kJ);

Q_{cool} - necessidades energéticas para arrefecimento (kJ);

$Q_{\inf}$ - trocas de calor devido a infiltrações (kJ);

Q_{vent} - trocas de calor devido a ventilação (kJ);

Q_{coup} - trocas de calor com outras zonas térmicas (kJ);

Q_{trans} - fluxo de calor da superfície interior dos elementos construtivos para o interior (kJ);

$Q_{G\,\mathrm{int}}$ - ganhos internos (kJ);

Q_{w} - ganhos das paredes (kJ);

Q_{sol} - absorção de ganhos solares nas superfícies interiores dos elementos construtivos (kJ).

Encontra-se ainda pré-definido a apresentação de um histograma com a variação da temperatura interior e exterior ao longo do período de simulação e necessidades energéticas associadas ao edifício.

O segundo método consiste na definição dos resultados de acordo com as preferências do utilizador. No TRNBuild, o utilizador define as variáveis de resultados desejadas, agrupadas em resultados de zonas térmicas, conjuntos de zonas térmicas, superfícies e balanços, exemplificado na figura 2.15. Com recurso ao campo *Assembly* > *Output Manager* no Simulation Studio, define-se as conexões entre o componente do edifício (*Type* 56) e o componente à impressão de resultados (*Type* 25). Estes resultados são obtidos em função do tempo de simulação, dispostos em folhas de cálculo.

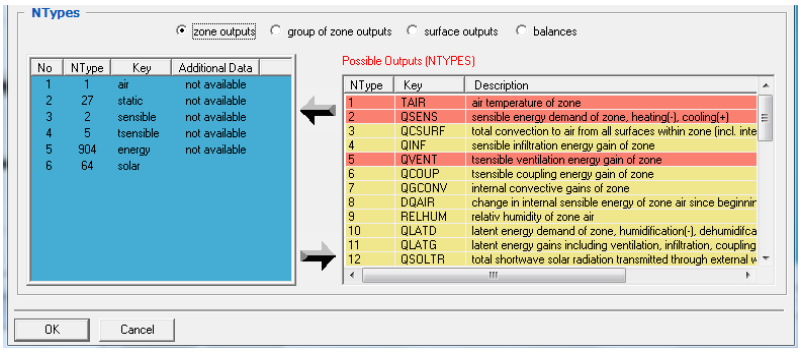


Figura 2.15 - Definição dos dados de saída no TRNBuild

A combinação dos dois métodos mencionados permite ao utilizador a obtenção dos resultados desejados para análise do comportamento térmico do edifício e adequada comparação com a regulamentação térmica portuguesa.

2.4. Comparação entre ferramentas

Na presente subsecção apresenta-se a comparação dos principais parâmetros associados a cada uma das ferramentas na avaliação do comportamento térmico de edifícios. O quadro 2.6 indica as principais diferenças associadas às três ferramentas utilizadas no desenvolvimento do trabalho, RCCTE, Energy Plus e TRNSYS.

Quadro 2.6 - Síntese das diferenças associadas às ferramentas

Elementos	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Documentação de apoio	Sim	Sim	Sim
Custos com licença de utilização	Não	Não	Sim
Análise em regime dinâmico	Não	Sim	Sim
Duração da análise	Estações	Anual	Anual
Geometrias complexas	Sim	Sim	Não
Análise específica de pontes térmicas	Sim	Não	Não
Representação visual do edifício	Não	Sim	Não
Representação gráfica de resultados	Não	Não	Sim
Calendarização de processos	Não	Sim	Sim
Possibilidade de optimização do comportamento de edifícios	Baixa	Elevada	Média
Orientado à investigação do comportamento de edifícios	Não	Sim	Sim
Infiltração e ventilação natural	Sim	Sim	Sim
Fluxo de ar entre zonas	Não	Sim	Sim
Configuração de sistemas AVAC	Não	Sim	Sim
Sistemas de energias renováveis	Não	Sim	Sim

Relativamente à documentação de apoio, o RCCTE apresenta os pressupostos adoptados, metodologia de cálculo e fornece elementos necessários para a determinação dos parâmetros térmicos necessários na avaliação do comportamento térmico de edifícios. Ambas as ferramentas computacionais, Energy Plus e TRNSYS, apresentam documentos de apoio associados ao seu funcionamento e introdução de dados [19], [26] e algoritmos de cálculo aplicados na determinação do desempenho térmico de edifícios [18], [26].

Das três ferramentas utilizadas no presente trabalho, apenas o TRNSYS necessita da aquisição da licença de utilização, enquanto o RCCTE e o Energy Plus são de livre utilização.

Como referido anteriormente, a principal diferença associada à regulamentação nacional e às ferramentas computacionais de avaliação do comportamento térmico de habitações é a abordagem de análise aplicada, apresentando o RCCTE uma análise em regime quase estacionário e o Energy Plus e TRNSYS uma análise em regime dinâmico. A análise em regime quase estacionário realizada pelo RCCTE corresponde à definição de valores de referência constantes para a temperatura interior da habitação nos períodos de análise e parâmetros climáticos fixos dependente do zonamento climático do edifício, nomeadamente graus-dias de aquecimento, temperatura média exterior na estação de arrefecimento e radiação solar incidente. A análise em regime dinâmico utilizada pelo Energy Plus e TRNSYS consiste na contínua interacção entre o meio interior da habitação e o meio exterior, através de fluxos de calor ocorridos entre ambos os meios com condições distintas. O meio exterior é definido em função de ficheiros climáticos que apresentam valores de temperatura exterior, humidade relativa, velocidade do vento, intensidade de radiação solar, entre outros, e influenciam a transferência de calor e balanço energético dos elementos construtivos da habitação, proporcionando um meio cuidado na definição dos fluxos de calor horários.

Como referido no presente capítulo, o RCCTE apresenta um distinção clara entre estação de aquecimento e arrefecimento, com diferentes pressupostos e metodologia de cálculo na determinação do comportamento térmico da habitação. As ferramentas computacionais Energy Plus e TRNSYS realizam a análise do comportamento térmico da habitação num período anual, sendo possível a criação de períodos de análise para comparação com o RCCTE.

O RCCTE permite a análise de edifícios com geometria complexa, sendo necessária a definição da área e tipo de envolvente associada a cada elemento construtivo no cálculo das necessidades energéticas. A metodologia de introdução da estrutura do edifício através de um referencial cartesiano aplicada no Energy Plus permite a elaboração estruturas complexas e a combinação de adequadas condições de fronteiras entre cada envolvente. A ferramenta computacional TRNSYS apenas permite a introdução de estruturas simples de edifícios, como verificado na figura 2.10, sendo possível posterior alteração da área dos elementos construtivos tendo em vista compensar a geometria complexa.

O RCCTE apresenta uma metodologia específica na determinação das perdas energéticas associadas a pontes térmicas lineares correspondentes às situações correntes na construção em Portugal. As ferramentas de simulação computacional Energy Plus e TRNSYS não apresentam metodologia específica na determinação das perdas energéticas associadas a pontes térmicas lineares, pois cada país apresenta a sua metodologia distinta dificultando a criação de uma referência a nível global na

elaboração de um algoritmo de cálculo para a sua determinação. Este aparente inconveniente pode ser ultrapassado recorrendo a artifícios de alteração das características das soluções construtivas para contabilizar o efeito das pontes térmicas no desempenho térmico da habitação.

O RCCTE apresenta uma metodologia normalizada e simplificada para a avaliação do comportamento térmico de edifícios e a determinação dos parâmetros térmicos realizam-se recorrendo a folhas de cálculo. Assim, a metodologia do RCCTE não envolve as potencialidades computacionais na sua determinação, impossibilitando recolha directa de resultados gráficos, visualização da edifício em análise e a calendarização de processos associados à renovação de ar e ganhos internos. O processo de optimização realiza-se com a alteração de pequeno número de variáveis que directamente influenciam o cálculo das perdas e ganhos térmicos, resultando em poucas possibilidades de escolha e fortemente dependentes de soluções construtivas adoptadas. Essas limitações, contudo, não são influentes tendo em conta o objectivo principal do RCCTE.

Associado às ferramentas computacionais, o Energy Plus possibilita a recolha da representação visual da estruturação do edifício, funcionalidade que o TRNSYS apenas apresenta perante a aquisição de um complemento. O TRNSYS apresenta no final da simulação resultados gráficos associados à simulação realizada, complementando os resultados recolhidos em folhas de cálculo e ficheiros de texto.

Ambas as ferramentas computacionais permitem a definição de calendarização associada à ocupação da habitação, actividades realizadas, dispositivos activados, processo de renovação do ar interior, entre outros. No entanto, o Energy Plus apresenta maior detalhe na definição e calendarização dos processos mencionados, permitindo assim um maior número parâmetros no quais é possível realizar o processo de optimização visando o desempenho térmico da habitação, quando comparado com o TRNSYS. A diferença referida verifica-se também nos processos de activação dos dispositivos de protecção móvel dos vãos envidraçados e definição de palas de sombreamento, elementos fracamente definidos pelo TRNSYS.

Com base nos parâmetros abordados, as ferramentas computacionais como o Energy Plus e TRNSYS apresentam melhores características para corresponderem a instrumentos na investigação do comportamento térmico de edifícios e optimização de processos visando a diminuição dos consumos energéticos.

Relativamente à comparação de sistemas existentes no edifícios possibilitados pelas três ferramentas, verifica-se que no RCCTE, Energy Plus e TRNSYS, a infiltração pelos vãos envidraçados e ventilação natural podem ser contabilizados no comportamento térmico dos edifícios. Por outro lado, a interacção entre zonas térmicas distintas e fluxo de ar entre as mesmas apenas pode ser estudado com recurso ao Energy Plus e TRNSYS. Ambas as ferramentas de simulação computacional permitem a

configuração dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado para definir as condições no interior da habitação e activação do seu funcionamento de acordo com modelos de optimização de necessidades energéticas. O TRNSYS é a ferramenta mais completa na análise de sistemas energéticos, apresentando vários módulos para definição dos sistemas de energias renováveis, painéis fotovoltaicos, sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento pelo pavimento e cobertura, entre outros.

Na óptica do utilizador, o Energy Plus e o TRANSYS são ferramentas de fácil utilização e manuseamento para um indivíduo com conhecimento razoável de computação. O Energy Plus apresenta uma maior facilidade de introdução de dados específicos na análise do comportamento térmico de edifícios e fortemente exemplificada no manual do utilizador [19]. Os programas constituintes do TRNSYS, o Simulation Studio e o TRNBuild apresentam uma interface visual agradável, com a vantagem de possuir o assistente de criação do sistema de análise de um edifício multizona, permitindo assim uma fácil análise de um edifício simples. No entanto, ao realizar uma análise com maior detalhe, a definição especifica e compreensão da associação entre componentes do sistema (*connections*) torna-se complicada.

Cada ferramenta apresenta os seus respectivos ficheiros climáticos distintos, com diferentes valores para as condições do meio exterior de cada região. Os ficheiros climáticos do Energy Plus e TRNSYS possibilitam a determinação e análise de valores como os graus-dias de aquecimento, temperatura média durante a estação de arrefecimento, radiação solar incidente, entre outros, permitindo a sua recolha e aplicação no RCCTE para um estudo detalhado nessa vertente.

Capítulo 3 Metodologia de trabalho

O presente capítulo descreve a metodologia de trabalho adoptada para permitir o cumprimento de objectivos propostos, com principal relevância a avaliação dos principais parâmetros térmicos dos edifícios com recurso ao Energy Plus e TRNSYS, no contexto da regulamentação térmica nacional (RCCTE). O capítulo encontra-se dividido em 5 subsecções, cada uma referente a uma análise de simulação para caracterização de um parâmetro específico associado ao desempenho térmico da habitação. Define-se a metodologia de trabalho para avaliação da transferência de calor pela envolvente opaca (subsecção 3.1), influência de vãos envidraçados e palas de sombreamento horizontais (subsecção 3.2), influência da renovação do ar interior (subsecção 3.3), influência de ganhos internos (subsecção 3.4) e alteração do zonamento climático da habitação (subsecção 3.5).

A metodologia adoptada para a realização do trabalho e cumprimento dos objectivos segue uma filosofia de trabalho semelhante à aplicada no *Building Energy Simulation Test* (BESTEST) [14], com a definição de uma habitação com geometria simples, introduzindo-se os elementos em estudo sequencialmente, permitindo a análise individual e respectiva influência no comportamento térmico da habitação. A figura 3.1 apresenta a sequência da metodologia de trabalho adoptada para a habitação em análise.

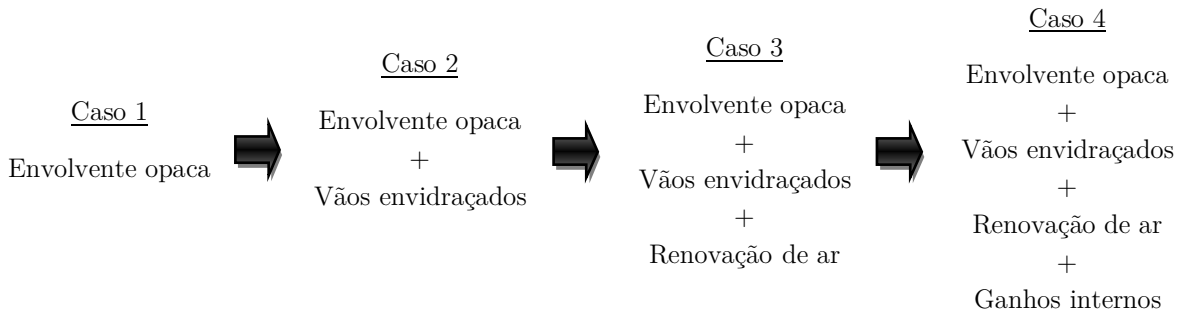


Figura 3.1 - Esquematização da sequência da metodologia de trabalho

Realiza-se a análise dos quatro parâmetros descritos na figura 3.1 com recurso ao RCCTE, Energy Plus e TRNSYS, com pressupostos semelhantes, permitindo assim a comparação de resultados entre as três ferramentas e influência de cada parâmetro no desempenho térmico da habitação elaborada.

3.1. Avaliação das trocas de calor associadas à envolvente opaca

A envolvente opaca exterior desempenha um papel fundamental no comportamento térmico de edifícios de habitação na medida em que esta separa ambientes com características muito distintas. O principal fenómeno físico associado à envolvente opaca é a transferência de calor por condução que pode ocorrer do interior para o exterior ou do exterior para o interior, associado à diferença de temperaturas entre os dois meios, apresentando a inércia da habitação uma influência da evolução das temperaturas interiores.

No estudo dos fenómenos de transferência de calor que ocorrem ao nível da envolvente opaca, analisa-se uma habitação de geometria simples, recorrendo ao RCCTE, Energy Plus e TRNSYS. A habitação apresenta uma geometria rectangular de 12 metros por 10 metros em planta, pé direito de 3,20 metros, como indicado na figura 3.2. Considera-se a habitação implantada em Lisboa.

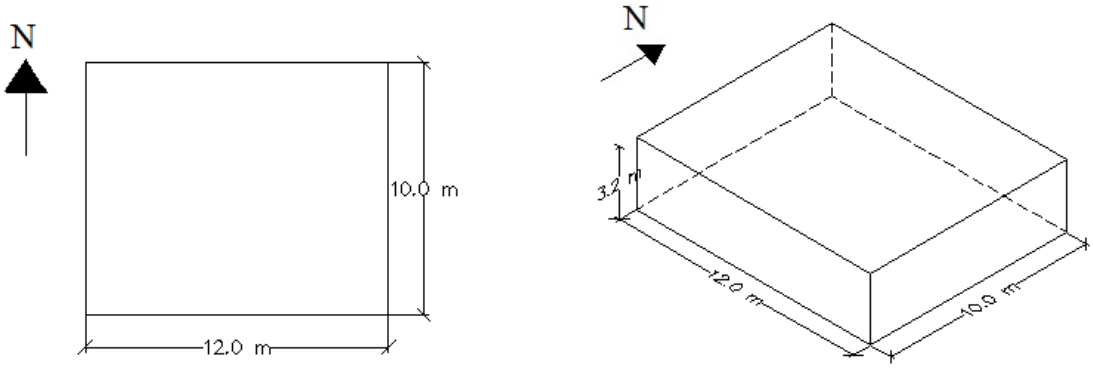


Figura 3.2 - Planta e visualização tridimensional da geometria da habitação

Tal como referido anteriormente, o primeiro caso de estudo corresponde à situação em que a habitação apenas apresenta envolvente opaca exterior, permitindo o estudo específico da transferência de calor ocorrida ao nível deste elemento. As paredes verticais exteriores apresentam a solução construtiva em parede dupla com isolamento térmico no seu interior (quadro 3.1), correspondendo a uma solução comum nas habitações no panorama da construção nacional. Para a solução construtiva da cobertura exterior (quadro 3.2) define-se uma tipologia de cobertura invertida, com uma maior espessura de isolamento térmico. A solução construtiva do pavimento em contacto com o solo encontra-se definida no quadro 3.3.

Quadro 3.1 - Solução construtiva das paredes exteriores da habitação

Material	**Espessura (cm)**	**U (W/m².ºC)**
Reboco de argamassa	1,5	0,50
Tijolo de cerâmica furado	11	
Caixa de ar	2	
Poliestireno extrudido	4	
Tijolo de cerâmica furado	11	
Estuque tradicional de gesso	1,5	

Quadro 3.2 - Solução construtiva da cobertura exterior da habitação

Material	**Espessura (cm)**	**U (W/m².ºC)**
Protecção pesada de godo	10	0,30
Poliestireno extrudido	10	
Impermeabilizante em tela de PVC	2	
Betonilha de regularização	10	
Laje de betão armado	20	
Estuque tradicional de gesso	1,5	

Quadro 3.3 - Solução construtiva do pavimento da habitação

Material	**Espessura (cm)**	**U (W/m².ºC)**
Laje de betão armado	10	0,55
Poliestireno extrudido	6	
Betonilha de regularização	10	
Ladrilho de cerâmica	2	

Os valores de U apresentados nos quadros anteriores foram calculados utilizando a referência indicada pelo RCCTE, nomeadamente a publicação do LNEC *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [27].

Os resultados obtidos das simulações respeitantes ao primeiro caso de estudo são apresentados em detalhe no capítulo 4.

3.2. Influência dos vãos envidraçados e palas de sombreamento

Os ganhos solares provocados pela existência de vãos envidraçados na habitação podem levar a um aumento das necessidades energéticas na estação convencional de arrefecimento, tomando este parâmetro uma importância relevante na avaliação do comportamento térmico de edifícios. Com o

objectivo de diminuir a incidência da radiação solar nos vãos envidraçados, são colocadas palas de sombreamento horizontais e verticais adjacentes aos mesmos. Os dispositivos de oclusão nocturna, como estores e persianas, apresentam um objectivo semelhante, apesar da sua activação depender dos hábitos ocupacionais ou programação automática.

O principal fenómeno associado aos vãos envidraçados é a incidência da radiação de luz solar, que atravessa a superfície do vidro e atinge as superfícies internas provocando o seu aquecimento. A transferência de calor pelos vãos envidraçados, através de condução, também influencia o comportamento térmico da habitação, pois geralmente são superfícies com elevado coeficiente de transmissão térmica.

No estudo da influência de vãos envidraçados e seus sombreamentos, são elaboradas quatro simulações, complementado a solução anteriormente desenvolvida para estudo da transferência de calor pela envolvente opaca. A orientação e área dos vãos envidraçados para o segundo caso de estudo tem como base numa situação de projecto real, abordada durante o percurso académico, permitindo assim a criação de elementos com características semelhantes à construção real analisada, sem contabilizar parâmetros arquitectónicos e de iluminação natural.

A solução construtiva adoptada para os vãos envidraçados consiste em duas lâminas de vidro com 4 mm de espessura, separados por uma lâmina de ar com 14 mm de espessura, inseridas num caixilho metálico com corte térmico. De acordo com a publicação do LNEC *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [27], a solução construtiva para os vãos envidraçados apresenta o valor de U = 2,8 W/m^2.ºC. O quadro 3.4 e 3.5 apresentam as disposições geométricas dos vãos envidraçados da habitação para a primeira e segunda simulação, respectivamente.

Quadro 3.4 - Disposição geométricas dos vãos envidraçados da habitação na primeira simulação

Vão Envidraçado	**Fachada**	**Comprimento (m)**	**Altura (m)**
1	Sul	1,40	1,00
2	Sul	1,40	1,00
3	Norte	5,00	2,35
4	Norte	1,40	1,00

Quadro 3.5 - Disposição geométricas dos vãos envidraçados da habitação na segunda simulação

Vão Envidraçado	**Fachada**	**Comprimento (m)**	**Altura (m)**
1	Este	1,40	1,00
2	Este	1,40	1,00
3	Oeste	5,00	2,35
4	Oeste	1,40	1,00

A figura 3.3 apresenta a esquematização da habitação no segundo caso de estudo, com a disposição de vãos envidraçados nas duas simulações realizadas.

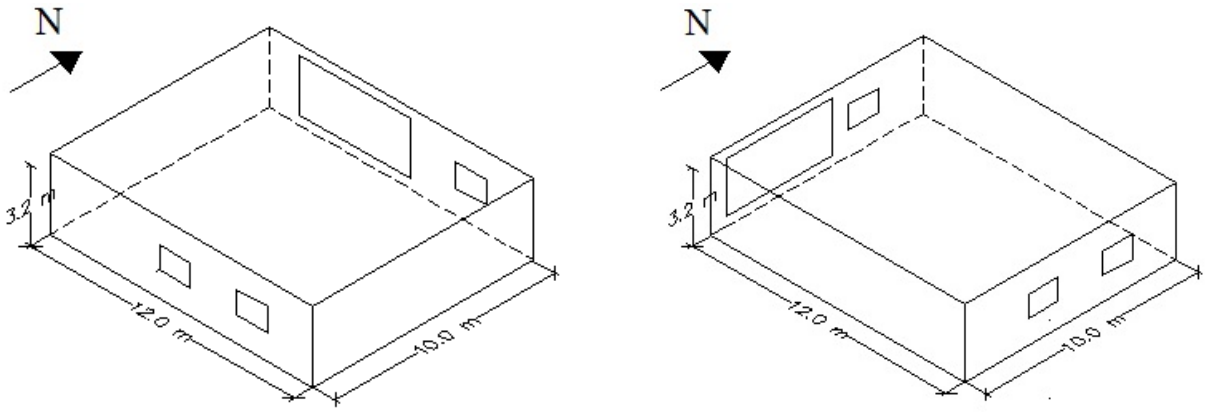


Figura 3.3 - Orientação dos vãos envidraçados na primeira e segunda simulação

A decisão da elaboração das duas simulações definidas prende-se com a criação de um caso de estudo com áreas vãos envidraçados e suas orientações semelhantes a um projecto real, permitindo a obtenção e combinação de resultados para a correcta avaliação da influência de vãos envidraçados no balanço energético da habitação e correspondentes necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento. A elaboração de apenas uma simulação na qual se apresenta um vão envidraçado de igual área em cada orientação geométrica, apesar de simplificar a análise de resultados, pode não fornecer uma imagem completa da influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico do edifício.

A avaliação da influência de sombreamentos horizontais sobre os vãos envidraçados é realizada na terceira e quarta simulações, com a análise da redução dos ganhos solares ocorridos na estação convencional de aquecimento e arrefecimento. As palas de sombreamento horizontais projectadas apresentam o comprimento do vão envidraçado e uma largura de 20 cm, sendo colocadas sobre o respectivo vão envidraçado, complementado assim a análise elaborada nas duas primeiras simulações.

O capítulo 5 apresenta a combinação de resultados obtidos na realização das simulações recorrendo às três ferramentas, a avaliação crítica da influência da orientação dos vãos envidraçados e palas de sombreamento no desempenho térmico da habitação.

3.3. Influência da renovação do ar interior

A renovação do ar interior é de fundamental para garantir a qualidade do ar interior nas habitações, no entanto influência activamente o comportamento térmico da habitação, correspondendo a uma troca de ar directamente com o exterior. Na estação de aquecimento, as perdas térmicas associadas à renovação do ar podem apresentar um valor significativo perante valores da temperatura do ar exterior inferiores à temperatura de referência no interior. Na estação de arrefecimento, a situação pode contribuir para a redução das necessidades energéticas caso a temperatura exterior se encontre inferior à temperatura no interior da habitação.

Na definição da taxa de renovação do ar interior da habitação considera-se que o edifício se encontra em conformidade com as disposições na NP 1037-1 [28], segundo a qual o edifício não possui meios mecânicos de insuflação ou extracção de ar e nas fachadas do edifício encontram-se dispositivos de admissão de ar auto-reguláveis. Seguindo as disposições da NP 1037-1, o valor para taxa de renovação do ar interior a aplicar no RCCTE é de 0,6 h^{-1}.

As ferramentas de simulação computacional do comportamento térmico do edifício apresentam sistemas para a definição de um horário de activação da renovação do ar interior e seus valores associados, com vista à optimização de perdas e ganhos térmicos associados à ventilação. No entanto, para possibilitar a comparação com os resultados do RCCTE, o valor adoptado para a taxa de renovação do ar interior no Energy Plus e no TRNSYS é de 0,6 h^{-1}, constante ao longo do período de simulação.

O capítulo 6 apresenta em detalhe os resultados obtidos na realização do terceiro caso de estudo.

3.4. Influência dos ganhos internos

A ocupação da habitação e actividades realizadas, bem como equipamentos e iluminação também desempenham um papel importante na temperatura interior dos edifícios, podendo contribuir de forma positiva ou negativa no comportamento térmico dos edifícios. Os ganhos internos associam-se ao fenómeno físico da radiação emitida pelos corpos dos habitantes, realização de actividades e dissipação de calor nos equipamentos e iluminação artificial.

Tendo em conta os fenómenos referidos, o RCCTE define um valor de ganhos térmicos internos médios de 4 W/m^2 para edifícios residenciais.

As ferramentas de simulação computacional, como o Energy Plus e o TRNSYS, permitem a elaboração de horários associados à ocupação da habitação, funcionamento de equipamentos e iluminação. Na verificação da influência dos ganhos internos no comportamento térmico dos edifícios, visto que o

RCCTE apenas define um valor dependente do tipo do edifício e da área útil de pavimento, torna-se interessante a aplicação a potencialidade das ferramentas de simulação computacional, com a execução de um horário geral para a ocupação da habitação, funcionamento dos seus equipamentos e iluminação, criando-se uma metodologia de comparação aos valores definidos no RCCTE.

O capítulo 7 apresenta os horários e os valores energéticos associados aos ganhos internos nas ferramentas computacionais e os resultados obtidos no quarto caso de estudo.

3.5. Alteração da localização de implantação do edifício

Os quatro casos de estudo definidos anteriormente apresentam a habitação implantada em Lisboa. O local de implantação da habitação pode desempenhar um papel importante na avaliação do comportamento térmico da habitação, associado à divisão do continente em três zonas climáticas de Inverno e três zonas climáticas de Verão, de acordo com o RCCTE.

Na realização desta análise são escolhidas três localizações distintas, Porto, Faro e Évora, correspondendo a primeira a um regime de Inverno mais rigoroso que Lisboa e o concelho de Faro e Évora apresentam um regime de Verão mais rigoroso que Lisboa.

Por fim, realiza-se a análise das necessidades energéticas para a situação final da habitação, com envolvente opaca, vãos envidraçados, renovação do ar interior e ganhos internos, nas quatro localizações definidas. Com a alteração da localização da habitação, é necessário a reformulação dos dados climáticos fornecidos pelos RCCTE, a alteração do ficheiro climático e duração da estação convencional de aquecimento para o Energy Plus e o TRNSYS.

Os resultados das perdas térmicas, ganhos térmicos e diferenças de necessidades energéticas da habitação nas quatro localizações recorrendo ao RCCTE, Energy Plus e TRNSYS, encontram-se expostas no capítulo 8, assim como a avaliação crítica dos mesmos.

O quadro 3.6 exposto na página seguinte, apresenta a esquematização da metodologia de trabalho elaborada de forma simplificada. De referir novamente que a sequência dos quatro casos de estudo iniciais realizam-se no concelho de Lisboa e a o terceiro caso de estudo tem como precedente a terceira simulação do segundo caso de estudo.

Quadro 3.6 - Esquematização da metodologia de trabalho

Caso 1 - Envolvente exterior opaca	
○ Elaboração da habitação com paredes verticais orientadas a Norte, Sul, Este e Oeste, cobertura e pavimento em contacto com o solo	
Caso 2 - Vãos envidraçados e palas de sombreamento horizontais	
○ Primeira simulação Orientação a Norte e Sul Sem sombreamento	○ Segunda simulação Orientação a Este e Oeste Sem sombreamento
○ Terceira simulação Orientação a Norte e Sul Com sombreamento	○ Quarta simulação Orientação a Este e Oeste Com sombreamento
Caso 3 - Renovação de ar	
○ Aplicação da taxa de renovação horária de 0,6 h^{-1}	
Caso 4 - Ganhos internos	
○ RCCTE - aplicação do valor definido 4 W/m^2	
○ Energy Plus e TRNSYS - aplicação potencialidades associadas à calendarização	
Caso 5 - Alteração do zonamento climático da habitação	
○ Lisboa	
○ Porto	
○ Faro	
○ Évora	

Capítulo 4 Avaliação das trocas de calor associadas à envolvente opaca

O presente capítulo descreve a metodologia de cálculo para a avaliação da transferência de calor ocorrido pela envolvente opaca do edifício em estudo. Apresentam-se os resultados obtidos correspondentes ao primeiro caso de estudo, nomeadamente a transferência de calor com o meio exterior por cada uma das envolventes opacas, ou seja, paredes com diferentes orientações geográficas, cobertura e pavimento em contacto com o solo. Descreve-se a metodologia de cálculo para determinação do fluxo de calor pela envolvente opaca, de acordo com o RCCTE (subsecção 4.1), com o Energy Plus (subsecção 4.2) e com TRNSYS (subsecção 4.3). A subsecção 4.4 apresenta os resultados obtidos para cada uma das três ferramentas, sendo a última subsecção 4.5 dedicada à apresentação da compilação e comparação de resultados entre as três ferramentas.

4.1. Metodologia de cálculo de acordo com o RCCTE

O RCCTE considera perdas de calor por condução através da envolvente opaca durante toda a estação de aquecimento e arrefecimento. Durante a estação de arrefecimento são ainda contabilizados ganhos pela envolvente opaca exterior, resultantes dos efeitos combinados da temperatura do ar exterior e da radiação solar incidente.

No primeiro caso de estudo torna-se necessário a definição de perdas térmicas associadas às paredes e cobertura exteriores, para ambas a estações, e as perdas térmicas associadas ao pavimento em contacto com o solo apenas durante a estação de aquecimento. O RCCTE não considera trocas de calor nos pavimentos em contacto com o solo durante a estação de arrefecimento.

4.1.1. Determinação das perdas pela envolvente opaca exterior

A determinação de perdas térmicas associadas a cada envolvente opaca em contacto com o exterior faz-se com recurso à expressão:

$$Q_{ext} = U.A.\left(\theta_i - \theta_{atm}\right) \quad (W) \tag{4.1}$$

Na qual se considera o produto entre o coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente (U), em W/m^2.ºC, a área do elemento da envolvente medida pelo interior (A), em m^2, e a diferença entre a temperatura do ar no interior do edifício (θ_i) e a temperatura do ar exterior (θ_{atm}), ambas em ºC.

Durante a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar as perdas por cada uma das envolvente opacas exteriores é dada pela seguinte equação:

$$Q_{ext} = 0{,}024.U.A.GD \quad (kWh) \tag{4.2}$$

A expressão (4.2) introduz o conceito do número de graus-dias de aquecimento (GD) para cada concelho de Portugal, definidos no anexo III do RCCTE, e calculados com base na equação (4.3). Os graus-dias de aquecimento (GD) correspondem a um método de cálculo estático, decorrente de dados meteorológicos, para um dado período convencional de aquecimento de cada zona geográfica, com base no somatório horário de diferenças entre a temperatura interior do edifício (θ_i), considerando a temperatura de referência 20 ºC, e a temperatura do ar exterior (θ_{atm}). No seu cálculo, apenas se considera valores positivos da diferença mencionada.

$$GD = \sum \left(\theta_i - \theta_{atm}\right) \quad (^{\circ}C.dias) \tag{4.3}$$

O cálculo das perdas por condução em cada uma das envolventes opacas, durante a estação convencional de arrefecimento encontra-se definido na seguinte expressão:

$$Q_{ext} = 2{,}928.U.A.\left(\theta_i - \theta_m\right) \quad (kWh) \tag{4.4}$$

Neste cálculo considera-se a diferença entre a temperatura interior do edifício (θ_i) com o valor de referência na estação de arrefecimento, 25 ºC, e a temperatura média do ar exterior na estação convencional de arrefecimento (θ_m) na zona climática de Verão de implantação do edifício, de acordo com o anexo III do RCCTE.

4.1.2. Determinação das perdas por pavimentos em contacto com o solo

As perdas unitárias de calor através dos elementos de construção em contacto com o terreno (L_{pe}) são calculadas pelo produto entre o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ), em W/m.ºC, e o desenvolvimento linear do pavimento medido pelo interior (B), em m, como indicado na equação (4.5).

$$L_{pe} = \sum \psi_j . B_j \quad \left(W / ^{\circ} C\right) \tag{4.5}$$

O coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) é função da diferença de nível entre a face superior do pavimento e a cota do terreno exterior e o coeficiente de transmissão térmica do elemento (U). O RCCTE apresenta na tabela IV.2.2 valores para o coeficiente de transmissão térmica linear, em função dos dois parâmetros mencionados.

Durante a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar as perdas lineares de cada elemento da envolvente em contacto com o solo determina-se recorrendo à seguinte expressão:

$$Q_{pe} = 0{,}024 . L_{pe} . GD \quad \left(kWh\right) \tag{4.6}$$

4.1.3. Determinação dos ganhos pela envolvente opaca em estação de arrefecimento

O RCCTE considera que a radiação solar incidente na envolvente opaca resulta em ganhos térmicos durante a estação convencional de arrefecimento.

Os ganhos pela envolvente opaca devido à radiação solar incidente (Q_{gop}) determina-se recorrendo à seguinte expressão:

$$Q_{gop} = U . A . \left(\frac{\alpha . Ir}{h_e} \right) \quad \left(kWh\right) \tag{4.7}$$

O cálculo depende do coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente (U), em W/m^2.ºC, da área do elemento da envolvente (A), em m^2, do coeficiente de absorção em função da cor da superfície da exterior da parede (α), de acordo com os valores indicados no quadro V.5 do RCCTE, da intensidade média de radiação total incidente em cada orientação durante a estação de arrefecimento

(Ir), em kWh/m^2, de acordo com valores indicados no quadro III.9 do RCCTE, e do valor da condutância térmica superficial exterior do elemento da envolvente (h_e), que toma o valor de 25 W/m^2.ºC.

4.2. Metodologia de cálculo de acordo com o Energy Plus

O Energy Plus aplica as potencialidades computacionais para o cálculo das transferências de calor pela envolvente opaca ao longo do período de análise. A solução comum na avaliação da transferência de calor ao longo do tempo apresenta factores de resposta que relacionam o fluxo numa superfície do elemento construtivo com uma evolução histórica de temperaturas em ambas as faces, como mostrado na equação (4.8).

$$q''_{so}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j \theta_{so,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \theta_{si,t-j\delta} \tag{4.8}$$

Na qual se representa o fluxo de calor (q''), a temperatura na face interior (θ_{si}), a temperatura na face exterior (θ_{so}), o momento de análise (t) e os factores de resposta (X e Y). Os somatórios com termos infinitos do fluxo de calor podem ser substituídos por valores de fluxos determinados no momento de análise anterior e com a definição de elementos denominados funções de transferência por condução (CTF, do inglês *conduction transfer functions*) resulta numa nova solução para o fluxo interior apresentado na equação (4.9) e para o fluxo exterior definido na equação (4.10),

$$q''_{si}(t) = -Z_o \theta_{si,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j \theta_{si,t-j\delta} + Y_o \theta_{so,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j \theta_{so,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{si,t-j\delta} \tag{4.9}$$

$$q''_{so}(t) = -Y_o \theta_{si,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j \theta_{si,t-j\delta} + X_o \theta_{so,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j \theta_{so,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{so,t-j\delta} \tag{4.10}$$

onde as variáveis designam os parâmetros:

X_j - coeficiente CTF exterior, $j = 0,1,\ldots,nz$;

Y_j - coeficiente CTF cruzado, $j = 0,1,\ldots,nz$;

Z_j - coeficiente CTF interior, $j = 0,1,\ldots,nz$;

$\boldsymbol{\Phi}_j$ - coeficiente CTF de fluxo, $j = 1,2,\ldots,nq$;

$\boldsymbol{\theta}_{si}$ - temperatura na face interior;

$\boldsymbol{\theta}_{so}$ - temperatura na face exterior;

q''_{si} - condução do fluxo de calor na face interior;

q''_{so} - condução do fluxo de calor na face exterior.

Os parâmetros com o índice $\boldsymbol{\delta}$ relacionam-se com o intervalo de tempo definido para a análise. Os primeiros termos das equações (com o índice 0) encontram-se separados dos restantes com o objectivo de facilitar a resolução da temperatura actual no esquema da solução. As equações (4.9) e (4.10) indicam que o fluxo de calor em ambas as faces de uma superfície do elemento construtivo do edifício está linearmente relacionado com as actuais e anteriores temperaturas em ambas as faces interior e exterior, assim como valores de fluxo ocorridos anterioremente na superfície interior. As equações permitem o cálculo da transferência de calor por condução de um elemento da envolvente com base em coeficientes do tipo CTF constantes para cada tipo de solução construtiva.

Na determinação dos coeficientes CTF, o Energy Plus utiliza o método *State Space*. Esta metodologia estabelece um sistema de equações lineares matriciais que permite a resolução da equação da condução de calor transitória com a imposição de uma grelha de diferenças finitas sobre as diversas camadas da solução construtiva analisada [18].

Um aspecto importante desta metodologia é a utilização de álgebra matricial para a eliminação das temperaturas nodais da grelha, obtendo-se o resultados do fluxo de calor com base nas temperaturas interiores e exteriores. Este método evita a aplicação de transformadas de Laplace na resolução do problema, apresentado ainda a vantagem de obtenção de uma matriz com melhor significado físico que as complexas funções obtidas com a metodologia de Laplace [18].

De acordo com Seem (1987) e Strand (1995) a eficácia do método *State Space* na determinação dos coeficientes CTF em intervalos de análise curtos e modelação em 2D e 3D, está demonstrada. Os investigadores Ouyang e Haghighat (1991) demonstraram que os resultados entre a metodologia de Laplace e o método *State Space* apresentam diferenças mínimas para a avaliação do fluxo de calor numa parede simples com duas faces de betão e isolamento térmico no seu interior [18].

4.3. Metodologia de cálculo de acordo com o TRNSYS

Tal como a ferramenta descrita anteriormente, o TRNSYS também aplica metodologia computacional no cálculo da transferência de calor pela envolvente opaca ao longo do período de análise. A figura 4.1 apresenta os fluxos de calor e temperaturas que caracterizam o comportamento térmico de uma dada envolvente opaca, com a respectivo significado na nomenclatura.

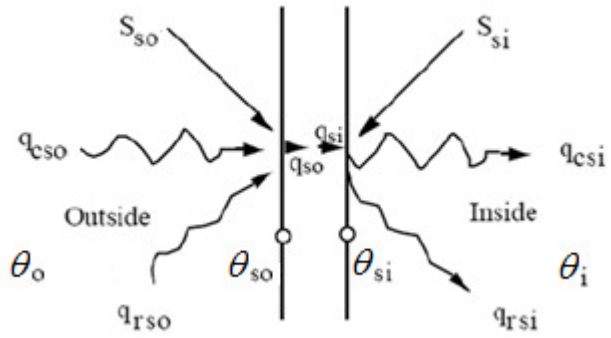


Figura 4.1 - Fluxos de calor e temperaturas na envolvente opaca

S_{si} - fluxo de calor de radiação absorvida na superfície interior;

S_{so} - fluxo de calor de radiação absorvida na superfície exterior;

q_{rsi} - transferência de calor por radiação com as restantes superfícies da zona térmica;

q_{rso} - transferência de calor por radiação com as superfícies visíveis pela superfície exterior;

q_{si} - transferência de calor por condução do elemento para a superfície interior;

q_{so} - transferência de calor por condução da superfície exterior para o elemento;

q_{csi} - transferência de calor por convecção da superfície interior para a zona térmica;

q_{cso} - transferência de calor por convecção do meio exterior para a superfície exterior;

θ_{si} - temperatura na superfície interior;

θ_{so} - temperatura na superfície exterior;

θ_{i} - temperatura do ar na zona térmica;

θ_{o} - temperatura do ar do meio exterior.

A metodologia de cálculo aplicada na envolvente opaca segue as relações baseadas nas funções de transferência de Mitalas e Arseneault, definidas de superfície em superfície [26]. Para qualquer envolvente

opaca, a condução de calor na superfície interior define-se de acordo com a equação (4.11) e a condução de calor na superfície exterior define-se de acordo com a equação (4.12).

$$q''_{si} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \theta_{so}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k \theta_{si}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k q''^k_{si} \tag{4.11}$$

$$q''_{so} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k \theta_{so}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \theta_{si}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k q''^k_{so} \tag{4.12}$$

Os parâmetros com o índice k relacionam-se com o intervalo de tempo definido para a análise, onde $k = 0$ corresponde ao tempo actual, $k = 1$ corresponde ao tempo anterior, e assim sucessivamente, apresentando intervalos de tempo constantes entre as análises. As equações que definem a condução de calor nas superfícies apresentam coeficientes de funções de transferência (a, b, c, d), semelhantes aos aplicados no Energy Plus, que são determinados pelas propriedades das camadas dos materiais do elemento construtivo (condutibilidade térmica, calor específico, massa volúmica e espessura) aplicando as rotinas da função *z-transfer*, apresentadas por Mitalas e Arseneault [26].

Uma das principais características do método da função *z-transfer* é a introdução de dados de entrada em intervalos de tempo iguais, tornando-se vantajoso quando os ficheiros climáticos apresentam valores de temperatura do ar exterior e radiação solares com um intervalo horário constante. No entanto, deve ser referido que o TRNSYS apenas aplica este método na determinação dos coeficientes no início da simulação, logo as variações ocorridas nos materiais ao longo do tempo, devido a mudanças do estado de humidade, não são contabilizadas na análise da transferência de calor [25].

4.4. Apresentação e análise de resultados obtidos

Nesta subsecção apresentam-se os resultados obtidos com recurso ao RCCTE, assim como os resultados das variáveis de saída dos programas Energy Plus e TRNSYS, no primeiro caso de estudo, e sua análise crítica. Apresentam-se os resultados totais para a transferência de calor por condução pela envolvente opaca do edifício e detalhadamente para cada um dos elementos construtivos, nomeadamente paredes verticais com diferentes orientações, cobertura e pavimento em contacto com o solo. No final apresenta-se a compilação dos resultados obtidos nas três ferramentas, permitindo a avaliação comparativa entre os três procedimentos.

4.4.1. Resultados obtidos com a metodologia do RCCTE

4.4.1.1. Resultados na estação convencional de aquecimento

Os valores obtidos na sequência de cálculos das perdas térmicas pela envolvente opaca na estação de aquecimento são indicadas no quadro 4.1, de acordo com a geometria da habitação elaborada e a resolução das equações (4.2) e (4.6), para a envolvente exterior e para a envolvente em contacto com o solo, respectivamente.

Quadro 4.1 - Perdas térmicas pela envolvente opaca durante a estação de aquecimento

Envolvente exterior	**Área (m²)**	**U (W/m².ºC)**	**U.A (W/ºC)**	**Perdas térmicas (kWh)**
Parede Dupla - Fachada Norte	38,40	0,50	19,08	544,95
Parede Dupla - Fachada Este	32,00	0,50	15,90	454,12
Parede Dupla - Fachada Sul	38,40	0,50	19,08	544,95
Parede Dupla - Fachada Oeste	32,00	0,50	15,90	454,12
Cobertura	120,00	0,30	37,13	1060,33
Pavimento em contacto com o solo	**B (m)**	**ψ (W/m.ºC)**	**B.ψ (W/ºC)**	**Perdas térmicas (kWh)**
Pavimento térreo	44,00	0,30	13,20	376,99
Perdas térmicas pela envolvente opaca (kWh)				3435,46

Os resultados referidos no quadro 4.1, de acordo com a equação (4.2), indicam que as perdas térmicas pela envolvente opaca exterior (paredes e cobertura), na estação de aquecimento, são linearmente dependentes da área do elemento e do coeficiente de transmissão térmica da solução construtiva, em função do concelho de implantação e respectiva duração da estação e graus dias de aquecimento. A metodologia de cálculo associada ao pavimento em contacto com o solo depende de coeficientes de transmissão térmica linear, em função da cota de profundidade e coeficiente de transmissão térmica do elemento, com base de valores indicados na tabela IV 2.2 do RCCTE.

A cobertura corresponde ao elemento construtivo com maiores perdas térmicas na estação de aquecimento, 1060,33 kWh. A envolvente opaca orientada a Norte e Sul apresentam valores idênticos de perdas térmicas de 544,95 kWh, superiores à envolvente orientada a Este e Oeste com menor área, 454,12 kWh. A metodologia adoptada pelo RCCTE para determinação das perdas térmicas associadas ao pavimento em contacto com o solo resultam num valor de 376,99 kWh.

4.4.1.2. Resultados na estação convencional de arrefecimento

No quadro 4.2 indicam-se os resultados obtidos para as perdas térmica pela envolvente opaca na estação de arrefecimento (equação (4.4)) e os resultados para os ganhos solares pela envolvente opaca (equação (4.7)), em função da intensidade de radiação solar (*Ir*) em cada orientação, e considerando uma pintura exterior clara (α = 0,3). No quadro 4.2 apresentam-se ainda o valor do balanço energético associado a cada elemento construtivo, determinado com base na diferença entre os ganhos solares e as perdas térmicas.

Quadro 4.2 - Perdas térmicas e ganhos solares pela envolvente opaca durante a estação de arrefecimento

Envolvente exterior	**Perdas térmicas (kWh)**	**Ir (kWh/m²)**	**Ganhos solares (kWh)**	**Balanço energético (kWh)**
Parede Dupla - Fachada Norte	111,74	200	61,06	-50,68
Parede Dupla - Fachada Este	93,11	470	119,57	26,46
Parede Dupla - Fachada Sul	111,74	380	116,01	4,27
Parede Dupla - Fachada Oeste	93,11	470	119,57	26,46
Cobertura	217,41	820	487,10	269,69
Balanço energético da envolvente opaca (kWh)				276,20

As perdas térmicas pela envolvente opaca dependem directamente da área, coeficiente de transmissão térmica da solução construtiva e diferença entre a temperatura de referência interior, 25 ºC, e a temperatura média do ar exterior. Apresentando esta diferença um valor inferior aos graus-dias de aquecimento considerados na estação de aquecimento, as perdas térmicas pela envolvente opaca são inferiores durante a estação de arrefecimento. Os ganhos solares associados à estação de arrefecimento, para além da dependência da área e coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo, dependem da radiação solar em cada uma das orientações das superfícies expostas. De acordo com os valores indicados, as superfícies verticais orientadas a Este e Oeste apresentam valores superiores de ganhos solares.

Do ponto de vista do balanço energético (diferença entre os ganhos solares e perdas térmicas), a cobertura é o elemento construtivo da habitação que apresenta ganhos solares superiores e balanço positivo no valor de 269,69 kWh. As paredes verticais orientadas a Este e Oeste, com menores perdas térmicas e superior radiação solar incidente, apresentam balanço energético positivo de 26,46 kWh, comparativamente com as restantes paredes verticais. A parede vertical orientada a Norte apresenta balanço energético negativo de 50,68 kWh, onde as perdas térmicas a superam os ganhos solares.

Os resultados obtidos indicam que os ganhos solares pela envolvente opaca, associados à condução e radiação solar, superam as perdas térmicas por condução, resultando em necessidades energéticas de arrefecimento no valor de 2,71 kWh/m^2.ano para manter a temperatura no interior da habitação inferior à temperatura de referência de conforto, 25 ºC.

4.4.2. Resultados obtidos da simulação recorrendo ao Energy Plus

Para efeitos de comparação com os resultados obtidos na aplicação da metodologia do RCCTE, utiliza-se o procedimento idêntico na definição da duração da estação convencional de aquecimento. De acordo com o ficheiro climático de Lisboa do Energy Plus, a estação de aquecimento inicia a 15 de Novembro e termina a 17 de Abril, com a duração de 5,1 meses. A estação convencional de arrefecimento inicia a 1 de Junho e termina a 30 de Setembro, dados iguais ao RCCTE.

4.4.2.1. Resultados na estação convencional de aquecimento

Como referido no subcapítulo referente à metodologia de cálculo abordada no Energy Plus, a transferência de calor pela envolvente opaca depende fortemente da temperatura na face exterior da solução construtiva. Este valor de temperatura é influenciado pela temperatura do meio ambiente exterior e da radiação solar incidente de acordo com a orientação da fachada exposta. No quadro 4.3 apresenta-se a radiação solar incidente em cada elemento construtivo da habitação e respectivas perdas térmicas na estação de aquecimento.

Quadro 4.3 - Perdas térmicas pela envolvente opaca durante a estação de aquecimento

Envolvente exterior	**Área (m^2)**	**Radiação Incidente (W/m^2)**	**Perdas térmicas (kWh)**
Parede Dupla - Fachada Norte	38,40	32,54	489,25
Parede Dupla - Fachada Este	32,00	86,63	254,44
Parede Dupla - Fachada Sul	38,40	143,12	87,50
Parede Dupla - Fachada Oeste	32,00	66,82	309,65
Cobertura invertida	120,00	116,24	1114,02
Pavimento térreo	120,00	-	163,20
Perdas térmicas pela envolvente opaca (kWh)			2419,28

Relativamente às paredes verticais, quanto maior a radiação solar incidente, maior a temperatura na face exterior, logo menores as perdas térmicas pela envolvente opaca. De acordo com o Energy Plus, na estação de aquecimento, a fachada orientada a Sul é a que apresenta maior radiação solar incidente, correspondendo a menores perdas térmicas. A fachada oposta, orientada a Norte, apresenta menor radiação solar incidente, logo corresponde à fachada com maiores perdas térmicas.

A cobertura, apesar de possuir um valor de coeficiente de transmissão térmica adequado (U = 0,30 W/m^2.ºC), apresenta grande área de construção, correspondendo assim ao elemento construtivo com maiores perdas térmicas. O motivo do valor elevado encontra-se na definição da rugosidade da camada superior da cobertura, que apresenta um índice de reflectância duplamente superior ao definido para as paredes verticais (α = 0,6), correspondendo a menor radiação incidente absorvida. No entanto, o valor unitário de perdas térmicas (9,28 kWh/m^2) é inferior ao da parede orientada a Norte (12,74 kWh/m^2), com menor radiação incidente.

O Energy Plus apresenta um utilitário específico na determinação da temperatura do solo, com base no ficheiro climático da região, permitindo assim a introdução dos valores de temperatura do mensais e a realização da transferência por condução pelo pavimento térreo. Ao longo da estação de aquecimento o valor médio da temperatura do solo é de 18,03 ºC, e comparativamente com o valor da temperatura de referência no interior, 20 ºC, a diferença de temperatura corresponde a um valor baixo de perdas térmicas através do pavimento em contacto com o solo.

4.4.2.2. Resultados na estação convencional de arrefecimento

O quadro 4.4 apresenta os resultados obtidos no Energy Plus associados à radiação incidente e ao balanço energético total para cada um dos elementos construtivos da habitação, durante a estação de arrefecimento.

Quadro 4.4 - Balanço energético da envolvente opaca durante a estação de arrefecimento

Envolvente exterior	**Área (m²)**	**Radiação Incidente (W/m²)**	**Balanço Energético (kWh)**
Parede Dupla - Fachada Norte	38,40	73,11	-13,02
Parede Dupla - Fachada Este	32,00	176,15	274,55
Parede Dupla - Fachada Sul	38,40	131,71	213,23
Parede Dupla - Fachada Oeste	32,00	129,51	123,43
Cobertura invertida	120,00	267,07	97,84
Pavimento térreo	120,00	-	-667,89
Balanço energético da envolvente opaca (kWh)			28,14

Os valores negativos de balanço energético indicam que um elemento construtivo apresenta maiores perdas térmicas do que ganhos, verificando-se esta situação na fachada Norte e pavimento térreo. Sendo a fachada Norte a menos exposta à radiação solar, o balanço energético por este elemento construtivo é negativo, ao contrário das restantes envolventes verticais e cobertura. A temperatura média do solo durante o Verão é de 20,66 ºC, sendo inferior à temperatura no interior da habitação, ocorrendo assim perdas térmicas elevadas pelo pavimento.

Para complementar os dados descritos no quadro 4.4, apresenta-se na figura 4.2 a evolução da temperatura interior da habitação, em função da temperatura exterior, durante o período de 26 de Agosto a 1 de Setembro.

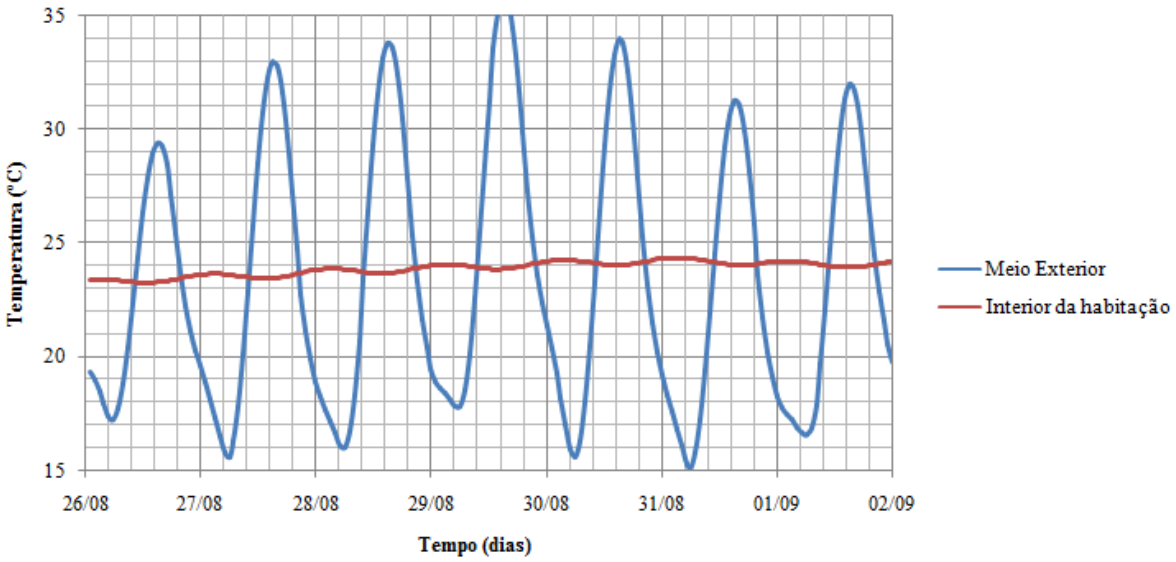


Figura 4.2 - Temperatura no interior e exterior da habitação durante o período de 26 de Agosto a 1 de Setembro

A habitação apresenta em período nocturno perdas térmicas pela envolvente opaca, quando a temperatura interior é superior à temperatura exterior. Em períodos diurnos, onde a temperatura exterior é superior à temperatura interior, a habitação apresenta ganhos térmicos pela envolvente opaca. O máximo de temperaturas no interior e exterior da habitação encontram-se desfasados devido ao tempo de resposta às alterações exteriores devido à inércia do edifício.

Assim, a habitação apresenta ganhos e perdas térmicos pela envolvente opaca (paredes verticais e cobertura), durante a estação de arrefecimento, correspondendo o balanço energético à diferença entre ambos. A superfície exterior da fachada Este apresenta um valor elevado de radiação incidente, correspondendo a maiores temperaturas e consequentemente maiores ganhos térmicos, comparativamente com a fachada Oeste e Sul. Como referido anteriormente, a cobertura apresenta um valor elevado de

reflectância, correspondendo a menores ganhos térmicos e consequente balanço energético, comparativamente com as paredes verticais orientadas a Este, Oeste e Sul.

O balanço energético negativo verificado no pavimento e na parede orientada a Norte equilibram os ganhos energéticos registados nos restantes elementos, resultando num valor de necessidades nominais de arrefecimento de 0,10 kWh/m^2.ano.

4.4.3. Resultados obtidos da simulação recorrendo ao TRNSYS

Para efeitos de comparação com os resultados obtidos na aplicação da metodologia do RCCTE, utiliza-se o procedimento idêntico na definição da duração da estação convencional de aquecimento. De acordo com o ficheiro climático de Lisboa do TRNSYS, a estação de aquecimento inicia a 24 de Novembro e termina a 5 de Abril, com a duração de 4,4 meses. A estação convencional de arrefecimento inicia a 1 de Junho e termina a 30 de Setembro, dados iguais ao RCCTE.

4.4.3.1. Resultados na estação convencional de aquecimento

A metodologia de cálculo do TRNSYS referente à transferência de calor pela envolvente opaca define a dependência da temperatura na face exterior da solução construtiva. O quadro 4.5 indica os valores de radiação solar incidente em cada elemento construtivo da habitação e respectivas perdas térmicas por condução na envolvente opaca, durante a estação convencional de aquecimento.

Quadro 4.5 - Perdas térmicas pela envolvente opaca durante a estação de aquecimento

Envolvente exterior	**Área (m^2)**	**Radiação Incidente (W/m^2)**	**Perdas térmicas (kWh)**
Parede Dupla - Fachada Norte	38,40	30,42	471,03
Parede Dupla - Fachada Este	32,00	71,48	364,92
Parede Dupla - Fachada Sul	38,40	139,41	382,25
Parede Dupla - Fachada Oeste	32,00	71,08	364,33
Cobertura invertida	120,00	191,44	682,27
Pavimento térreo	120,00	-	243,39
Perdas térmicas pela envolvente opaca (kWh)			2508,19

As perdas térmicas pela envolvente opaca dependem da radiação incidente na fachada, influenciando o valor da temperatura na superfície exterior. Consultando o quadro 4.5, verifica-se que,

apesar de importante na definição da transferência de calor, a radiação incidente não é o factor decisivo nas perdas térmicas pela envolvente opaca. A fachada Sul, apesar de maior valor de radiação incidente, como possuí maior área de exposição, as perdas térmicas são superiores às paredes verticais com orientação a Este e Oeste. A fachada Norte encontra-se menos exposta à radiação solar, resultando em maiores perdas térmicas, pois a superfície exterior apresenta menor temperatura. As fachadas Este e Oeste, com valores semelhantes de área de transferência e radiação incidente, apresentam perdas térmicas semelhantes. A cobertura é o elemento construtivo com maiores perdas térmicas devido ao valor superior de área exposta ao meio exterior, apesar de apresentar o valor mais elevado de radiação solar.

Na definição das perdas térmicas pelo pavimento em contacto com o solo, o TRNSYS apenas possibilita a definição de uma envolvente com uma temperatura específica, e não uma envolvente em contacto com o solo e variações de temperaturas mensais. Perante este inconveniente, utiliza-se o valor da temperatura média no solo, 18,03 ºC, do ficheiro climático do Energy Plus, permitindo assim a comparação de valores. O pavimento em contacto com o solo é o elemento construtivo da habitação com menores perdas térmicas, pois o valor da temperatura de fronteira considerada é frequentemente superior aos valores de temperatura exterior a que os outros elementos construtivos se encontram sujeitos.

4.4.3.2. Resultados na estação convencional de arrefecimento

O quadro 4.6 apresenta o comportamento dos elementos da envolvente opaca durante a estação de arrefecimento, com os valores da radiação incidente e o balanço energético.

Quadro 4.6 - Balanço energético da envolvente opaca durante a estação de arrefecimento

Envolvente exterior	**Área (m^2)**	**Radiação Incidente (W/m^2)**	**Balanço Energético (kWh)**
Parede Dupla - Fachada Norte	38,40	60,81	-59,89
Parede Dupla - Fachada Este	32,00	132,20	-2,86
Parede Dupla - Fachada Sul	38,40	116,39	-16,06
Parede Dupla - Fachada Oeste	32,00	135,76	1,79
Cobertura invertida	120,00	345,27	400,83
Pavimento térreo	120,00	-	-325,28
Balanço energético da envolvente opaca (kWh)			-1,47

Consultado os resultados obtidos, verifica-se que os balanços energéticos da envolvente opaca associada às paredes verticais apresentam valores baixos, não influenciando significativamente o

comportamento térmico da habitação. Na estação de arrefecimento, as fachadas com maior valor de radiação incidente correspondem à orientação Este e Oeste. Apenas fachada Norte apresenta um balanço energético negativo significativo, indicando perdas térmicas superiores aos ganhos.

Dos elementos construtivos da habitação, a cobertura é a que apresenta valores de balanço energéticos positivos elevados, devido à área de exposição e radiação solar incidente, correspondendo a ganhos térmicos significativos em estação de arrefecimento, influenciando negativamente o comportamento térmico da habitação.

Na definição das perdas térmicas pelo pavimento em contacto com o solo, foi definido o valor da temperatura média no solo, 20,66 ºC, retirado do ficheiro climático do Energy Plus, permitindo assim a comparação de valores. O pavimento em contacto com o solo é o elemento construtivo da habitação que apresenta maiores perdas térmicas, pois o valor da temperatura do solo encontra-se frequentemente inferior à temperatura no interior da habitação.

A figura 4.3 apresenta a evolução da temperatura interior da habitação em função da temperatura exterior, durante o período de 26 de Agosto a 1 de Setembro.

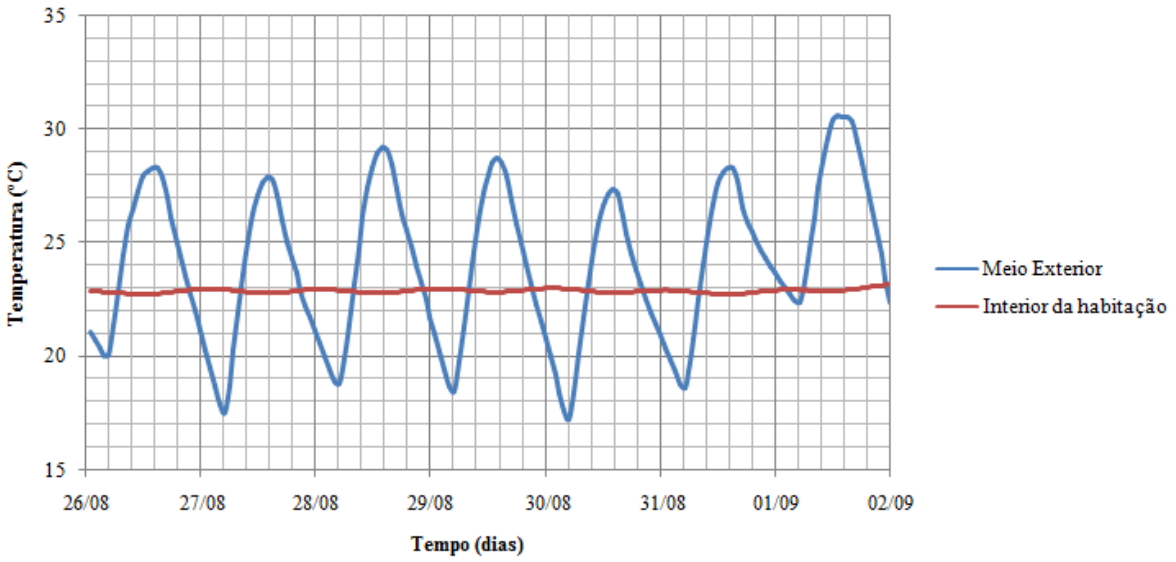


Figura 4.3 - Temperatura interior e exterior da habitação durante o período de 26 de Agosto a 1 de Setembro

Na simulação realizada recorrendo ao TRNSYS, verifica-se que o somatório do balanço energético negativo do pavimento, paredes orientadas a Norte, Sul e Este superam os somatório do balanço energético positivo da cobertura e da parede orientada a Oeste. Assim, as necessidades de arrefecimento associadas à transferência de calor pela envolvente opaca são nulas, pois a temperatura interior da habitação não excede a temperatura de referência para conforto interno (25 ºC).

4.5. Comparação de resultados obtidos recorrendo às três ferramentas

A presente subsecção reúne os resultados obtidos na realização do primeiro caso de estudo, correspondendo à análise da transferência de calor pela envolvente opaca da habitação, durante a estação convencional de aquecimento e de arrefecimento.

4.5.1. Resultados na estação convencional de aquecimento

O quadro 4.7 apresenta os resultados obtidos referentes às perdas térmicas pela envolvente exterior opaca, de acordo com as três ferramentas de análise do comportamento térmico de edifícios, durante a estação convencional de aquecimento, assim como necessidades energéticas associadas.

Quadro 4.7 - Perdas térmicas pela envolvente opaca na estação de aquecimento, de acordo com as três ferramentas

Envolvente exterior	**Perdas térmicas (kWh)**		
	RCCTE	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Parede Dupla - Fachada Norte	544,95	489,25	471,03
Parede Dupla - Fachada Este	454,12	254,44	364,92
Parede Dupla - Fachada Sul	544,95	87,50	382,25
Parede Dupla - Fachada Oeste	454,12	309,65	364,33
Cobertura invertida	1060,33	1114,02	682,27
Pavimento térreo	376,99	163,20	243,39
Somatório da envolvente opaca da habitação	3435,46	2419,28	2508,19
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	28,63	20,70	20,90

A metodologia de análise estática realizada pelo RCCTE na transferência de calor pela envolvente opaca permite a obtenção de valores linearmente proporcionais à área de exposição ao meio exterior e inversamente proporcionais ao coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo. Por outro lado, o Energy Plus e o TRNSYS realizam uma análise dinâmica das trocas de calor com a envolvente exterior da habitação, dependendo assim os valores de perdas térmicas da diferença de temperatura na superfície interior e superfície exterior do elemento construtivo e historial de fluxos de calor entre as superfícies.

A análise dinâmica realizada pelas ferramentas computacionais permite um rigor superior na realização da simulação (admitindo que o ficheiro climático aplicado se encontre adequado ao dados climáticos da região) com a transferência de calor contínua entre o meio interior e exterior durante o

período de simulação, contabilizado a variação de temperatura e radiação solar incidente na face exterior na determinação das perdas térmicas pela envolvente opaca.

A figura 4.4 apresenta a visualização gráfica dos dados registados no quadro 4.7, permitindo assim uma avaliação composta das perdas térmicas pelas diferentes envolventes da habitação.

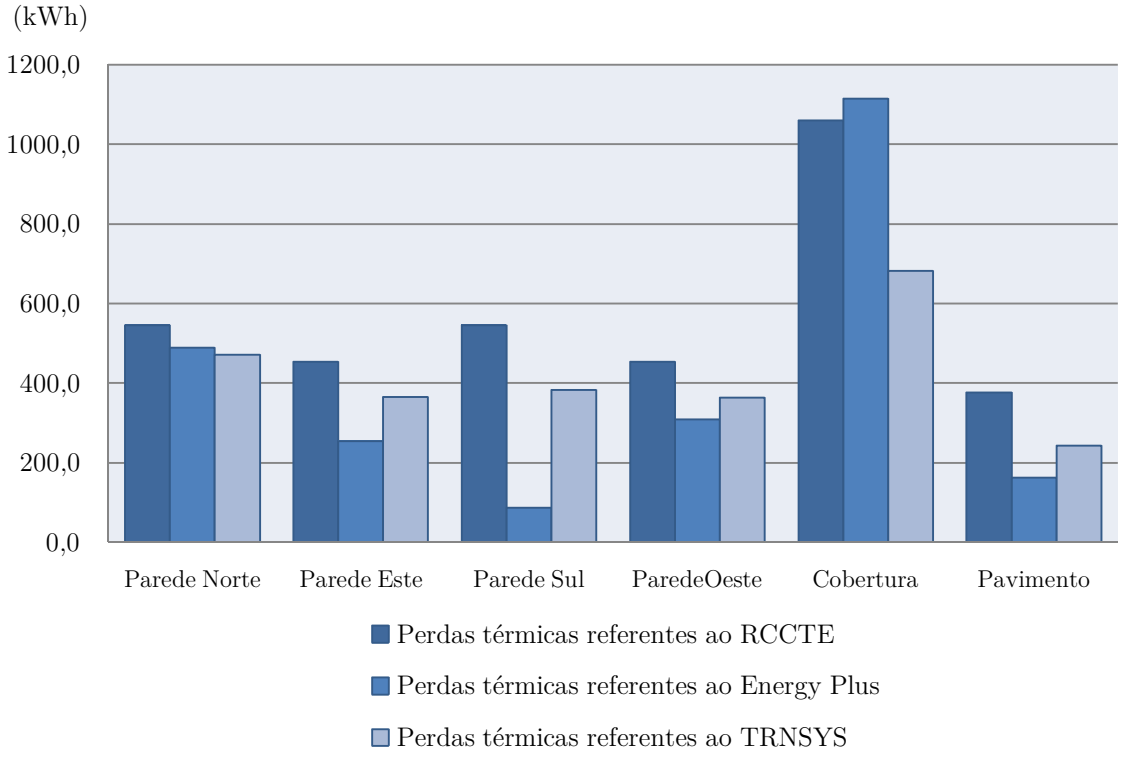


Figura 4.4 - Perdas térmicas pelas diferentes envolventes opacas da habitação, durante a estação de aquecimento

Na análise recorrendo às ferramentas computacionais, o Energy Plus apresenta maior sensibilidade à radiação incidente na superfície exterior, correspondendo a menores perdas térmicas nas superfícies com maior radiação incidente, como verificado principalmente na parede orientada a Sul. Devido à diferença de sensibilidades referida, a simulação realizada recorrendo ao TRNSYS, apesar da menor duração da estação de aquecimento, apresenta maiores perdas térmicas pela envolvente exterior associada às paredes verticais orientadas a Este, Sul e Oeste.

Relativamente à cobertura da habitação, o valor da reflectância associado à rugosidade considerada da camada superficial e valores inferiores de radiação incidente em superfícies horizontais, resultando em perdas térmicas superiores no Energy Plus comparativamente às estimadas pelo TRNSYS, apresentando assim um valor próximo do obtido recorrendo ao RCCTE.

Durante a estação de aquecimento, o RCCTE considera perdas térmicas superiores pelo pavimento em contacto com o solo, comparativamente com os resultados obtidos recorrendo às

ferramentas computacionais. O Energy Plus apresenta nos respectivos ficheiros climáticos os valores mensais de temperatura média do solo, utilizando uma metodologia de cálculo que considera o fluxo de calor em função da temperatura do solo, à semelhança do TRNSYS, resultando em valores inferiores aos considerados na metodologia de perdas por pontes térmicas lineares definida pelo RCCTE.

Da análise da figura 4.4, verifica-se que o RCCTE apresenta valores superiores de perdas térmicas pelas diferentes envolventes opacas da habitação, comparativamente aos valores estimados pelo Energy Plus e pelo TRNSYS, exceptuando nos dados do Energy Plus para a cobertura (associado à reflectância considerada). Um dos factores para tais resultados registados no RCCTE, encontram-se associado à não consideração da influência directa da radiação solar incidente na envolvente opaca, na definição de ganhos energéticos durante a estação de aquecimento.

Com valores superiores de perdas térmicas associadas à envolvente opaca, o RCCTE corresponde à ferramenta com maior estimativa de necessidades nominais de aquecimento no primeiro caso de estudo, 28,63 kWh/m^2.ano. As duas ferramentas computacionais apresentam valor semelhantes de necessidades de aquecimento, 20,70 e 20,90 kWh/m^2.ano, apesar da simulação do TRNSYS se encontrar associada a uma menor duração de estação de aquecimento.

As perdas pela envolvente opaca corresponderem tipicamente ao principal parâmetro que influencia o comportamento da habitação na estação de aquecimento, no entanto verifica-se que o primeiro caso de estudo corresponde exclusivamente à avaliação da transferência de calor pela envolvente opaca. Assim, os valores de necessidades de aquecimento não representam valores realistas da habitação, pois o primeiro caso de estudo não contabiliza os restantes fenómenos na avaliação do comportamento térmico, como o balanço energético pelos vãos envidraçados, renovação de ar e ganhos internos.

A determinação dos elementos construtivos com maiores perdas térmicas durante a estação de aquecimento toma principal relevância na análise dos principais elementos que penalizam o desempenho energético da habitação. A figura 4.5 apresenta as percentagens de perdas térmicas durante a estação de arrefecimento para os distintos elementos construtivos da envolvente exterior opaca da habitação, recorrendo às três ferramentas.

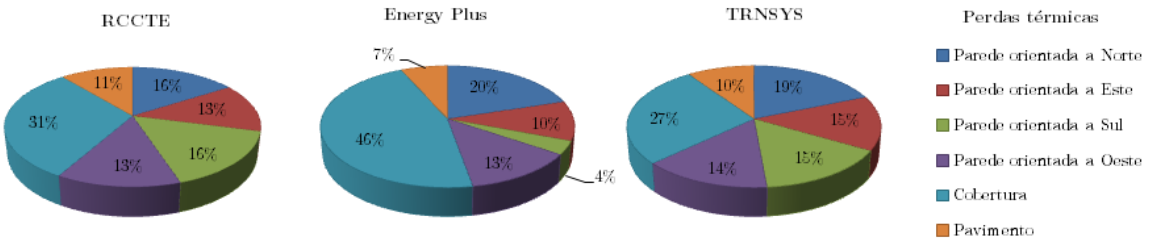


Figura 4.5 - Influência de cada elemento construtivo no desempenho térmico da habitação

A cobertura corresponde à solução construtiva com melhor coeficiente de transmissão térmica (U = 0,30 W/m^2.ºC), no entanto o valor superior de área de exposição (120 m^2) atribui à cobertura o elemento construtivo da habitação com maiores perdas térmicas para as três ferramentas. A análise realizada recorrendo ao Energy Plus indica uma influência superior da cobertura no comportamento térmico da habitação, pois a reflectância da superfície exterior é superior aos restantes elementos, resultando em menores ganhos associados à radiação solar.

O Energy Plus apresenta valores superiores de radiação solar incidente na parede vertical orientada a Sul e consequente valores inferiores de perdas térmicas, resultando numa influência significativamente inferior no comportamento térmico da habitação, comparativamente com o TRNSYS e o RCCTE. O oposto verifica-se na parede vertical orientada a Norte, com valores inferiores de radiação solar, considerando o Energy Plus e o TRNSYS uma influência superior no comportamento térmico da habitação, comparativamente com o RCCTE. As paredes verticais orientadas a Este e Oeste apresentam influências semelhantes no comportamento térmico da habitação, entre as três ferramentas.

No que respeita ao pavimento em contacto com o solo, as ferramentas computacionais Energy Plus e TNRSYS estimam valores inferiores de perdas térmicas durante a estação de aquecimento, comparativamente com o RCCTE, assim como a sua influência negativa no comportamento térmico da habitação.

4.5.2. Resultados na estação convencional de arrefecimento

Um dos principais parâmetros considerados pelas três ferramentas na definição dos ganhos térmicos pela envolvente opaca na estação convencional de arrefecimento é a radiação solar incidente. O quadro 4.8 apresenta os resultados de radiação solar incidente sobre cada elemento da envolvente opaca durante a estação de arrefecimento.

Quadro 4.8 - Radiação solar incidente sobre envolvente opaca da habitação

Envolvente exterior	**Radiação incidente (kWh/m^2)**		
	RCCTE	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Parede Dupla - Fachada Norte	200	263,18	218,92
Parede Dupla - Fachada Este	470	634,14	475,92
Parede Dupla - Fachada Sul	380	474,17	419,00
Parede Dupla - Fachada Oeste	470	466,22	488,74
Cobertura invertida	820	961,45	1242,97

Relativamente às paredes verticais da habitação, as três ferramentas apresentam valores semelhantes de radiação incidente durante a estação de arrefecimento, com um ligeiro acréscimo dos valores obtidos pelo Energy Plus, principalmente na orientação a Este. O TRNSYS considera valores superiores de radiação solar incidentes na cobertura, comparativamente ao RCCTE e Energy Plus.

O quadro 4.9 apresenta os resultados associados ao balanço energético dos elementos da envolvente opaca da habitação, fortemente dependentes dos valores de radiação solar incidente indicados no quadro anterior. Os valores de balanço energético do RCCTE são calculados com base na diferença entre os ganhos térmicos devido à radiação solar e as perdas térmicas por condução.

Quadro 4.9 - Balanço energético na envolvente opaca na estação de arrefecimento, de acordo com as três ferramentas

Envolvente exterior	**Balanço energético (kWh)**		
	RCCTE	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Parede Dupla - Fachada Norte	-50,68	-13,02	-59,89
Parede Dupla - Fachada Este	26,46	274,55	-2,86
Parede Dupla - Fachada Sul	4,27	213,23	-16,06
Parede Dupla - Fachada Oeste	26,46	123,43	1,79
Cobertura invertida	269,69	97,84	400,83
Pavimento térreo	-	-667,89	-325,28
Somatório da envolvente opaca da habitação	276,20	28,14	-1,47
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m².ano)	2,71	0,10	0,00

A figura 4.5 apresenta a visualização gráfica dos resultados indicados no quadro 4.9, permitindo a avaliação dos balanços energéticos e a confirmação de valores insignificativos em alguns elementos da envolvente opaca exterior.

Como constatado anteriormente, recorrendo ao Energy Plus, os ganhos térmicos associados à envolvente opaca dependem fortemente da radiação solar incidente, verificando-se valores superiores de balanço energético nas três fachadas com maior incidência solar, Este, Sul e Oeste, comparativamente a valores do RCCTE e TRNSYS. Na análise recorrendo ao RCCTE e TRNSYS, o balanço energético nas orientações Este, Sul e Oeste, apresenta valores positivos pouco significativos no comportamento térmico da habitação. A fachada orientada a Norte apresenta balanços energéticos negativos, devido a valores inferiores de exposição solar.

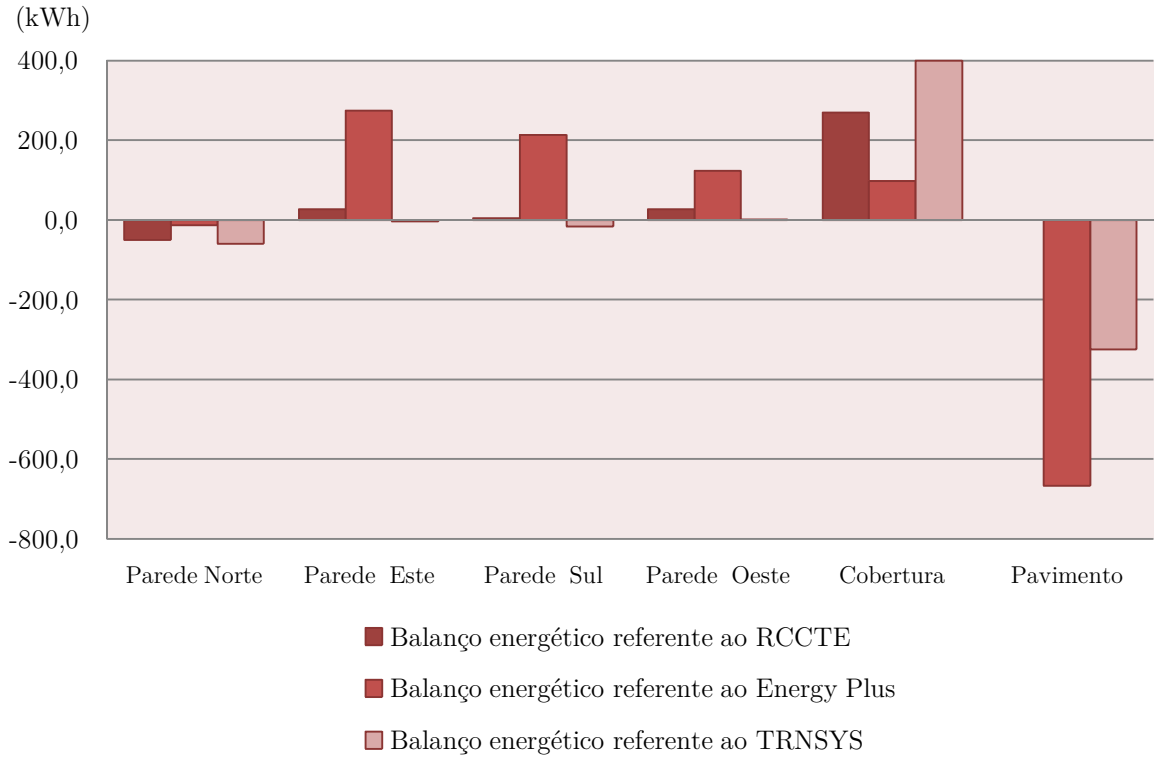


Figura 4.6 - Balanço energético nas diferentes envolventes opacas da habitação, durante a estação de arrefecimento

Relativamente à cobertura exterior, o resultado obtido no TRNSYS é o que apresenta valor superior de balanço energético devido ao valor elevado de radiação solar incidente na orientação horizontal. O Energy Plus apresenta o balanço energético inferior das três ferramentas na cobertura, associado ao valor de reflectância considerado na camada superior constituinte (rugosidade do material definido aumenta a reflectância), absorvendo menor radiação solar e consequentemente menores ganhos energéticos.

O pavimento é o elemento da envolvente opaca que introduz maiores divergências de resultados entre as três ferramentas. O RCCTE não considera perdas nem ganhos térmicos pelo pavimento em contacto com o solo, correspondendo a um procedimento que pode interferir na correcta avaliação do comportamento térmico de edifícios. Encontrando-se o solo a temperatura diferentes do interior da habitação (frequentemente temperaturas inferiores) ocorrem transferências energéticas entre o pavimento e o solo, favoráveis em estação de arrefecimento e com elevada influência para pisos a uma profundidade considerável.

As ferramentas computacionais apresentam um balanço energético negativo pelo pavimento, registando-se unicamente perdas térmicas, pois o solo encontra-se a uma temperatura inferior à temperatura de referência no interior da habitação. As perdas térmicas pelo pavimento são superiores no

Energy Plus, pois a temperatura no interior da habitação é superior à registada no TRNSYS, indicando uma diferença de temperatura interior e temperatura no solo superior e correspondentes superiores perdas térmicas.

Com recurso ao Energy Plus e ao TRNSYS, o balanço térmico positivo registado nas fachadas orientadas a Este, Sul e Oeste, e cobertura, são atenuados pelos valores negativos registados na fachada Norte e pelo pavimento, correspondendo assim a valores nulos ou insignificativos de necessidades nominais de arrefecimento. O RCCTE não considera as perdas térmicas ocorridas pelo pavimento em contacto com o solo, apresentando o balanço energético total pela envolvente opaca um valor positivo, 276,20 kWh, e respectivas necessidades energéticas de arrefecimento, 2,71 kWh/m^2.ano.

Torna-se importante mencionar que o primeiro caso de estudo, tem como objectivo o estudo da transferência de calor ocorridas na envolvente opaca, não correspondendo as necessidades energéticas de arrefecimento a valores realistas, pois não se considera os ganhos através de vãos envidraçados e ganhos internos, que proporcionam um aumento das necessidades nominais de arrefecimento. No entanto, com a introdução sequencial dos parâmetros térmicos mencionados espera-se averiguar a correspondência entre os mesmos na estação de arrefecimento e sua influência no comportamento térmico da habitação.

Capítulo 5 Influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico

O presente capítulo descreve a metodologia de cálculo aplicada pelas três ferramentas de avaliação do comportamento térmico de edifícios na determinação das perdas e ganhos térmicos associados aos vãos envidraçados. Apresenta-se os resultados obtidos no segundo caso de estudo, nomeadamente a influência da orientação dos vãos envidraçados, com o resultado do balanço energético total associado, bem como a influência da colocação de palas de sombreamento horizontais na redução dos ganhos solares. Descreve-se a metodologia para o cálculo do balanço energético associado aos vãos envidraçados, de acordo com o RCCTE (subsecção 5.1), Energy Plus (subsecção 5.2) e TRNSYS (subsecção 5.3). Os resultados do segundo caso de estudo encontram-se na subsecção seguinte (subsecção 5.4). A última subsecção apresenta a compilação e comparação de resultados obtidos para as três ferramentas e respectiva análise crítica (subsecção 5.5).

5.1. Metodologia de cálculo de acordo com o RCCTE

O RCCTE considera perdas de calor por condução através dos vãos envidraçados durante toda a estação de aquecimento e arrefecimento. Para ambas as estações são contabilizados ganhos solares, um fenómeno benéfico na diminuição das necessidades de aquecimento, mas penalizador com o aumento das necessidades de arrefecimento.

No segundo caso de estudo torna-se necessário a definição das perdas térmicas associadas aos vãos envidraçados, definição da influência da orientação dos vãos envidraçados e protecção com palas de sombreamento horizontais nos ganhos solares associados.

5.1.1. Determinação das perdas térmicas pelos vãos envidraçados

O procedimento de cálculo na determinação das perdas térmicas pelos vãos envidraçados é idêntico ao associado à condução de calor pela envolvente opaca, com base no coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado (U), área de exposição ao meio exterior (A) e diferença entre a temperatura no interior da habitação (θ_i) e o meio exterior (θ_{atm}).

O cálculo das perdas térmicas pelos vãos envidraçados (Q_{ext}), durante a estação de aquecimento, encontra-se descrito na expressão (5.1), com a introdução do parâmetro de cálculo graus-dias (GD). A expressão (5.2) indica o cálculo das perdas térmicas pelos vãos envidraçados, durante a estação de arrefecimento, com base no valor da temperatura média do ar exterior (θ_m).

$$Q_{ext} = 0{,}024.U.A.GD \quad (kWh) \tag{5.1}$$

$$Q_{ext} = 2{,}928.U.A.(\theta_i - \theta_m) \quad (kWh) \tag{5.2}$$

A consulta do quadro III.2 da publicação do LNEC *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [27], permite a recolha de coeficientes de transmissão térmicas de vãos envidraçados com base na solução adoptada, material da caixilharia e dispositivo de oclusão nocturna.

5.1.2. Determinação de ganhos solares pelos vãos envidraçados na estação de aquecimento

O cálculo dos ganhos solares através dos vãos envidraçados pode ser realizado recorrendo a duas metodologias, uma simplificada (com base na conjugação simultânea de vários parâmetros) e uma detalhada. Na análise da influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação, no segundo caso de estudo, aplica-se a metodologia detalhada.

Com base na metodologia detalhada, na estação de aquecimento os ganhos solares (Q_s) são calculados pela seguinte equação:

$$Q_s = G_{sul}.\sum_j \left[X_j.\sum_n A_{snj} \right].M \quad (kWh) \tag{5.3}$$

em que:

G_{sul} - energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul (kWh/m^2.mês);

X_j - factor de orientação para as diferentes exposições;

A_{snj} - área efectiva colectora da radiação solar da superfície n com a orientação j (m^2);

M - duração da estação de aquecimento (meses).

A equação (5.4) indica o cálculo do valor da área efectiva do vão envidraçado (A_{snj}), parâmetro fundamental no cálculo dos ganhos solares na estação de aquecimento e arrefecimento.

$$A_{snj} = A.F_s.F_g.F_w.g_{\perp} \quad (kWh) \tag{5.4}$$

em que:

A - área do vão envidraçado (m^2);

F_s - factor de obstrução;

F_g - fracção envidraçada;

F_w - factor de correcção da selectividade angular dos envidraçados;

$g_{\perp}$ - factor solar do vão envidraçado para radiação incidente na perpendicular.

O factor solar do vão envidraçado ($g_{\perp}$) é um parâmetro que representa a relação entre a energia solar transmitida para o interior da habitação através do vão envidraçado em relação à radiação solar incidente na direcção normal ao envidraçado. O factor de obstrução (F_s) varia entre 0 e 1, representando a redução da radiação incidente no vão envidraçado devido ao sombreamento permanente de palas de sombreamento verticais, horizontais e obstruções relacionadas com a envolvente exterior do edifício, como vegetação e outros edifícios. A fracção envidraçada (F_g) traduz a redução da transmissão de energia solar associada à existência da caixilharia, sendo dada pela relação entre a área envidraçada e a área total do vão envidraçado. O factor de correcção da selectividade angular dos envidraçados (F_w) traduz a redução dos ganhos solares causada pela variação das propriedades do vidro com o ângulo de incidência da radiação solar directa. A determinação dos factores mencionados realiza-se recorrendo a quadros fornecidos no anexo IV do RCCTE.

5.1.3. Determinação de ganhos solares pelos vãos envidraçados na estação de arrefecimento

O cálculo dos ganhos solares através dos vãos envidraçados na estação de arrefecimento apresenta semelhanças com o procedimento referido para a estação de aquecimento. Os ganhos solares (Q_s)são calculados recorrendo à expressão (5.5).

$$Q_s = \sum_j \left[Ir_j . \sum_n A_{snj} \right] \quad (kWh) \tag{5.5}$$

em que:

Ir_j - energia solar incidente nos envidraçados durante a estação convencional de arrefecimento, por orientação j (kWh/m^2);

A_{snj} - área efectiva colectora da radiação solar da superfície n com a orientação j (m^2).

A área efectiva do vão envidraçado (A_{snj}) calcula-se recorrendo à equação (5.4), onde as respectivas variáveis apresentam significado idêntico. Devido a relações angulares distintas entre Inverno e Verão, os valores dos diversos factores são obtidos consultando tabelas diferentes, fornecidas no anexo V do RCCTE. De acordo com o RCCTE, o factor solar do vão envidraçado ($g_\perp$) deve ser tomado com dispositivos de sombreamento móveis activados a 70%, correspondendo o factor solar do vão envidraçado o somatório de 30% do factor solar do vidro e 70% do factor solar do vão envidraçado com protecção solar móvel actuada. A definição do factor solar do vão envidraçado com a protecção solar móvel actuada depende da tipologia da protecção, material e ainda a sua cor, baseada no coeficiente de reflexão da superfície exterior.

5.2. Metodologia de cálculo de acordo com o Energy Plus

Na determinação de transferência de calor por condução através dos vãos envidraçados, o Energy Plus aplica procedimento idêntico ao descrito para a envolvente opaca, realizando uma análise dinâmica em função da temperatura na superfície interior e exterior do envidraçado e histórico de fluxos de calor anteriormente decorridos.

As temperaturas das superfícies dos vãos envidraçados são determinadas com a resolução de equações de balanço de calor para cada superfície em cada intervalo de análise. Na derivação das equações de balanço de calor são consideradas as seguintes simplificações:

- As camadas de vidro são finas o suficiente para considerar a sua capacidade de armazenamento de calor nula;
- O fluxo de calor é perpendicular e linear entre faces, sendo posteriormente realizadas correcções para contabilizar feitos de condução em duas direcções na lâmina de ar entre as duas camadas de vidro;

- As camadas de vidro são opacas à radiação infra-vermelha;
- As faces do vidro são isotérmicas, pois apresentam uma condutibilidade térmica elevada.

Apresenta-se as variáveis associadas ao cálculo de balanço de calor num vão envidraçado, com duas camadas de vidro separadas por uma lâmina de ar, nas equações (5.6), (5.7), (5.8) e (5.9) e representadas na figura 5.1

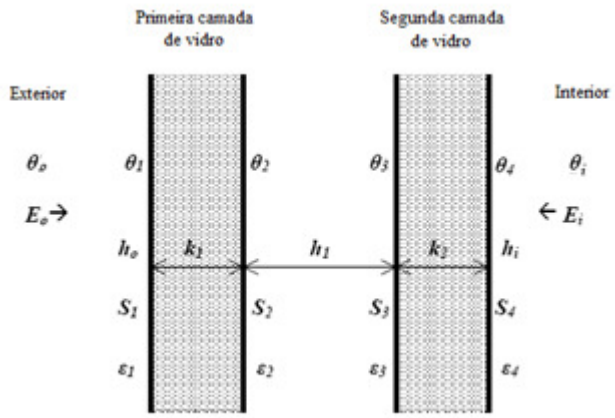


Figura 5.1 - Esquema das variáveis da equação de balanço de calor no vão envidraçado [17]

θ_e - temperatura exterior (ºC);

θ_i - temperatura no interior da habitação (ºC);

E_e - radiação de onda longa incidente na face exterior do vão envidraçado (W/m²);

E_i - radiação de onda longa incidente na face interior do vão envidraçado (W/m²);

θ_j - temperatura na face j (ºC);

S_i - radiação de ondas longas e ondas curtas absorvidas pela face i (W/m²);

ε_i - emissividade da face i;

h_o - condutância térmica superficial exterior (W/m².ºC);

h_i - condutância térmica superficial interior (W/m².ºC);

k_i - coeficiente de transmissão térmica do vidro i (W/m².ºC);

h_j - coeficiente de transmissão térmica de ar j (W/m².ºC).

Cada vão envidraçado com n camadas de vidro, apresenta $2n$ superfícies, sendo necessário a resolução de $2n$ equações. As quatro equações seguintes representam os cálculos associados ao balanço de calor no vão envidraçado composto por duas camadas de vidro e uma lâmina de ar.

$$E_e\varepsilon_1 - \varepsilon_1\sigma\theta_1^4 + k_1\left(\theta_2 - \theta_1\right) + h_o\left(\theta_e - \theta_1\right) + S_1 = 0 \tag{5.6}$$

$$k_1\left(\theta_1 - \theta_2\right) + h_1\left(\theta_3 - \theta_2\right) + \sigma\frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{1-\left(1-\varepsilon_2\right)\left(1-\varepsilon_3\right)}\left(\theta_3^4 - \theta_2^4\right) + S_2 = 0 \tag{5.7}$$

$$h_1\left(\theta_2 - \theta_3\right) + k_2\left(\theta_4 - \theta_3\right) + \sigma\frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{1-\left(1-\varepsilon_2\right)\left(1-\varepsilon_3\right)}\left(\theta_2^4 - \theta_3^4\right) + S_3 = 0 \tag{5.8}$$

$$E_i\varepsilon_4 - \varepsilon_4\sigma\theta_4^4 + k_2\left(\theta_3 - \theta_4\right) + h_i\left(\theta_i - \theta_4\right) + S_4 = 0 \tag{5.9}$$

Ao longo do período de simulação do comportamento térmico do edifício, o Energy Plus permite o cálculo associado aos ganhos solares pelos vãos envidraçados, com base numa calendarização da posição e intensidade da radiação solar. A posição solar é descrita em função de três cosenos de direcção, convenientes na determinação do ângulo de incidência dos raios solares nas superfícies exteriores do edifício. Os valores da declinação solar, dependentes da latitude do local de implantação, e equações de tempo são baseados nos algoritmos astronómicos de Jean Meeus [18].

5.3. Metodologia de cálculo de acordo com o TRNSYS

O TRNSYS permite a análise de um vão envidraçado constituído por um número máximo de seis camadas individuais de vidro e cinco lâminas de ar entre elas. Cada superfície do vidro apresenta uma temperatura própria e a superfície interior encontra-se em directo contacto com a habitação e sua temperatura interior. Na superfície exterior do vão envidraçado realizam-se transferências de calor com o meio exterior através de convecção e radiação de onda longa. A capacidade de armazenamento de calor dos vidros e das lâminas de ar é desprezada.

A temperatura em cada camada de vidro do vão envidraçado é calculada considerando os fenómenos de transmissão, absorção e reflexão de radiação solar incidente directa e a transferência de calor por condução, convecção e radiação de onda longa através dos diversos elementos do vão envidraçado, como indicado na figura 5.2.

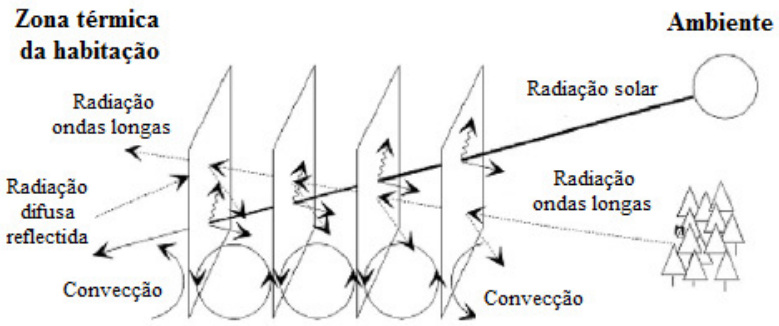


Figura 5.2 - Modelo do vão envidraçado [26]

O TRNSYS adopta uma metodologia de cálculo na determinação do balanço energético associado aos vãos envidraçados semelhante à aplicada no Energy Plus. O componente relativo ao edifício multizona, *Type* 56, realiza uma iteração de cálculos para os vãos envidraçados da zona térmica até a radiação solar incidir no interior da habitação. Após a distribuição da radiação solar, o algoritmo de cálculo determina as temperaturas nas superfícies do vão envidraçado. A absorção de radiação de onda curta provoca um aumento das temperaturas nas superfícies do vidro, o que conduz a um fluxo de calor para o interior ou exterior da habitação, procedendo-se a uma iteração das temperaturas das superfície do vão envidraçado até um valor de tolerância definido.

5.4. Resultados obtidos no segundo caso de estudo

Na presente subsecção encontram-se os resultados associados à influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação, recorrendo à metodologia adoptada no RCCTE, Energy Plus e TRNSYS. Com base na primeira e segunda simulações do segundo caso de estudo, compila-se os resultados permitindo a análise da influência da orientação dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação. A combinação dos resultados obtidos nas quatro simulações realizadas permite a análise da diminuição dos ganhos solares associados às palas de sombreamento horizontais. A análise dos parâmetros térmicos associados à determinação das necessidades energéticas realiza-se com base na terceira simulação.

5.4.1. Resultados obtidos recorrendo ao RCCTE

De acordo com a publicação do LNEC *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [27], a solução construtiva do vão envidraçado com dois vidros e uma espessura de lâmina de ar de 14 mm, com caixilharia metálica com corte térmico, apresenta o coeficiente de transmissão térmica de 2,8 W/m^2.ºC. O valor apresentado corresponde a um coeficiente de transmissão térmico médio dia-noite do vão envidraçado, incluindo a contribuição dos dispositivos de oclusão nocturna. A metodologia do RCCTE considera os dispositivos de protecção solar móveis desactivados durante a estação de aquecimento. Durante a estação de arrefecimento os dispositivos de protecção solar consideram-se activados a 70 %.

5.4.1.1. Influência da orientação dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação

A recolha dos resultados das duas primeiras simulações realizadas com recurso ao RCCTE permite a criação do quadro 5.1, com a indicação da radiação solar incidente (I_r), a área efectiva do vão envidraçado (A_{snj}) e balanço energético associado aos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 com diferentes orientações, durante a estação de aquecimento.

Quadro 5.1 - Influência da orientação dos vãos envidraçados na estação de aquecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Ir (kWh/m^2)**	**A_{snj} (m^2)**	**Balanço energético (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	572,40	0,24	24,35
Orientação a Norte	1,40	154,55	0,53	-30,17
Orientação a Este	1,40	320,54	0,31	-13,57
Orientação a Oeste	1,40	320,54	0,31	-13,57

As perdas térmicas por condução dos quatro vãos envidraçados são idênticas, com o valor de 111,96 kWh, pois apresentam valor igual de área. O balanço energético exposto no quadro anterior resulta na soma algébrica entre os ganhos solares (influenciados pela radiação solar incidente e área efectiva do vão envidraçado) e as perdas térmicas.

Na estação de aquecimento, a radiação solar incide principalmente nos vãos envidraçados orientados a Sul, seguido pela orientação a Este e Oeste, correspondendo a orientação Norte à menor radiação solar incidente. O factor de sombreamento do horizonte diminui a área efectiva do vão envidraçado quanto superiores os valores de radiação solar incidente numa determinada orientação.

Apesar de apresentar o menor valor de área efectiva colectora de radiação solar, os vãos envidraçados orientados a Sul fornecem maiores ganhos solares à habitação na estação de aquecimento, correspondendo à única orientação que resulta num balanço energético positivo, no caso de estudo analisado.

Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam valores idênticos de ganhos solares, 93,39 kWh, no entanto o valor das perdas térmicas são superiores, resultando num balanço energético negativo de 13,57 kWh. Apesar de apresentar o valor superior de área efectiva, no vão envidraçado orientado a Norte o valor de radiação solar incidente é inferior aos restantes, correspondendo assim à orientação com menores ganhos solares, 81,79 kWh e inferior balanço energético, na estação de aquecimento.

O quadro 5.2 apresenta os resultados dos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 e orientações distintas, resultantes da combinação de dados das duas primeiras simulações, na estação de arrefecimento.

Quadro 5.2 - Influência da orientação dos vãos envidraçados na estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**I_r (kWh/m^2)**	**A_{snj} (m^2)**	**Balanço energético (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	380	0,18	44,91
Orientação a Norte	1,40	200	0,19	15,14
Orientação a Este	1,40	470	0,20	72,18
Orientação a Oeste	1,40	470	0,20	72,18

Nos quatro vãos envidraçados indicados, as perdas térmicas por condução são de 22,96 kWh na estação de arrefecimento, apresentando assim os quatro elementos balanço energético positivo, pois os ganhos solares são superiores às perdas térmicas.

A área efectiva colectora de radiação solar apresenta valores semelhantes para as quatro orientações analisadas, sendo influenciada pela activação dos dispositivos de protecção solar móveis e pela fracção do envidraçado. Assim, os ganhos solares na estação de arrefecimento dependem principalmente da radiação solar incidente, correspondendo a orientação Este e Oeste os principais ganhos solares, 95,14 kWh e consequente balanço energético positivo 72,18 kWh. O valor envidraçado

orientado a Sul apresenta um balanço energético de 44,91 kWh, superando o valor registado no vão envidraçado orientado a Norte com o valor de 15,14 kWh.

A figura 5.3 representa o balanço energético associado aos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 por cada mês da estação de aquecimento e arrefecimento, permitindo assim a comparação directa entre as respectivas orientações em ambas as estações convencionais analisada.

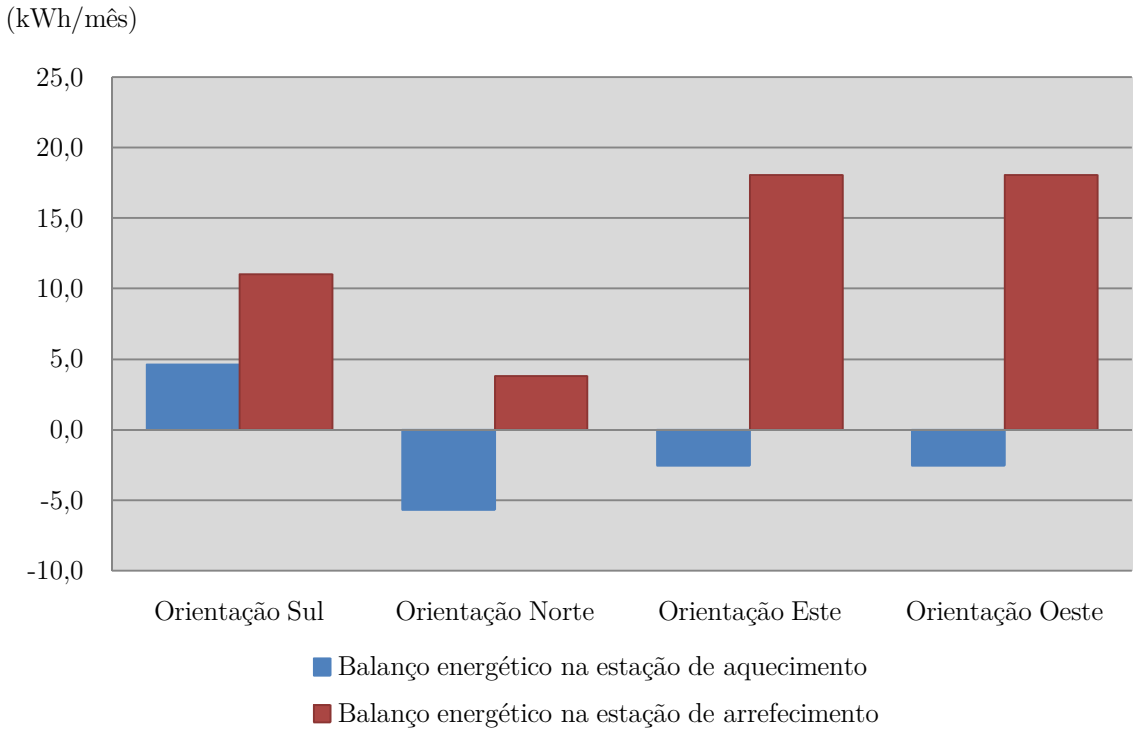


Figura 5.3 - Balanço energético dos vãos envidraçados, de acordo com o RCCTE

O RCCTE considera que os vãos envidraçados orientados a Norte, Este e Oeste apresentam um balanço energético negativo na estação de aquecimento e balanço energético positivo na estação de arrefecimento, resultando numa influência negativa no comportamento térmico da habitação com o aumento das necessidades energéticas.

Nos vãos envidraçados orientados a Sul, apesar de apresentarem balanço energético positivo na estação de aquecimento, o balanço energético positivo na estação de arrefecimento é superior, conferindo um aumento das necessidades de arrefecimento superiores à diminuição das necessidades de aquecimento.

Assim, os resultados obtidos recorrendo ao RCCTE indicam que os vãos envidraçados influenciam negativamente o comportamento térmico da habitação, associado aos valores elevados de perdas térmicas na estação de aquecimento e ganhos solares na estação de arrefecimento.

5.4.1.2. Influência de palas de sombreamento horizontais sobre os vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação

A combinação dos resultados obtidos no decorrer das quatro simulações realizadas no segundo caso de estudo permite a elaboração do quadro 5.3, com os resultados associados aos vãos envidraçados durante a estação de aquecimento, nomeadamente a diferença de ganhos solares associados a cada orientação com a colocação de palas de sombreamento.

Quadro 5.3 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de aquecimento

Vãos envidraçados	**Área** (m²)	**Perdas térmicas** (kWh)	**Sem sombreamento**		**Com sombreamento**	
			A_{snj} (m²)	**Ganhos solares** (kWh)	**A_{snj}** (m²)	**Ganhos solares** (kWh)
Orientação a Sul	1,40	111,96	0,24	136,31	0,19	109,05
Orientação a Norte	1,40	111,96	0,14	81,79	0,14	81,79
Orientação a Este	1,40	111,96	0,17	98,39	0,15	86,94
Orientação a Oeste	1,40	111,96	0,17	98,39	0,15	86,94

Na estação de aquecimento, a colocação de sombreamentos horizontais sobre os vãos envidraçados orientados a Sul, Este e Oeste reduz a área efectiva colectora de radiação solar (A_{snj}), resultando na diminuição dos ganhos solares e não afectando as perdas térmicas. Assim, nas três orientações referidas, verifica-se a diminuição do balanço energético associado aos vãos envidraçados e correspondente aumento das necessidades nominais de aquecimento. O vão envidraçado orientado a Norte não apresenta reduções de ganhos solares com a colocação da pala de sombreamento horizontal.

Com maior radiação solar incidente, a orientação Sul apresenta maiores diminuições de ganhos solares e correspondente balanço energético, 27,26 kWh. Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste, com área de 1,40 m^2 apresentam uma diminuição de 11,45 kWh no balanço energético.

À semelhança do quadro anteriormente elaborado, com a combinação de resultados obtidos durante a estação de arrefecimento apresenta-se o quadro 5.4, indicando a diferença entre ganhos solares nos vãos envidraçados antes e após a colocação de sombreamento horizontal.

Quadro 5.4 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	Área (m²)	Perdas térmicas (kWh)	Sem sombreamento		Com sombreamento	
			A_{snj} (m²)	Ganhos solares (kWh)	A_{snj} (m²)	Ganhos solares (kWh)
Orientação a Sul	1,40	22,96	0,18	67,87	0,13	49,55
Orientação a Norte	1,40	22,96	0,19	38,10	0,19	37,55
Orientação a Este	1,40	22,96	0,20	95,14	0,17	77,82
Orientação a Oeste	1,40	22,96	0,20	95,14	0,17	77,82

Na estação de arrefecimento, todas as orientações dos vãos envidraçados são influenciadas pela colocação de palas de sombreamento horizontais, resultando em menores necessidades energéticas consequentes da diminuição dos ganhos solares associados aos vãos envidraçados.

As orientações Sul, Este e Oeste apresentam uma redução semelhante de ganhos solares e balanço energético, 18,32, 17,32 e 17,32 kWh, respectivamente, com a colocação das palas de sombreamento sobre os vãos envidraçados com área de 1,40 m². No vão envidraçado orientado a Norte apenas se verifica a redução do balanço energético de 0,55 kWh.

A figura 5.4 apresenta os resultados combinados dos quadros 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, com a indicação da diminuição do balanço energético dos vãos envidraçados com área de 1,40 m², na estação de aquecimento e arrefecimento.

De acordo com o RCCTE, os vãos envidraçados orientados a Sul são os que apresentam maior diminuição de ganhos solares devido à colocação de sombreamentos horizontais, em ambas as estações convencionais. Como a diminuição do balanço energético analisado na estação de aquecimento é superior à verificada na estação de arrefecimento, o comportamento térmico da habitação é influenciado negativamente pela colocação de palas de sombreamento sobre vãos envidraçados orientados a Sul.

A colocação de sombreamentos horizontais nos vãos envidraçados orientados a Este e Oeste resulta numa maior influência na diminuição dos ganhos solares na estação de arrefecimento, comparativamente à estação de aquecimento, correspondendo a uma situação favorável no comportamento térmico da habitação.

Os vãos envidraçados orientados a Norte não são significativamente influenciados pela presença de sombreamento horizontais, verificando-se apenas uma ligeira diminuição dos ganhos solares em estação de arrefecimento.

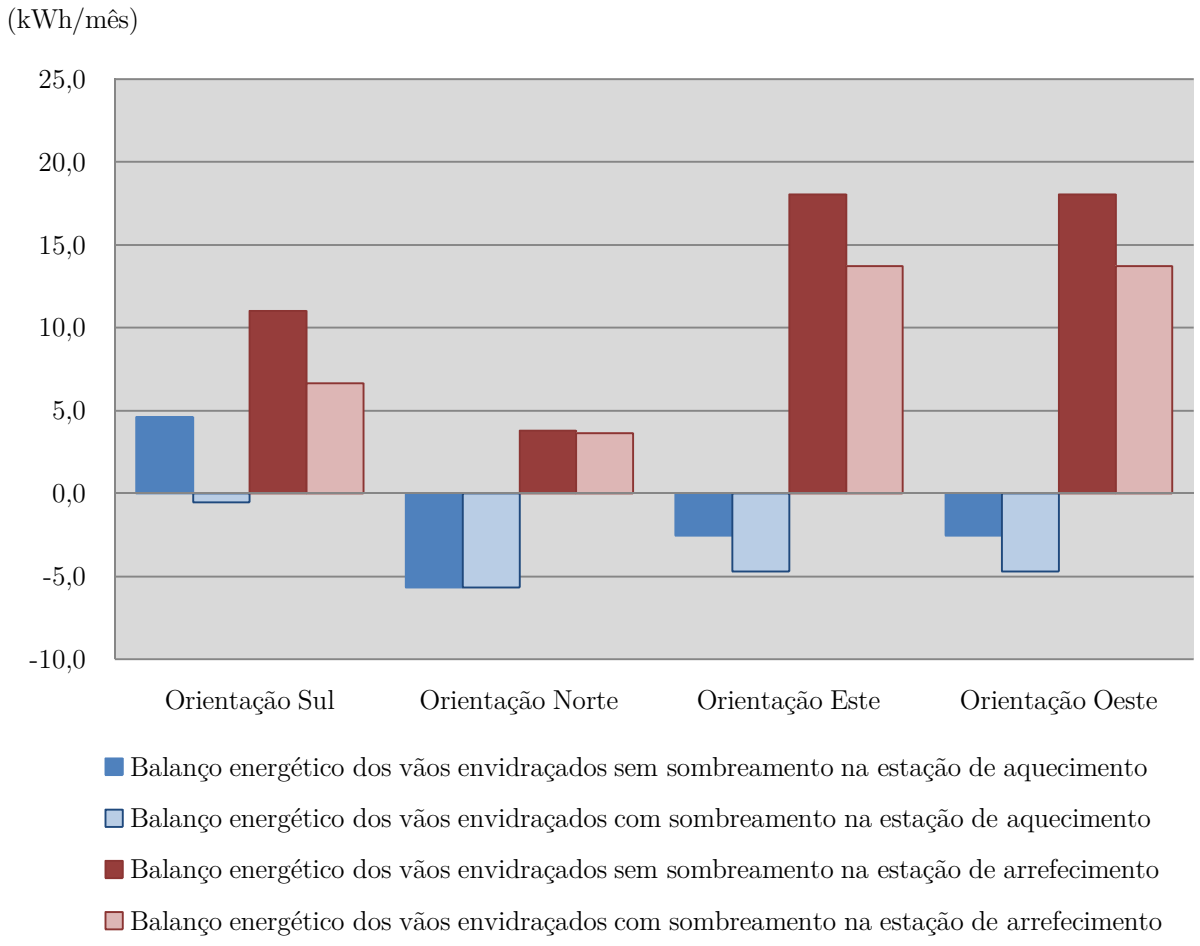


Figura 5.4 - Balanço energético dos vãos envidraçados, sem e com sombreamento, de acordo com o RCCTE

5.4.2. Resultados obtidos recorrendo ao Energy Plus

Na presente subsecção realiza-se a compilação dos resultados obtidos nas diversas simulações do segundo caso de estudo, permitindo a análise da influência da orientação no balanço energético associado aos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 e a alteração de balanço energético associado à colocação de palas de sombreamento horizontais sobre os vãos envidraçados.

Para efeitos de comparação de resultados com a metodologia do RCCTE e TRNSYS, torna-se necessário a definição de idêntica solução construtiva dos vãos envidraçados, sendo constituído por duas camadas de vidro com 4 mm de espessura, separados por uma lâmina de ar de 14 mm, montados sobre uma caixilharia metálica. O Energy Plus apresenta uma biblioteca de materiais de vãos envidraçados, indicando as respectivas propriedades como transparência, diversos tipos de gases entre os vidros, materiais de caixilharia e dispositivos de protecção solar. Enquanto a definição dos materiais a utilizar no vão envidraçado apresenta uma facilidade na criação de elementos idênticos aos aplicados no RCCTE, a

definição da influência dos dispositivos de protecção solar móveis apresenta uma componente subjectiva, fortemente associada à optimização dos ganhos solares pelos vãos envidraçados. O Energy Plus permite a definição de um horário automático da activação dos estores ao longo do dia, apresentando ainda inúmeros tipos de controlos pré-definidos relacionados com a sua activação conforme valores de temperatura interior ou exterior, radiação solar incidente, entre outros.

Na estação de aquecimento define-se um horário que considera a activação dos estores em período nocturno, não actuando em período diurno, permitindo maximizar os ganhos solares associados aos vãos envidraçados, encontrando-se de acordo com os pressupostos admitidos no RCCTE.

O controlo utilizado na estação de arrefecimento corresponde ao *On Night if Low Outdoor Temp and On Day if Cooling*, definindo a activação dos estores em período nocturno quando a temperatura exterior é inferior a uma temperatura de referência (considerada 20 ºC) e a activação em período diurno quando a habitação apresenta necessidades de arrefecimento.

5.4.2.1. Influência da orientação dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação

Na realização da análise da influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação compila-se aos resultados obtidos nas primeiras duas simulações realizadas sobre os vãos envidraçados com valor idêntico de área, orientações distintas e sem sombreamento. Os resultados obtidos na estação de aquecimento encontram-se descritos no quadro 5.5, com a indicação do balanço energético total, correspondendo ao somatório dos ganhos solares por radiação e balanço energético por condução.

Quadro 5.5 - Influência da orientação dos vãos envidraçados na estação de aquecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Balanço energético por condução (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético total (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	-42,33	223,99	181,67
Orientação a Norte	1,40	-87,96	58,92	-29,04
Orientação a Este	1,40	-70,66	119,23	48,57
Orientação a Oeste	1,40	-76,00	107,27	31,27

Com base nos resultados do primeiro caso de estudo, verifica-se que na estação de aquecimento a orientação a Sul apresenta os valores superiores de radiação solar incidente, seguidos pela orientação Este e Oeste. Valores semelhantes verificam-se no estudo da influência dos vãos envidraçados, onde a radiação

solar influencia directamente a diminuição das perdas térmicas, associadas ao balanço energético por condução, e aumento dos ganhos solares.

Os vãos envidraçados orientados a Sul favorecem o comportamento térmico da habitação em estação de aquecimento, com um balanço energético significativo de 181,67 kWh, associado a uma área de 1,40 m^2. Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste, apesar de se verificar um valor reduzido de balanço energético por condução, apresentam ganhos solares que compensam as perdas térmicas, correspondendo a um balanço energético total positivo e influência benéfica na habitação durante a estação de aquecimento. Os vãos envidraçados orientados a Norte não apresentam ganhos solares significativos, correspondendo a um balanço energético negativo e consequente penalização no comportamento térmico durante a estação de aquecimento.

O quadro 5.6 apresenta os resultados associados ao comportamento térmico dos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2, durante a estação de arrefecimento.

Quadro 5.6 - Influência da orientação dos vãos envidraçados na estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Balanço energético por condução (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético total (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	-7,87	95,86	87,99
Orientação a Norte	1,40	-27,70	76,81	49,12
Orientação a Este	1,40	4,12	152,63	156,75
Orientação a Oeste	1,40	-10,17	104,97	94,80

Com base nos resultados do primeiro caso de estudo, a orientação Este apresenta valores superiores de radiação solar incidente, comparativamente com a orientação Oeste, 176,15 e 129,51 W/m^2, respectivamente. Com base nos dados referidos, verifica-se valores superiores de ganhos solares por radiação e balanço energético nos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 orientados a Este, comparativamente à orientação Oeste. O vão envidraçado orientado a Sul apresenta o valor de balanço energético total de 87,99 kWh, inferior aos registados na orientação Este e Oeste. O vão envidraçado orientado a Norte é o que apresenta balanço energético inferior.

Na estação de arrefecimento, as quatro orientações distintas dos vãos envidraçados influenciam negativamente o comportamento térmico da habitação, com um balanço energético positivo e consequente aumento das necessidades energéticas de arrefecimento.

Os resultados indicados nos quadros 5.5 e 5.6, para a estação de aquecimento e arrefecimento, respectivamente, permitem a elaboração da figura 5.5, com valores do balanço energético dos vãos envidraçados com diferentes orientações, sem palas de sombreamento horizontais.

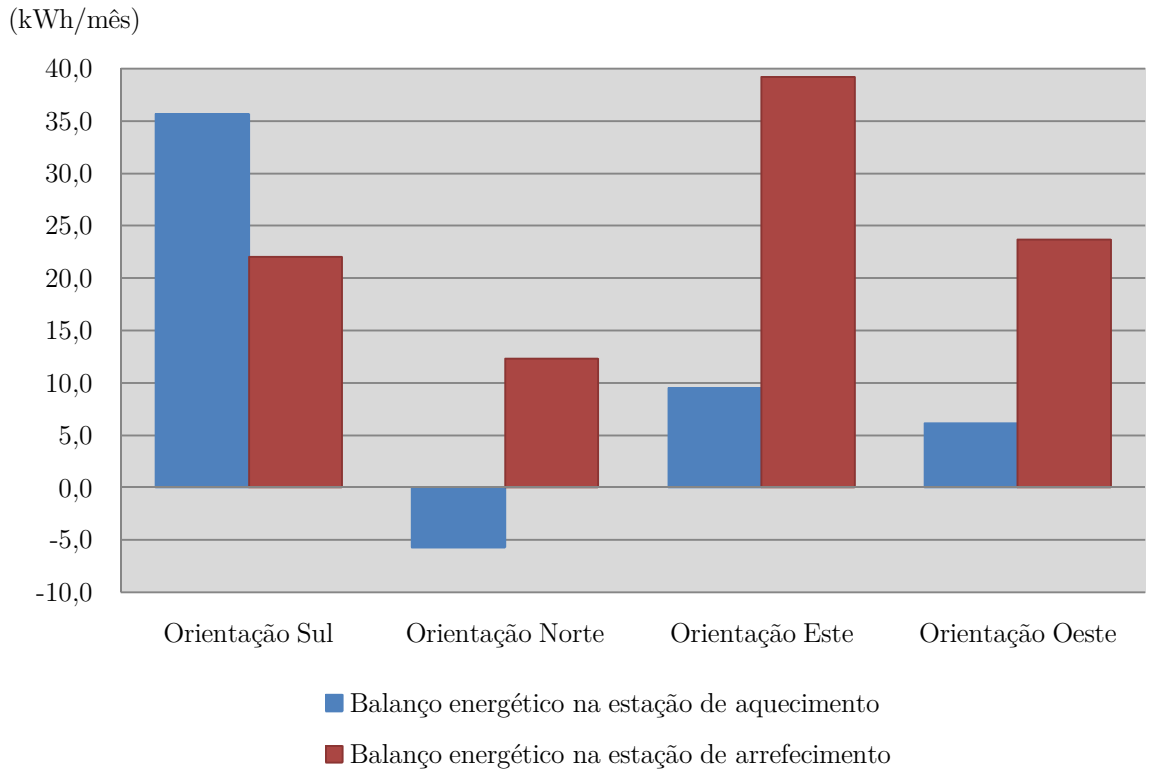


Figura 5.5 - Balanço energético dos vãos envidraçados, de acordo com o Energy Plus

De acordo com os resultados indicados na figura 5.5, os vãos envidraçados orientados a Sul apresentam um benefício na estação de aquecimento superior à influência negativa na estação de arrefecimento, correspondendo a uma orientação adequada em termos de comportamento térmico. Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam um comportamento oposto, onde a influência benéfica na estação de aquecimento é muito inferior ao balanço energético positivo na estação de arrefecimento, não correspondendo às orientações ideais de optimização do comportamento térmico da habitação, de acordo com o Energy Plus. A orientação Norte, com um balanço energético negativo na estação de aquecimento e positivo na estação de arrefecimento, corresponde a uma solução inadequada no comportamento térmico da habitação para a colocação de vãos envidraçados.

5.4.2.2. Influência de palas de sombreamento horizontais sobre os vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação

As simulações realizadas permitem a compilação de resultados associados aos vãos envidraçados com 1,40 m^2 de área e análise da influência das palas de sombreamento horizontais na redução do balanço energético associado às diferentes orientações dos vãos envidraçados. O quadro 5.7 apresenta os resultados obtidos durante a estação de aquecimento.

Quadro 5.7 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de aquecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Sem sombreamento**		**Com sombreamento**	
		Ganhos solares por radiação (kWh)	**Balanço energético (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	223,99	181,67	197,50	150,89
Orientação a Norte	1,40	58,92	-29,04	54,03	-49,70
Orientação a Este	1,40	119,23	48,57	108,97	38,50
Orientação a Oeste	1,40	107,27	31,27	95,99	20,11

Analisando o quadro anterior verifica-se que as quatro orientações são influenciadas pela presença do sombreamento horizontal, com a diminuição dos ganhos solares e balanço energético total. Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam uma diminuição de balanço energético semelhante de 11,16 kWh e 10,07 kWh, respectivamente, associada à diminuição dos ganhos solares. A orientação Norte apresenta uma variação negativa de 20,66 kWh, associada a maiores perdas térmicas por condução. A envolvente orientada a Sul apresenta valores superiores de radiação solar, logo a colocação sombreamentos sobre os vãos envidraçados orientados a Sul conduz a uma redução significativa do balanço energético associado, aproximadamente 30,78 kWh, para o vão envidraçado com área de 1,40 m^2.

Nos vãos envidraçados com diferentes orientações analisados, verifica-se a diminuição do balanço energético com a colocação de palas de sombreamento horizontais com 20 cm de comprimento, penalizando o comportamento térmico da habitação.

O quadro 5.8 apresenta os resultados da influência das palas de sombreamento nos vãos envidraçados de 1,40 m^2 de área na estação de arrefecimento.

Quadro 5.8 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Sem sombreamento**		**Com sombreamento**	
		Ganhos solares por radiação (kWh)	**Balanço energético (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	95,86	87,99	85,52	69,35
Orientação a Norte	1,40	76,81	49,12	73,99	47,92
Orientação a Este	1,40	152,63	156,75	145,39	145,39
Orientação a Oeste	1,40	104,97	94,80	93,69	79,70

Na estação de arrefecimento verifica-se a diminuição do balanço energético nos vãos envidraçados orientados a Sul, Este e Oeste. O vão envidraçado orientado a Norte não apresenta uma redução significativa do balanço energético. A diminuição do balanço energético n os envidraçados corresponde a uma diminuição das necessidades energéticas de arrefecimento.

No vão envidraçado orientado a Este, apesar de apresentar valores superiores de radiação solar, a colocação de uma pala de sombreamento de 20 cm resulta numa diminuição de ganhos solares semelhante ao envidraçado orientado a Oeste e Sul.

Verificando-se a redução do balanço energético em todos os vãos envidraçados com orientações distintas, associada à colocação de sombreamentos, torna-se necessário determinar a diferença entre o aumento das necessidades de aquecimento e diminuição das necessidades de arrefecimento, na óptica da optimização do comportamento térmico da habitação.

A figura 5.6 representa a variação do balanço energético dos vãos envidraçados associada à colocação de palas de sombreamento nos vãos envidraçados, para a estação de aquecimento e arrefecimento.

De acordo com os resultados indicados na figura 5.6, nos vãos envidraçados orientados a Sul verifica-se a superioridade da diminuição de ganhos solares na estação de aquecimento comparativamente com a estação de arrefecimento, pois na estação de aquecimento a radiação solar incidente é superior. O vão envidraçado orientado a Norte, como verificado anteriormente, apresenta uma redução significativa dos ganhos solares na estação de aquecimento e uma variação insignificativa na estação de aquecimento, ou seja, a colocação de palas de sombreamento nos vãos envidraçados orientados a Norte conduz à penalização do comportamento térmico da habitação.

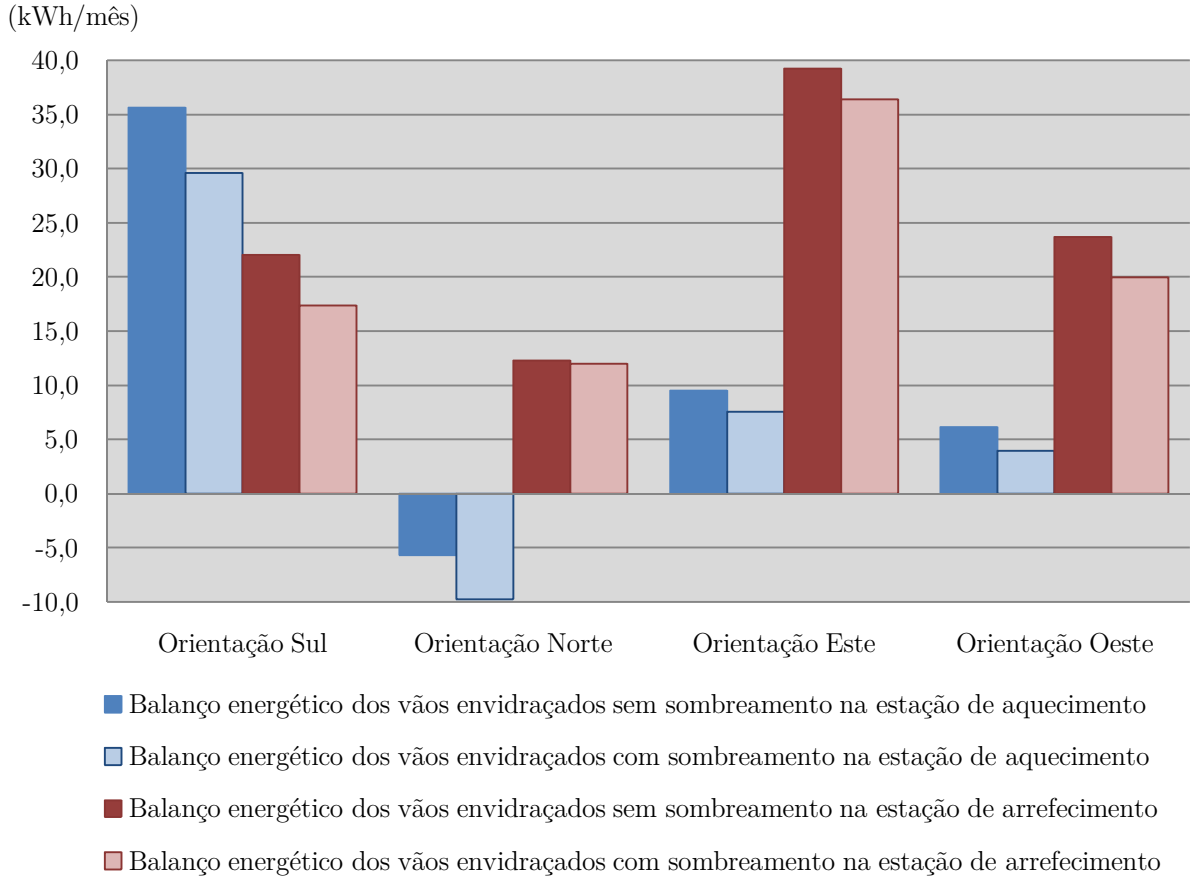


Figura 5.6 - Balanço energético dos vãos envidraçados, sem e com sombreamento, de acordo com o Energy Plus

Com base nos resultados apresentados, o caso de estudo que apresenta os vãos envidraçados orientados a Sul e Norte, não apresenta benefícios de redução das necessidades energéticas (somatório das necessidades de aquecimento e arrefecimento) com a colocação de palas de sombreamento horizontais, de acordo com o Energy Plus.

Nas orientação Este e Oeste verifica-se maior diminuição do balanço energético dos vãos envidraçados durante a estação de arrefecimento comparativamente à diminuição verificada na estação de aquecimento. Apesar da diferença ser ligeira, a colocação de sombreamento sobre os vãos envidraçados pode corresponder a uma situação benéfica na redução das necessidades energéticas de arrefecimento.

5.4.3. Resultados obtidos recorrendo ao TRNSYS

A presente subsecção indica os resultados associados à influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação, recorrendo à ferramenta de simulação computacional TRNSYS. À semelhança do procedimento anterior, realiza-se quatro simulações distintas, permitindo a avaliação da

orientação dos vãos envidraçados e palas de sombreamento horizontais no comportamento térmico da habitação.

Para a comparação de resultados com a metodologia do RCCTE e Energy Plus, foi definida idêntica solução construtiva dos vãos envidraçados, sendo constituído por duas camadas de vidro com 4 mm de espessura, separados por uma lâmina de ar de 14 mm, montados sobre uma caixilharia metálica. Este tipo de vão envidraçado encontra-se disponível na biblioteca de vãos envidraçados do TRNSYS, com um valor de coeficiente de condutibilidade térmica médio de U = 2,8 W/m^2.ºC, semelhante à solução aplicada no caso referente ao RCCTE.

À semelhança do Energy Plus, o TRNSYS apresenta uma metodologia própria na definição da influencia dos dispositivos de protecção solar móveis. Essa metodologia consiste na definição de uma percentagem de radiação solar transmitida conforme um horário diário de activação, apresentando um conceito visando a calendarização da activação automática dos dispositivos sobre os vãos envidraçados.

Na estação de aquecimento, define-se um horário com a activação do dispositivo de protecção móvel em período nocturno, com valor nulo de transmissão solar. No período diurno considera-se o dispositivo de protecção móvel desactivado, com um valor de radiação solar incidente no vão envidraçado total. Esta metodologia, semelhante à adoptada no Energy Plus, segue os pressupostos indicados no RCCTE durante a estação de aquecimento.

Na estação de arrefecimento, define-se um horário de activação do dispositivo de protecção móvel das 11 às 17 horas, (período com maior radiação solar e temperaturas exteriores superiores) no qual apenas 40 % da radiação solar incidente se transmite para o vão envidraçado.

5.4.3.1. Influência da orientação dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação

A combinação dos resultados obtidos nas duas primeiras simulações do segundo caso de estudo, recorrendo ao TRNSYS, permite a elaboração do quadro 5.9, com a indicação dos dados associados ao balanço energético dos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 com quatros orientações distintas, durante a estação de aquecimento.

Quadro 5.9 - Influência da orientação dos vãos envidraçados na estação de aquecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Balanço energético por condução (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético total (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	-119,97	365,62	245,66
Orientação a Norte	1,40	-121,08	80,93	-40,15
Orientação a Este	1,40	-124,55	184,35	59,80
Orientação a Oeste	1,40	-124,50	183,83	59,33

A radiação solar incidente em cada vão envidraçado influencia directamente os ganhos solares transmitidos para a habitação. Tal como analisado no caso de estudo anterior, o TRNSYS considera maiores valores de radiação solar incidente na orientação Sul, seguidos pela orientação Este e Oeste, correspondendo a orientação Norte a com menor radiação solar incidente.

Os vãos envidraçados orientados a Sul apresentam valores superiores de balanço energético total na estação de aquecimento, associado a elevados valores de ganhos solares. Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam valores positivos de balanço energético, superando os ganhos solares ao balanço energético negativo por condução. A colocação de vãos envidraçados nas três orientações mencionadas permitem a melhoria do comportamento térmico da habitação na estação de aquecimento, em função da respectiva diminuição das necessidades energéticas.

A orientação Norte, com menor exposição solar, apresenta maiores perdas por transferência de calor por condução, comparativamente aos ganhos, resultando num balanço energético negativo e influência negativa no comportamento térmico da habitação.

O quadro 5.10 apresenta os resultados dos vãos envidraçados com área 1,40 m^2 e quatro orientações distintas, na estação de arrefecimento.

Quadro 5.3 - Influência da orientação dos vãos envidraçados na estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Balanço energético por condução (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético total (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	-42,64	152,68	110,04
Orientação a Norte	1,40	-43,26	97,05	53,79
Orientação a Este	1,40	-57,66	271,53	213,87
Orientação a Oeste	1,40	-57,62	259,22	201,60

Na estação de arrefecimento, a temperatura interior da habitação influencia significativamente o balanço energético por condução. Verifica-se que na segunda simulação (vãos envidraçados orientados a

Este e Oeste), a temperatura interior da habitação se encontra a temperaturas superiores comparativamente com a primeira simulação (vãos envidraçados orientados a Norte e Sul), indicando maiores perdas térmicas por condução e respectiva diminuição do balanço energético por condução.

A orientação Este e Oeste apresentam valores superiores de radiação incidente durante a estação de arrefecimento, correspondendo aos vãos envidraçados com maiores ganhos solares por radiação e balanço energético total. O vão envidraçado orientado a Sul apresenta um balanço energético positivo superior ao vão envidraçado orientado a Norte.

Na estação de arrefecimento, os quatro vãos envidraçados apresentam balanço energético positivo, resultado num aumento das necessidades energéticas e consequente penalização no comportamento térmico da habitação. Em termos de optimização dos ganhos térmicos associados aos vãos envidraçados, a análise da diferença entre a melhoria verificada na estação de aquecimento e a desvantagem analisada na estação de arrefecimento apresenta elevada importância na definição da influência da orientação no comportamento térmico da habitação.

A figura 5.7 apresenta a representação gráfica dos resultados obtidos de balaço energético mensal nos quatro vãos envidraçados com distintas orientações, durante a estação de aquecimento e arrefecimento.

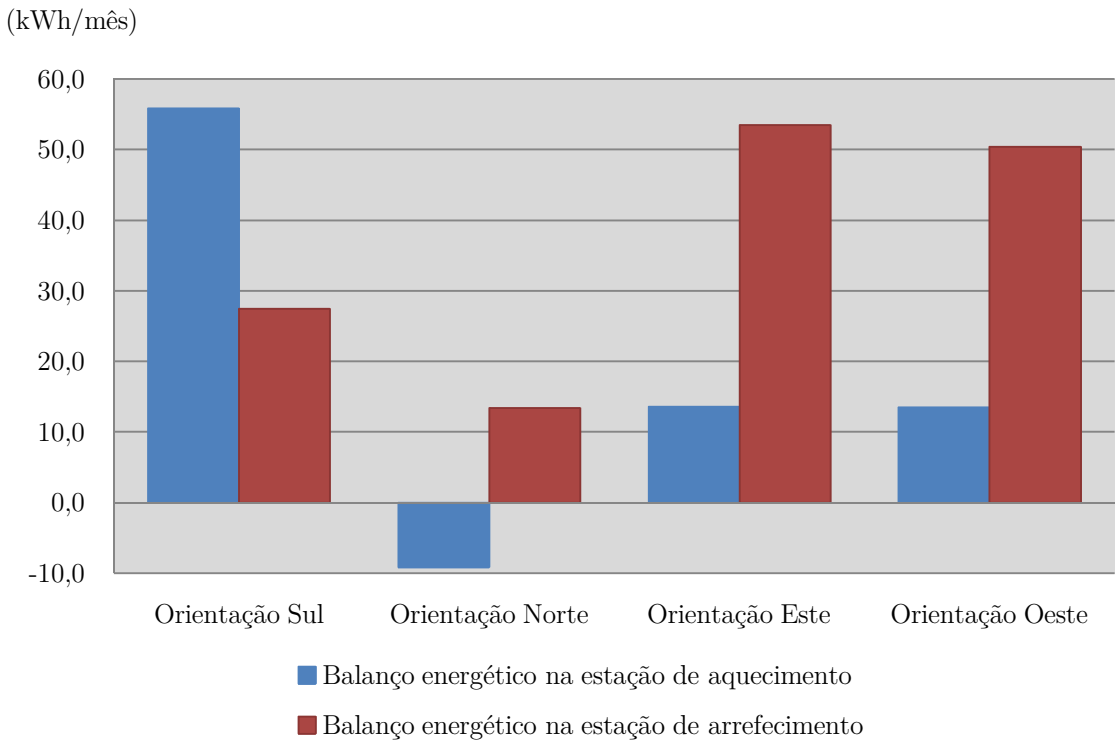


Figura 5.7 - Balanço energético dos vãos envidraçados, de acordo com o TRNSYS

De acordo com o quadro 5.9 e 5.10, o vão envidraçado orientado a Sul apresenta valores elevados de balanço energético na estação de aquecimento, 245,66 kWh para uma área de 1,40 m^2 comparativamente com a estação de arrefecimento, onde apresentam um balanço energético de 110,04 kWh. Assim, recorrendo ao TRNSYS, os vãos envidraçados orientados a Sul correspondem a uma diminuição da necessidades nominais de aquecimento superior ao aumento das necessidades nominais de arrefecimento.

Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam balanço energético positivo na estação de aquecimento, no entanto, o valor elevado de balanço energético na estação de arrefecimento supera amplamente o benefício na estação de aquecimento, correspondendo a um aumento significativo das necessidades nominais de arrefecimento e consequente influencia negativa no comportamento térmico da habitação.

O vão envidraçado orientado a Norte, com balanço energético negativo na estação de aquecimento e positivo na estação de arrefecimento, não corresponde a uma solução adequada na optimização de orientação de vãos envidraçados na melhoria do comportamento térmico da habitação.

5.4.3.2. Influência de palas de sombreamento horizontais sobre os vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação

A combinação de resultados obtidos nas quatro simulações elaboradas no segundo caso de estudo encontram-se no quadro 5.11, com a indicação dos ganhos solares e balanço energético associados aos vãos envidraçados com 1,40 m^2 nas diferentes orientações, antes a após a colocação de palas de sombreamento horizontais, durante a estação de aquecimento.

Quadro 5.11 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de aquecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Sem sombreamento**		**Com sombreamento**	
		Ganhos solares por radiação (kWh)	**Balanço energético (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	365,62	245,66	346,48	226,37
Orientação a Norte	1,40	80,93	-40,15	79,56	-41,27
Orientação a Este	1,40	184,35	59,80	166,43	43,40
Orientação a Oeste	1,40	183,83	59,33	163,21	40,18

O vão envidraçado orientado a Sul apresenta valores superiores de radiação incidente, verificando-se a maior diferença de balanço energético total antes e após a definição de sombreamento, 19,29 kWh. O vão envidraçado orientado a Oeste apresenta valores semelhantes de decréscimo do balanço energético, 19,15 kWh, seguido pelo vão envidraçado orientado a Este com um decréscimo de 16,40 kWh. O vão envidraçado orientado a Norte apresenta uma redução de 2,27 kWh, sendo a orientação menos influenciada pelo sombreamento.

A colocação de palas de sombreamento horizontais conduz a uma diminuição do balanço energético do vão envidraçado, correspondendo a uma situação desvantajosa no comportamento térmico durante a estação de aquecimento, com aumento das necessidades energéticas, comparativamente à solução sem sombreamento.

O quadro 5.12 apresenta os ganhos solares por radiação e balanço energético associado aos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 nas diferentes orientações, sem e com sombreamento, durante a estação de arrefecimento.

Quadro 5.12 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	**Área (m^2)**	**Sem sombreamento**		**Com sombreamento**	
		Ganhos solares por radiação (kWh)	**Balanço energético (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético (kWh)**
Orientação a Sul	1,40	152,68	110,04	144,11	100,70
Orientação a Norte	1,40	97,05	53,79	96,51	52,71
Orientação a Este	1,40	271,53	213,87	236,39	180,85
Orientação a Oeste	1,40	259,22	201,60	227,94	172,44

As orientações Este e Oeste são as que apresentam valores superiores de diferença de balanço energético antes e após a colocação de sombreamento, 33,02 kWh e 29,16 kWh, respectivamente, associados a valores superiores de exposição à radiação solar, comparativamente com a orientação Sul e Norte.

A colocação de palas de sombreamento sobre vãos envidraçados permite a redução do balanço energético associado nas quatro orientações, correspondendo a uma situação favorável na estação de arrefecimento.

Com base no quadro 5.17 e 5.18 elabora-se a figura 5.8 com a representação gráfica do balanço energético mensal associado aos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 e orientados a Sul, Norte, Este e Oeste, durante ambos os períodos de simulação.

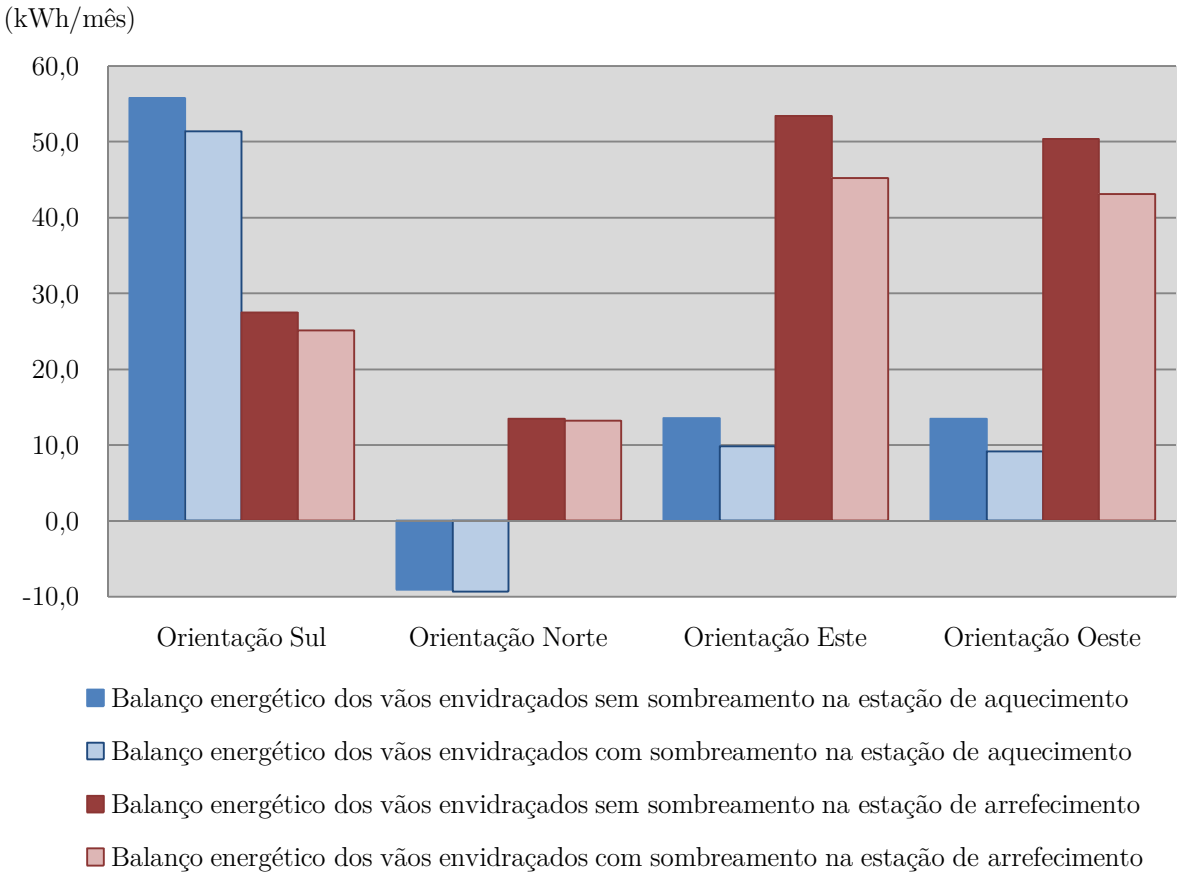


Figura 5.8 - Balanço energético dos vãos envidraçados, sem e com sombreamento, de acordo com o TRNSYS

Nas diferentes orientações dos vãos envidraçados verifica-se a diminuição dos balanço energético com a colocação de palas de sombreamento, consequente da redução dos ganhos solares e ligeiro aumento das perdas térmicas por condução.

Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam reduções no balanço energético superiores na estação de arrefecimento, comparativamente com a estação de aquecimento, correspondendo a uma melhoria do comportamento térmico global da habitação.

Nos vãos envidraçados orientados a Sul verifica-se uma diminuição acentuada do balanço energético em estação de aquecimento, comparativamente com valores registados na estação de arrefecimento. Assim, a colocação de palas de sombreamento sobre vãos envidraçados orientados a Sul corresponde a uma solução negativa na optimização do comportamento térmico da habitação, com um aumento significativo das necessidades energéticas de aquecimento, comparativamente com a diminuição das necessidades nominais de arrefecimento.

Nos vãos envidraçados orientados a Norte, a diminuição do balanço energético semelhante analisada em ambas as estações convencionais, associada à colocação de palas de sombreamento, não influencia significativamente o comportamento térmico da habitação.

5.5 Comparação de resultados obtidos com recurso às três ferramentas

Permitindo a comparação da metodologia de cálculo e influência no comportamento térmico associada aos vãos envidraçados no segundo caso de estudo da habitação, apresenta-se os resultados obtidos nas três ferramentas de análise do comportamento térmica da habitação. Analisa-se os resultados associados à influência da orientação dos vãos envidraçados, influência de palas de sombreamento horizontais e alterações energéticas ocorridas no comportamento térmico da habitação.

5.5.1. Influência da orientação dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação

O quadro 5.19 apresenta os resultados obtidos nas três ferramentas associados aos vãos envidraçados com área de 1,40 m^2 orientados a Sul, Norte, Este e Oeste, com a indicação do balanço energético por condução, ganhos solares por radiação e balanço energético total. A elaboração do quadro 5.13 resulta da compilação de resultados do quadro 5.1, 5.5 e 5.9, registados com base nas simulações realizadas no RCCTE, Energy Plus e TRNSYS, respectivamente, durante a estação de aquecimento.

Quadro 5.13 - Balanço energético dos vãos envidraçados nas três ferramentas, durante a estação de aquecimento

Vãos envidraçados	Orientação	Área (m^2)	Balanço energético por condução (kWh)	Ganhos solares por radiação (kWh)	Balanço energético (kWh)
RCCTE	Sul	1,40	-111,96	136,31	24,35
	Norte	1,40	-111,96	81,79	-30,17
	Este	1,40	-111,96	98,39	-13,57
	Oeste	1,40	-111,96	98,39	-13,57
Energy Plus	Sul	1,40	-42,32	223,99	181,67
	Norte	1,40	-87,96	58,92	-29,04
	Este	1,40	-70,66	119,23	48,57
	Oeste	1,40	-76,00	107,27	31,27
TRNSYS	Sul	1,40	-119,97	365,62	245,66
	Norte	1,40	-121,08	80,93	-40,15
	Este	1,40	-124,55	184,35	59,80
	Oeste	1,40	-124,50	183,83	59,33

De acordo com o quadro anterior, verifica-se que o RCCTE apresenta um balanço energético por condução idêntico em todos os vãos envidraçados de área igual com orientações distintas, neste caso um valor de perdas térmicas de 111,96 kWh. As ferramentas de simulação computacional apresentam valores distintos nas diferentes orientações, associados à influência da radiação solar no balanço energético por condução, especialmente relevante na análise recorrendo ao Energy Plus. Assim o Energy Plus apresenta valores superiores de balanço energético por condução nos vãos envidraçados, comparativamente com o TRNSYS, que apresenta o valor inferior das três ferramentas.

O Energy Plus e o TRNSYS registam valores superiores de ganhos solares nos vãos envidraçados orientados a Sul, Este e Oeste, comparativamente ao RCCTE. A orientação Norte, menos exposta à radiação solar, apresenta valores superiores com recurso à metodologia do RCCTE. Devido às diferentes propriedades verificadas nas soluções construtivas dos vãos envidraçados definidas nas ferramentas computacionais, os ganhos solares do TRNSYS são superiores aos registados no Energy Plus, pois os vãos envidraçados da biblioteca de materiais do TRSNSYS apresentam valores superiores de transmissão solar.

A figura 5.9 representa graficamente os valores de balanço energético dos vãos envidraçados, na estação de aquecimento, indicados no quadro 5.13.

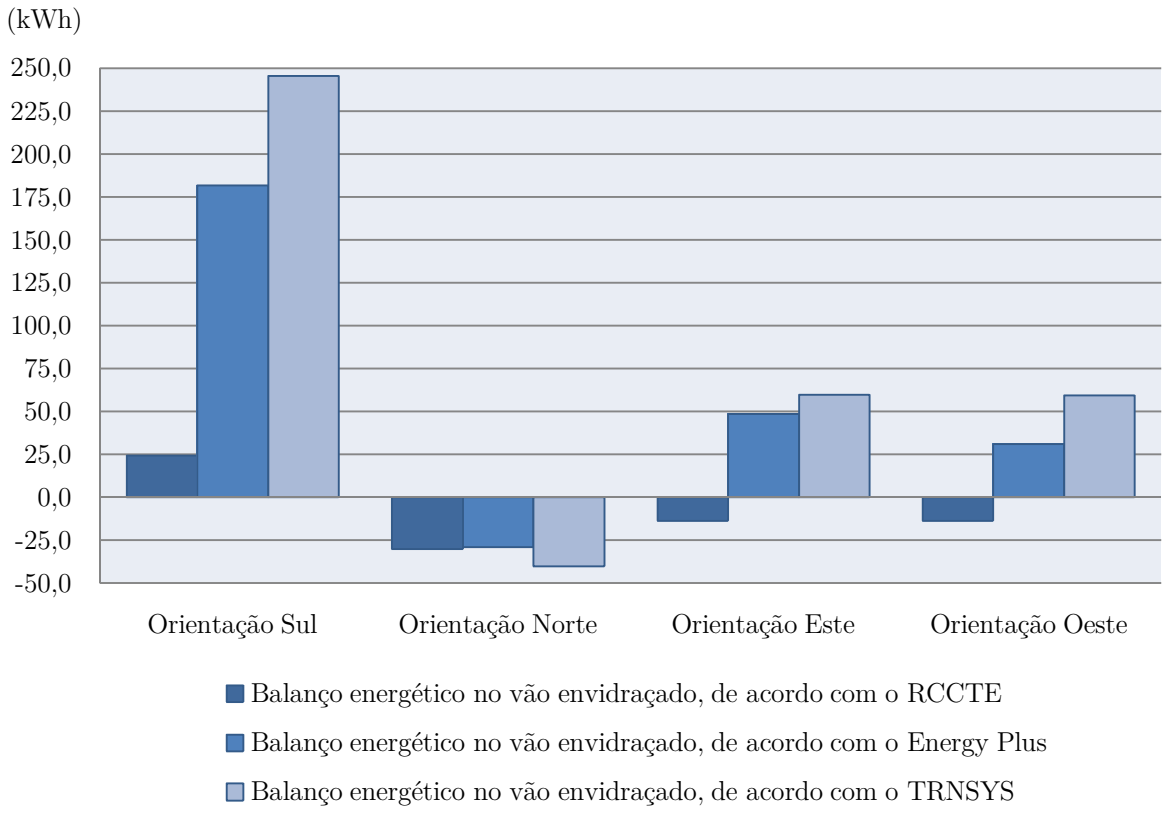


Figura 5.9 - Balanço energético dos vãos envidraçados nas três ferramentas, durante a estação de aquecimento

Com base nos resultados indicados na figura 5.10, o TRNSYS fornece valores superiores de balanço energético nos vãos envidraçados orientados a Sul, Este e Oeste, comparativamente ao RCCTE e Energy Plus.

Nos vãos envidraçados orientados a Norte, as três ferramentas apresentam valores negativos semelhantes de balanço energético, correspondendo a uma situação negativa na estação de aquecimento, com o aumento das necessidades energéticas.

De acordo com os resultados obtidos, o RCCTE subvaloriza o balanço energético associado aos vãos envidraçados orientados a Sul, na estação de aquecimento, registando-se valores significativamente inferiores, 24,35 kWh, comparativamente aos valores analisados com recurso ao Energy Plus e TRNSYS, 181,67 kWh e 245,66 kWh, respectivamente. Caso a arquitectura de uma habitação apresente um vão envidraçado com área elevada orientado a Sul, recorrendo à metodologia do RCCTE, as necessidades nominais de aquecimento podem ser superiores às estimadas pelo Energy Plus e TRNSYS.

Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam uma variação semelhante à analisada na orientação Sul, com uma diferença menos significativa. Enquanto o RCCTE apresenta um valor negativo de balanço energético dos vãos envidraçados, penalizando o comportamento térmico da habitação na estação de aquecimento, o Energy Plus e o TRNSYS indicam um balanço energético positivo, favorecendo o comportamento térmico.

O quadro 5.14 apresenta os parâmetros associados à análise dos vãos envidraçados, na estação de arrefecimento, com base nas três ferramentas utilizadas, o RCCTE, o Energy Plus e o TRNSYS.

Quadro 5.14 - Balanço energético dos vãos envidraçados nas três ferramentas, durante a estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	**Orientação**	**Área (m^2)**	**Balanço energético por condução (kWh)**	**Ganhos solares por radiação (kWh)**	**Balanço energético (kWh)**
RCCTE	Sul	1,40	-22,96	67,87	44,91
	Norte	1,40	-22,96	38,10	15,14
	Este	1,40	-22,96	95,14	72,18
	Oeste	1,40	-22,96	95,14	72,18
Energy Plus	Sul	1,40	-7,87	95,86	87,99
	Norte	1,40	-27,69	76,81	49,12
	Este	1,40	4,12	152,63	156,75
	Oeste	1,40	-10,17	104,97	94,80
TRNSYS	Sul	1,40	-42,64	152,68	110,04
	Norte	1,40	-43,26	97,05	53,79
	Este	1,40	-57,66	271,53	213,87
	Oeste	1,40	-57,62	259,22	201,60

A metodologia aplicada no RCCTE resulta em perdas térmicas por condução dos vãos envidraçados idênticas nas quatro orientações, 22,96 kWh, valor inferior ao registado na estação de aquecimento. O procedimento aplicado nas ferramentas computacionais resulta em valores distintos conforme a orientação do vão envidraçado, apresentando o Energy Plus valores superiores de balanço energético para nas três orientações Sul, Este e Oeste, enquanto o TRNSYS apresenta valores inferiores.

O RCCTE apresenta valores inferiores de ganhos solares por radiação nos vãos envidraçados orientados nas quatro direcções geográficas, comparativamente com resultados obtidos no Energy Plus e TRNSYS. A calendarização da activação dos dispositivos de oclusão nocturna e coeficiente de transmissão dos vãos envidraçados aplicados no TRNSYS conduz a valores superiores de ganhos solares, principalmente nas orientações a Este e Oeste, resultando em valores superiores de balanço energético total.

A figura 5.10 representa graficamente os valores de balanço energético dos vãos envidraçados, na estação de arrefecimento, indicados no quadro 5.14.

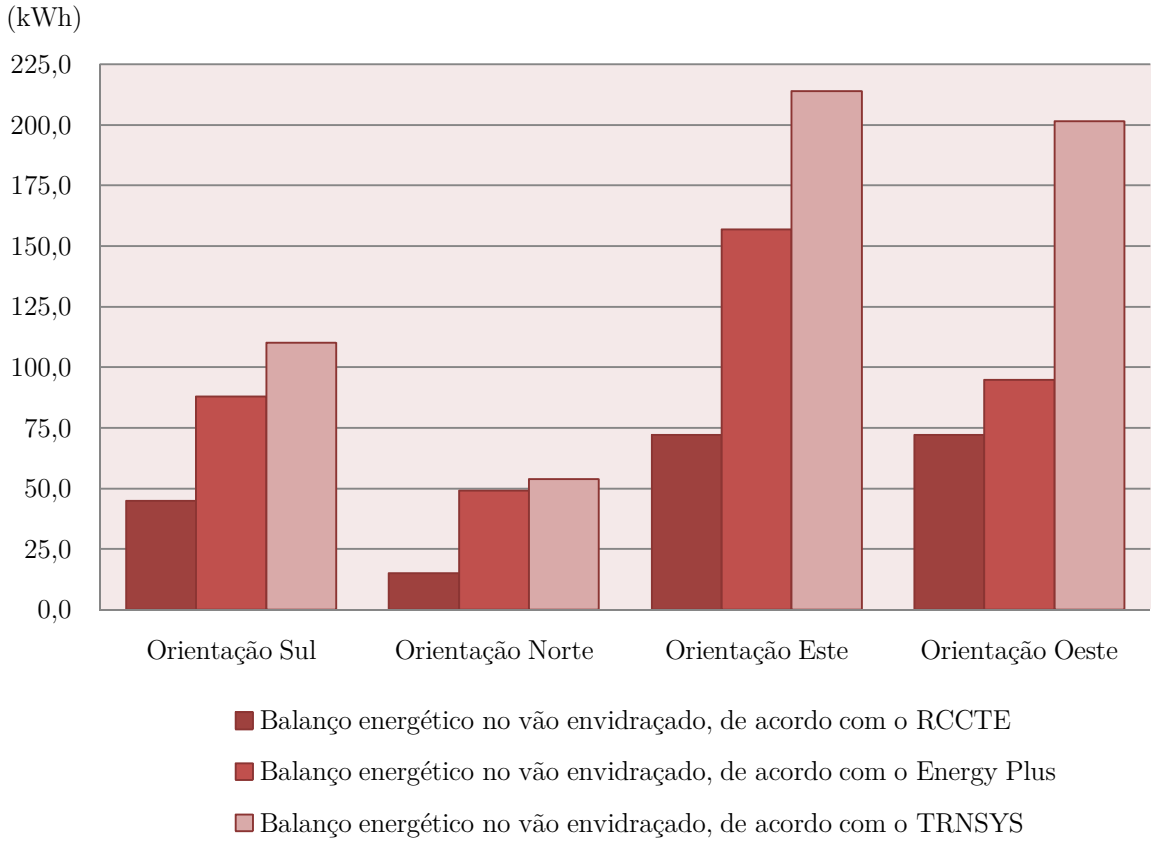


Figura 5.10 - Balanço energético dos vãos envidraçados nas três ferramentas, durante a estação de arrefecimento

A figura 5.10 indica que o RCCTE corresponde à ferramenta de avaliação do comportamento térmico que apresenta valores inferiores de balanço energético nos vãos envidraçados durante a estação

de arrefecimento. As ferramentas computacionais, principalmente o TRNSYS, apresentam valores superiores de balanço energético nos vãos envidraçados orientados a Sul, Este e Oeste.

Os resultados obtidos indicam uma subvalorização dos ganhos solares e balanço energético associado aos vãos envidraçados recorrendo à metodologia do RCCTE, resultando numa influência no comportamento térmico da habitação na estação de arrefecimento inferior comparativamente à análise realizada recorrendo a ferramentas computacionais Energy Plus e TRNSYS, onde se verifica valores superiores de necessidades energéticas, principalmente na simulação da habitação possuindo vãos envidraçados com maior área orientados a Este ou Oeste.

5.5.2. Influência de palas de sombreamento horizontais sobre os vãos envidraçados

O quadro 5.15 representa o balanço energético dos vãos envidraçados antes e após a colocação de palas de sombreamento horizontais, indicando a diferença no balanço energético verificada devido à sua colocação, durante a estação de aquecimento.

Quadro 5.15 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de aquecimento

Vãos envidraçados	**Orientação**	**Área (m^2)**	**Sem sombreamento**	**Com sombreamento**	**Diferença energética (kWh)**
			Balanço energético (kWh)	**Balanço energético (kWh)**	
RCCTE	Sul	1,40	24,35	-2,91	-27,26
	Norte	1,40	-30,17	-30,17	0,00
	Este	1,40	-13,57	-25,02	-11,45
	Oeste	1,40	-13,57	-25,02	-11,45
Energy Plus	Sul	1,40	181,67	150,89	-30,78
	Norte	1,40	-29,04	-49,70	-20,66
	Este	1,40	48,57	38,50	-10,07
	Oeste	1,40	31,27	20,11	-11,16
TRNSYS	Sul	1,40	245,66	226,37	-19,29
	Norte	1,40	-40,15	-41,27	-1,12
	Este	1,40	59,80	43,40	-16,40
	Oeste	1,40	59,33	40,18	-19,15

Com base em valor tabelados da influência de sombreamentos nas diferentes orientações, a metodologia do RCCTE indica a diminuição de ganhos solares associados aos vãos envidraçados,

permitindo a determinação da diminuição do balanço energético após colocação do sombreamento. Verifica-se que a orientação Sul apresenta uma variação superior, seguido a orientação Este e Oeste. O vão envidraçado orientado a Norte não apresenta variações no balanço energético, não sendo influenciado pela colocação de sombreamento, de acordo com o RCCTE.

Nas ferramentas de simulação computacional verifica-se a diminuição do balanço energético após colocação do sombreamento em todos os vãos envidraçados. A orientação Sul apresenta valores superiores de diminuição do balanço energético, principalmente na análise recorrendo ao Energy Plus. Os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste apresentam diminuição semelhantes nos registos de cada ferramenta computacional e RCCTE. O Energy Plus apresenta uma diminuição significativa no balanço energético do vão envidraçado orientado a Norte após colocação do sombreamento, associado ao aumento das perdas térmicas por condução, ao contrário do registado nas restantes ferramentas.

De acordo com os resultados obtidos recorrendo às ferramentas computacionais, a colocação de sombreamentos horizontais sobre os vãos envidraçados resulta na diminuição do balanço energético associado e consequente penalização no desempenho energético da habitação na estação de aquecimento, sendo necessário a comparação com os benefícios ocorridos durante a estação de arrefecimento.

O quadro 5.16 indica o balanço energético dos vãos envidraçados antes e após a colocação de palas de sombreamento horizontais, indicando a diferença do balanço energético associada à sua colocação, durante a estação de arrefecimento.

Quadro 5.16 - Influência do sombreamento sobre vãos envidraçados na estação de arrefecimento

Vãos envidraçados	**Orientação**	**Área (m^2)**	**Sem sombreamento**	**Com sombreamento**	**Diferença energética (kWh)**
			Balanço energético (kWh)	**Balanço energético (kWh)**	
RCCTE	Sul	1,40	44,91	26,59	-18,32
	Norte	1,40	15,14	14,59	-0,55
	Este	1,40	72,18	54,86	-17,32
	Oeste	1,40	72,18	54,86	-17,32
Energy Plus	Sul	1,40	87,99	69,35	-18,64
	Norte	1,40	49,12	47,92	-1,20
	Este	1,40	156,75	145,39	-11,36
	Oeste	1,40	94,80	79,70	-15,10
TRNSYS	Sul	1,40	110,04	100,70	-9,34
	Norte	1,40	53,79	52,71	-1,08
	Este	1,40	213,87	180,85	-33,02
	Oeste	1,40	201,60	172,44	-29,16

Com base nos resultados obtidos com recurso às três ferramentas, a diminuição do balanço energético associado aos vãos envidraçados orientados a Sul é menor que a analisada em estação de aquecimento, correspondendo assim a uma situação penalizadora para o comportamento térmico anual da habitação.

Resultado oposto verifica-se para os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste, indicando as três ferramentas, principalmente o TRNSYS, diminuição superior do balanço energético na estação de arrefecimento comparativamente com a estação de aquecimento. Apesar das duas orientações indicadas corresponderem a balanços energéticos superiores em estação de arrefecimento, a colocação de palas de sombreamento reduz os ganhos solares influenciando favoravelmente as necessidades energéticas.

A colocação de sombreamento sobre vãos envidraçados orientados a Norte corresponde a uma diminuição insignificativa do balanço energético, associado a menores valores de radiação solar incidente.

5.5.3. Necessidades energéticas da habitação na terceira simulação, apresentando vãos envidraçados orientados a Norte e Sul, com sombreamento

Na análise da alteração das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento entre o primeiro caso de estudo e o segundo caso de estudo, com a solução apresentada com vãos envidraçados orientados a Norte e Sul, com sombreamento, define-se os parâmetros associados ao seu cálculo nas três ferramentas utilizadas.

O quadro 5.17 apresenta os valores de necessidades nominais de aquecimento e seus parâmetros de cálculo no segundo caso de estudo, recorrendo ao RCCTE, Energy Plus e TRNSYS, comparativamente com os valores registados no primeiro caso de estudo.

Quadro 5.17 - Resultados finais de necessidades nominais de aquecimento da habitação

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-3209,11	-2345,66	-2414,73
Balanço energético por condução dos vãos envidraçados (kWh)	-1275,49	-817,16	-1380,03
Ganhos solares por radiação (kWh)	986,31	1032,03	1440,28
Balanço energético total dos vãos envidraçados (kWh)	-289,18	214,91	60,25
Necessidades de aquecimento segundo caso (kWh/m².ano)	29,16	17,67	19,66
Necessidades de aquecimento primeiro caso (kWh/m².ano)	28,63	20,70	20,90

Na estação de aquecimento, verifica-se valores semelhantes de balanço energético associado à envolvente opaca aos registados no primeiro caso de estudo, correspondendo assim o balanço energético dos vãos envidraçados o principal parâmetro responsável por variações nas necessidades nominais de aquecimento.

Recorrendo à metodologia do RCCTE, a solução apresentada com colocação de vãos envidraçados orientados a Sul e Norte, com sombreamento sobre os mesmo, apresenta um balanço energético negativo, associado a valores superiores de perdas térmicas por condução, comparativamente com os ganhos solares. Resultante do balanço energético negativo, verifica-se um aumento das necessidades de aquecimento no segundo caso de estudo de 0,53 kWh/m^2.ano, associado principalmente ao vão envidraçado de 11,75 m^2 orientado a Norte.

Nas ferramentas de simulação computacional, Energy Plus e TRNSYS, verifica-se um benefício na elaboração da solução definida, com a diminuição das necessidades nominais de aquecimento, resultante do balanço energético positivo dos vãos envidraçados. Os vãos envidraçados orientados a Sul, com maior radiação solar incidente, correspondem aos elementos principais na redução das necessidades energéticas analisada.

Apesar do TRNSYS considerar ganhos solares nos vãos envidraçados superiores comparativamente ao Energy Plus, o balanço energético por condução é inferior, correspondendo a um balanço energético inferior e menor redução das necessidades nominais de aquecimento, 1,24 kWh/m^2.ano, comparativamente com a redução 3,03 kWh/m^2.ano registada no Energy Plus. Torna-se importante referir que caso o vão envidraçado com área de 11,75 m^2 se encontra-se orientado a Sul, a diminuição das necessidades nominais de aquecimento seria superior, com base nos resultados indicados na figura 5.10 resultante dos valores elevados de balanço energético positivo nos vãos envidraçados orientados a Sul, na estimativa realizada pelas ferramentas computacionais.

Os resultados obtidos na estação de arrefecimento encontram-se no quadro 5.18, com a indicação dos parâmetros de cálculo associados às necessidades nominais de arrefecimento e comparação com o anterior caso de estudo.

Quadro 5.18 - Resultados finais de necessidades nominais de arrefecimento da habitação

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	293,25	-473,79	-623,20
Balanço energético por condução dos vãos envidraçados (kWh)	-261,53	-194,10	-499,51
Ganhos solares por radiação (kWh)	493,63	1068,32	1261,66
Balanço energético total dos vãos envidraçados (kWh)	232,10	874,22	762,15
Necessidades de arrefecimento segundo caso (kWh/m^2.ano)	4,47	1,90	1,15
Necessidades de arrefecimento primeiro caso (kWh/m^2.ano)	2,71	0,10	0,00

Recorrendo à metodologia do RCCTE, o balanço energético dos vãos envidraçados apresenta valor positivo de 232,10 kWh, verificando-se assim um aumento das necessidades energéticas de arrefecimento de 1,76 kWh/m^2.ano no segundo caso de estudo.

A figura 5.11 apresenta a evolução da temperatura no interior da habitação no período de 26 de Agosto a 1 de Setembro para o primeiro e segundo caso de estudo, recorrendo ao Energy Plus.

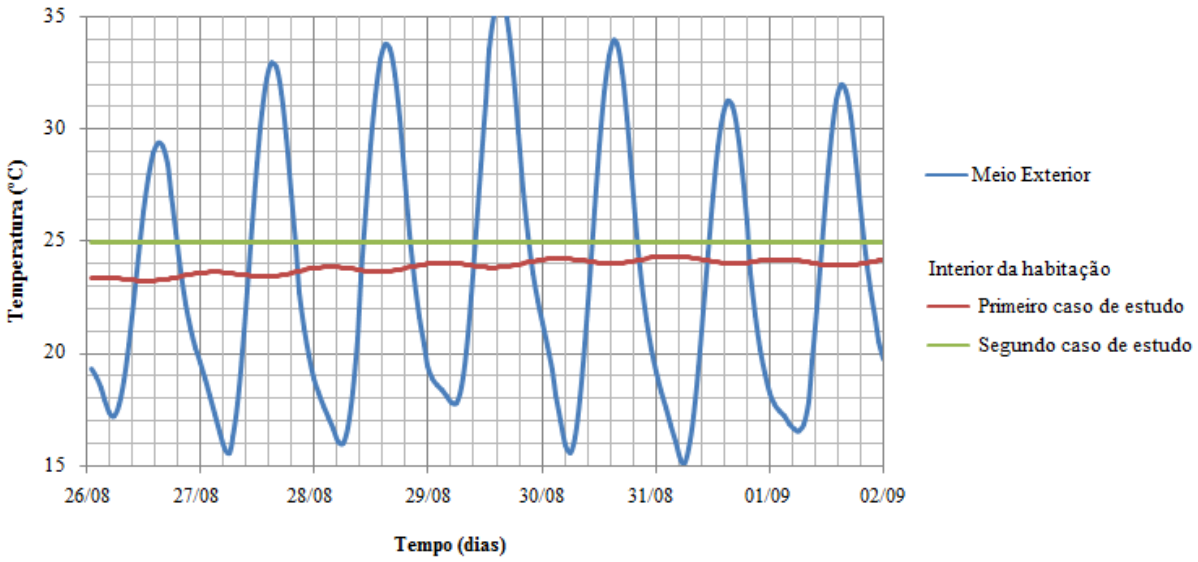


Figura 5.11 - Temperatura no interior e exterior da habitação durante o período de 26 de Agosto a 1 de Setembro

No primeiro caso de estudo verifica-se o equilíbrio entre perdas e ganhos térmicos pela envolve opaca no decorrer da estação de arrefecimento. No segundo caso de estudo, a temperatura no interior da habitação aumenta, associada aos ganhos solares pelos vãos envidraçados. No período analisado na figura 5.11, a temperatura interior da habitação permanece constante a 25 ºC, associada à activação dos dispositivos de arrefecimento. Com o aumento da temperatura interior, os períodos em que a habitação apresenta perdas térmicas pela envolvente opaca é superior, verificando-se assim uma diminuição do balanço energético associado à envolvente opaca no segundo caso de estudo.

Da análise realizada com o Energy Plus resulta num valor elevado de balanço energético associado aos vãos envidraçados, 874,22 kWh, sendo a sua influência nas necessidades nominais de arrefecimento reduzidas devido à diminuição do balanço energético da envolvente opaca. Comparativamente com o primeiro caso de estudo, verifica-se um aumento de necessidades energéticas de 1,80 kWh/m^2.ano.

Na metodologia adoptada no TRNSYS, apesar de apresentar ganhos solares superiores, o balanço energético por condução nos vãos envidraçados é inferiores, resultando em valores de balanço energético de 762,15 kWh, correspondendo a um menor aumento das necessidades nominais de arrefecimento de 1,15 kWh/m^2.ano.

Nas ferramentas de simulação computacional, verificam-se valores superiores de balanço energético nos vãos envidraçados, comparativamente com os resultados obtidos no RCCTE. No entanto, a sua influência no comportamento térmico da habitação na estação de arrefecimento é semelhante ao verificado no RCCTE, pois o aumento de temperatura interior provoca a diminuição do balanço energético associado à envolvente opaca.

Na segunda e quarta simulação do segundo caso de estudo, com o vão envidraçado de área 11,75 m^2 orientado a Oeste, verifica-se um aumento superior das necessidades nominais de arrefecimento nas ferramentas computacionais, comparativamente ao RCCTE, associado aos valores superiores de balanço energético dos vãos envidraçados indicados na figura 5.10.

Capítulo 6 Comportamento térmico perante a renovação do ar interior da habitação

O presente capítulo descreve a metodologia de cálculo utilizada nas três ferramentas de avaliação do comportamento térmico de edifícios na determinação de perdas e ganhos térmicos associados à renovação do ar interior, referentes ao terceiro caso de estudo. Apresentam-se e analisam-se os resultados do terceiro caso de estudo com um esquema de ventilação natural na habitação elaborada. O sexto capítulo subdivide-se na metodologia de cálculo da renovação do ar interior, de acordo com o RCCTE (subsecção 6.1), com o Energy Plus (subsecção 6.2) e com o TRNSYS (subsecção 6.3). Apresenta-se a demonstração de resultados obtidos nas três ferramentas e avaliação dos mesmos (subsecção 6.4) e a compilação e comparação crítica de resultados nas três ferramentas (subsecção 6.5).

6.1. Metodologia de cálculo de acordo com o RCCTE

O RCCTE define perdas de calor resultantes da renovação do ar durante a estação de aquecimento e arrefecimento. As perdas de calor por unidade de tempo correspondentes à renovação do ar interior (Q_{ra}) são calculadas de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{ra} = \rho.C_p.R_{ph}.V.\left(\theta_i - \theta_{atm}\right) / 3600 \quad \left(W\right) \tag{6.1}$$

Na qual se considera a massa volúmica do ar (ρ), em kg/m^3, o calor específico do ar (C_p), em J/kg.ºC, o número de renovações horárias do ar interior (R_{ph}), em h^{-1}, o volume da fracção autónoma (V), em m^3, e a diferença entre a temperatura interior de referência e a temperatura do ar exterior, ($\theta_i - \theta_{atm}$), em ºC.

Substituindo o termo volume da fracção autónoma pelo produto entre a área útil do pavimento (A_p) e o pé-direito médio (P_d), e o termo $\rho.C_p / 3600$ que toma o valor 0,34 W/m^3.ºC, resulta a equação (6.2).

$$Q_{ra} = 0{,}34.R_{ph}.A_p.P_d.\left(\theta_i - \theta_{atm}\right) \quad \left(W\right) \tag{6.2}$$

Durante a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar as perdas associadas à renovação de ar é calculada de acordo com o equação (6.3), com base no número de graus-dias de aquecimento (GD):

$$Q_v = 0{,}024.\left(0{,}34.R_{ph}.A_p.P_d\right).GD \quad \left(W\right) \tag{6.3}$$

Durante a estação de arrefecimento, as perdas associadas à renovação do ar interior por ventilação determinam-se com base na diferença entre a temperatura de referência interior, 25 ºC, e a temperatura média exterior ($\theta_i - \theta_m$):

$$Q_v = 2{,}928.\left(0{,}34.R_{ph}.A_p.P_d\right).\left(\theta_i - \theta_m\right) \quad \left(W\right) \tag{6.4}$$

Por razões de higiene e conforto dos ocupantes, é necessário que os edifícios sejam ventilados em permanência por um caudal mínimo de ar. Admite-se que a habitação apresenta uma estratégia de ventilação natural baseada nas recomendações da norma NP 1037-1 [28].

6.2. Metodologia de cálculo de acordo com o Energy Plus

A definição da renovação do ar interior da habitação realiza-se recorrendo ao parâmetro associado à infiltração, onde um fluxo de ar exterior contínuo entra directamente na zona térmica definida para a habitação. O procedimento de infiltração considera a mistura imediata do ar exterior com o ar no interior, apresentando o balanço energético associado à infiltração de ar a seguinte expressão, semelhante à utilizada na metodologia do RCCTE:

$$\dot{Q}_{\inf} = \dot{m}_{\inf}.C_p.\left(\theta_i - \theta_e\right) \quad \left(J\right) \tag{6.5}$$

A equação depende do fluxo de massa do ar de infiltração (m_{inf}), calor específico do ar (C_p) e da diferença de temperatura do ar no interior da habitação e o ar exterior ($\theta_i - \theta_e$).

A determinação da quantidade de ar exterior que entra na habitação torna-se o elemento principal na correcta avaliação das perdas e ganhos térmicos associados à renovação do ar interior, sendo usualmente aplicada uma metodologia associada ao número de renovações de ar por hora. Relacionado com as potencialidades computacionais apresenta-se o processo de calendarização da renovação do ar

interior, e a equação (6.6) associada ao modelo aplicado na determinação da infiltração de ar no interior da habitação, definida por Coblenz e Achenbach [18].

$$Inflitração = \left(I_{\mathrm{mod}\,elo}\right).\left(I_{horario}\right).\left[A + B\left(\theta_i - \theta_e\right) + C\left(V_{vento}\right) + D\left(V_{vento}^2\right)\right] \tag{6.6}$$

O modelo definido com a taxa de renovação horária ($I_{\mathrm{mod}\,elo}$) é influenciado pela calendarização associada ($I_{horario}$), com o objectivo de optimizar o balanço energético associado às perdas e ganhos térmicos. O modelo considera ainda a influência da diferença de temperatura interior e exterior ($\theta_i - \theta_e$) e a velocidade do vento (V_{vento}), com base em coeficientes determinados (A, B, C e D).

Assim, o Energy Plus permite a realização de uma avaliação contínua das trocas de ar com o exterior da habitação, em função da diferença de temperatura e taxa de renovações horárias definidas, sendo possível elaborar uma calendarização visando a optimização do comportamento térmico associado à renovação de ar.

6.3. Metodologia de cálculo de acordo com o TRNSYS

No TRNSYS, o parâmetro associado à infiltração é definido com base no número de renovações por hora em cada zona térmica. O fluxo de massa é produto do volume de ar da zona, da massa volúmica do ar e da taxa de renovação horária. A infiltração decorre sempre em função das condições exteriores, considerando que o ar que entra da habitação é igual ao ar que sai da habitação.

O balanço energético associado à infiltração (Q_{inf}) decorrida na zona térmica determina-se com base na seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{\inf} = \dot{m}_{\inf}.C_p.\left(\theta_i - \theta_e\right) \qquad \left(kJ\right) \tag{6.7}$$

À semelhança do Energy Plus, a equação depende do fluxo de massa do ar de infiltração (m_{inf}), calor específico do ar (C_p) e da diferença de temperatura do ar no interior da habitação e o ar exterior ($\theta_i - \theta_e$).

6.4. Apresentação e análise de resultados obtidos

A metodologia aplicada pelo RCCTE na determinação das perdas térmicas associadas à renovação de ar permite analisar directamente a sua influência nas necessidades energéticas da habitação. A realização da simulação dinâmica do Energy Plus e TRNSYS permite averiguar a influência da renovação de ar no balanço energético, temperatura interior da habitação e alteração dos restantes parâmetros de transferência de calor, como a envolvente opaca e os vãos envidraçados.

6.4.1. Resultados obtidos com a metodologia do RCCTE

A resolução da equação (6.3), com base no volume da habitação, nos graus-dias de aquecimento do concelho de Lisboa e na taxa de renovação horária de 0,6 h^{-1}, permite a determinação das perdas térmicas devido à renovação do ar interior, com o valor de 2237,28 kWh.

O quadro 6.1 apresenta os resultados dos parâmetros térmicos associados às necessidades nominais de aquecimento.

Quadro 6.1 - Resultados na estação de aquecimento, de acordo com o RCCTE

Perdas térmicas por condução da envolvente opaca (kWh)	3209,11
Perdas térmicas por condução nos vãos envidraçados (kWh)	1275,49
Ganhos solares dos vãos envidraçados (kWh)	986,31
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	2237,28
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	47,80

Comparativamente com o caso de estudo anterior, verifica-se que as perdas térmicas por condução da envolvente opaca e vãos envidraçados, assim como os seus ganhos solares, possuem valores idênticos. Assim, o aumento verificado nas necessidades nominais de aquecimento, anteriormente 29,16 kWh/m².ano, apenas depende do valor obtido nas perdas térmicas associadas à renovação do ar.

O quadro 6.2 apresenta os resultados dos parâmetros térmicos associados às necessidades nominais de arrefecimento.

Quadro 6.2 - Resultados na estação de arrefecimento, de acordo com o RCCTE

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	293,25
Perdas térmicas por condução nos vãos envidraçados (kWh)	261,53
Ganhos solares dos vãos envidraçados (kWh)	493,63
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	458,74
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m².ano)	2,22

A metodologia baseada numa simulação estática aplicada no RCCTE, não considera a influência da renovação de ar nos restantes parâmetros energéticos da habitação, permanecendo o balanço energético associado à envolvente opaca e aos vãos envidraçados idênticos ao caso de estudo anterior.

De acordo com o quadro III.9 do RCCTE, em qualquer zonamento climático de Portugal, a temperatura média exterior na estação de arrefecimento é sempre inferior à temperatura interior de referência, de 25 ºC, sendo a renovação do ar contabilizada exclusivamente como perda térmica.

Apresentando a renovação de ar um valor de perdas térmicas de 458,74 kWh, verifica-se uma diminuição das necessidades nominais de arrefecimento, apresentando no caso anterior o valor de 4,47 kWh/m^2.ano. A renovação de ar por ventilação, correspondendo a um elemento indispensável no conforto interior da habitação, apresenta um benefício na estação de arrefecimento com a diminuição das necessidades energéticas, de acordo com o RCCTE.

6.4.2. Resultados obtidos da simulação recorrendo ao Energy Plus

O quadro 6.3 dispõe os resultados obtidos no Energy Plus associadas ao balanço energético da envolvente opaca, dos vãos envidraçados e as perdas térmicas associadas à renovação do ar, determinantes no valor das necessidades nominais de aquecimento.

Quadro 6.3 - Resultados na estação de aquecimento, de acordo com o Energy Plus

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-2343,79
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	219,83
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	2417,52
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	37,80

Na estação de aquecimento, a temperatura interior de referência da habitação mantém-se constante a 20 ºC, tal como no caso de estudo anterior, resultando em valores semelhantes de balanço energético da envolvente opaca e vãos envidraçados.

A definição de uma taxa de renovação horária do ar interior de 0,6 h^{-1} corresponde a um valor de perdas térmicas de 2417,52 kWh, durante a estação de aquecimento. Associada à introdução deste parâmetro térmico nas características da habitação, verifica-se um aumento das necessidades nominais de aquecimento, comparativamente ao caso de estudo anterior com o valor 17,67 kWh/m^2.ano.

Os resultados obtidos na estação de arrefecimento encontram-se no quadro 6.4, com a definição do balanço energético associado à envolvente opaca e aos vãos envidraçados, assim como as perdas e ganhos térmicos associados à renovação de ar.

Quadro 6.4 - Resultados na estação de arrefecimento, de acordo com o Energy Plus

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-229,32
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	1214,83
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	745,15
Ganhos térmicos associados à renovação de ar (kWh)	202,34
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m^2.ano)	2,06

O Energy Plus permite a recolha dos resultados associado às perdas térmicas de renovação de ar, ocorridas no período em que a temperatura exterior é inferior à temperatura interior, e os ganhos térmicos decorridos no período diurno, com temperaturas exteriores superiores.

Na estação de arrefecimento, as perdas térmicas associadas à renovação de ar são superiores aos ganhos térmicos, resultando num balanço energético negativo de 542,81 kWh. O balanço energético negativo provoca uma diminuição da temperatura no interior da habitação, verificando-se que a envolvente opaca e os vãos envidraçados apresentam maiores ganhos térmicos por condução e consequente superior balanço energético, comparativamente ao caso de estudo anterior.

O aumento do balanço energético da envolvente opaca e dos vãos envidraçados é superior ao balanço energético negativo associado à renovação de ar, verificando-se assim um ligeiro aumento nos períodos diurnos nos quais a habitação apresenta necessidades de arrefecimento, comparativamente com o caso anterior de 1,90 kWh/m^2.ano.

6.4.3. Resultados obtidos da simulação recorrendo ao TRNSYS

O quadro 6.5 indica os resultados associados à determinação das necessidades nominais de aquecimento, recorrendo ao TRNSYS.

Quadro 6.5 - Resultados na estação de aquecimento, de acordo com o TRNSYS

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-2412,64
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	-60,97
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	1904,30
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	35,50

Os valores de balanço energético associados à envolvente opaca e vãos envidraçados permanecem semelhantes aos registados no caso de estudo anterior, pois a habitação permanece à temperatura interior de referência.

A renovação do ar interior resulta num valor de perdas térmicas de 1904,30 kWh durante a estação de arrefecimento, resultando num aumento das necessidades nominais de aquecimento, comparativamente ao caso anterior que apresenta o valor de 19,66 kWh/m^2.ano.

O quadro 6.6 apresenta os resultados obtidos associados aos parâmetros de cálculo das necessidades nominais de arrefecimento.

Quadro 6.6 - Resultados na estação de arrefecimento, de acordo com o TRNSYS

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-377,90
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	844,84
Balanço energético associadas à renovação de ar (kWh)	-345,40
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m².ano)	1,09

Na simulação realizada recorrendo ao TRNSYS regista-se um balanço energético negativo associado à renovação do ar, com o valor de 345,40 kWh, na estação de arrefecimento. À semelhança dos resultados analisados no Energy Plus, a renovação do ar interior provoca a diminuição da temperatura no interior na habitação, resultando num aumento de ganhos térmicos pela envolvente opaca e vãos envidraçados, e consequente balanço energético.

Verifica-se uma ligeira diminuição nas necessidades nominais de arrefecimento, comparativamente com o segundo caso de estudo, que apresenta o valor de 1,15 kWh/m^2.ano. A variação

analisada resulta da superioridade do balanço energético associado à renovação de ar, em função da variação ocorrida no balanço energético da envolvente opaca e vãos envidraçados, ocorrendo menores períodos na habitação com necessidades de arrefecimento.

6.5. Comparação de resultados obtidos recorrendo às três ferramentas

O quadro 6.7 reúne os resultados obtidos nas três ferramentas durante a estação de aquecimento, indicando o balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar, assim como comparação das necessidades nominais de aquecimento entre o terceiro e o segundo caso de estudo.

Quadro 6.7 - Resultados finais de necessidades nominais de aquecimento da habitação

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-3209,11	-2343,79	-2412,64
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	-289,18	219,83	-60,97
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-2237,28	-2417,52	-1904,30
Necessidades de aquecimento terceiro caso (kWh/m².ano)	47,80	37,80	35,50
Necessidades de aquecimento caso anterior (kWh/m².ano)	29,16	17,67	19,66

A renovação de ar apresenta valores com ligeiras diferenças entre as três ferramentas, analisando-se uma concordância geral do balanço energético associado à renovação de ar nas três ferramentas. Sendo utilizado o mesmo valor de taxa horária de renovação nas três ferramentas, sem a utilização de uma calendarização de optimização de ganhos energéticos, a variação registada entre ferramentas no balanço energético associado à renovação de ar depende da duração da estação de aquecimento (o TRNSYS possui a menor duração) e da temperatura exterior (graus-dias de aquecimento considerado pelo RCCTE e ficheiros climáticos aplicados no Energy Plus e TRNSYS). Associada a uma menor duração da estação de aquecimento, o TRNSYS apresenta menores valores de perdas térmicas relacionadas com a renovação do ar e o Energy Plus apresenta valores superiores de perdas térmicas associadas a uma diferença superior entre a temperatura interior e exterior.

O balanço energético associado à envolvente opaca e vãos envidraçados apresentam uma variação insignificativa, comparativamente com valores do caso anterior, pois a temperatura permanece frequentemente a 20 ºC nas três ferramentas.

Na estação de aquecimento, o balanço energético negativo associado à renovação de ar resulta num aumento das necessidades nominais de aquecimento de 18,64, 20,13 e 15,84 kWh/m^2.ano, no RCCTE, Energy Plus e TRNSYS, respectivamente, comparativamente com o caso de estudo anterior. A renovação de ar no interior da habitação influência fortemente o comportamento térmico da habitação na estação de arrefecimento, nomeadamente com o aumento das necessidades energéticas, no entanto trata-se de um procedimento indispensável no conforto interior da habitação, em termos de oxigenação do ar e remoção de cheiros nocivos.

Os resultados obtidos recorrendo às três ferramentas na estação de arrefecimento encontram-se no quadro 6.8, com a indicação balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar, assim como comparação das necessidades nominais de arrefecimento entre o terceiro e segundo caso de estudo.

Quadro 6.8 - Resultados finais de necessidades nominais de arrefecimento da habitação

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	293,25	-229,32	31,37
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	232,10	1214,83	276,34
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-458,74	-542,81	-345,40
Necessidades de arrefecimento terceiro caso (kWh/m^2.ano)	2,22	2,06	1,09
Necessidades de arrefecimento caso anterior (kWh/m^2.ano)	4,47	1,90	1,15

Nas três ferramentas de análise do comportamento térmico verifica-se um balanço energético negativo associado à renovação do ar interior. Nas ferramentas de simulação computacional, o balanço energético negativo resulta na superioridade de períodos de tempo onde a temperatura exterior é inferior à temperatura interior da habitação.

O Energy Plus e TRNSYS realizam uma simulação dinâmica do comportamento térmico da habitação e verifica-se que o balanço energético negativo associado à renovação de ar corresponde a uma diminuição da temperatura interior da habitação em períodos nocturnos, como verificado na figura 6.1.

A figura 6.1 apresenta a evolução da temperatura no interior da habitação no período de 26 de Agosto a 1 de Setembro no terceiro caso de estudo, comparativamente com os anteriormente abordados.

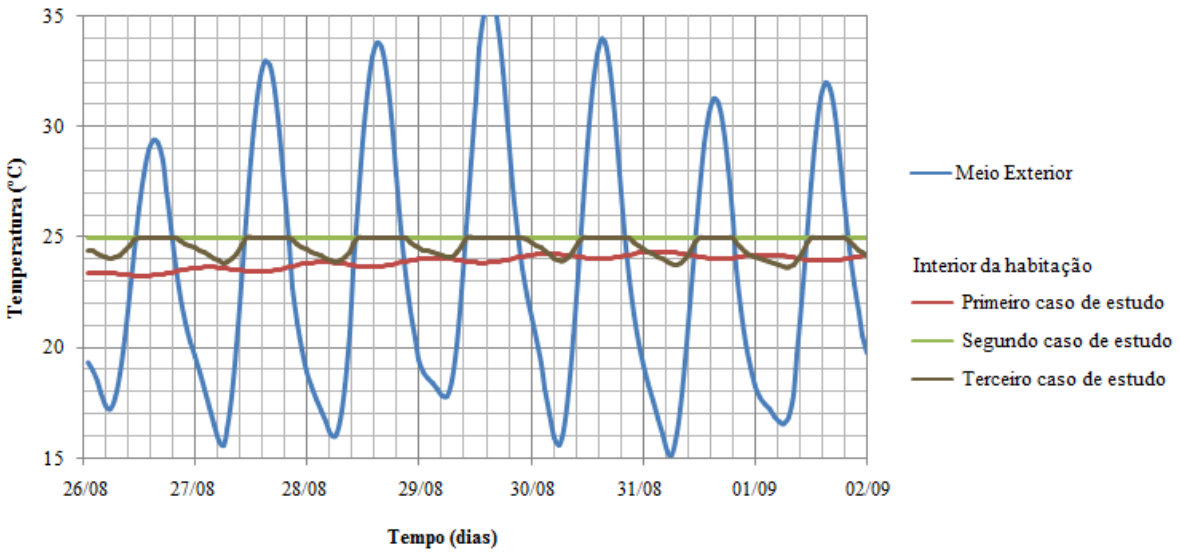


Figura 6.1 -Temperatura no interior e exterior da habitação durante o período de 26 de Agosto a 1 de Setembro

A diminuição de temperatura analisada resulta na superioridade de ganhos energéticos dos restantes elementos da habitação, nomeadamente a envolvente opaca e vãos envidraçados, verificando-se nas ferramentas computacionais um aumento no balanço energético, comparativamente com o caso de estudo anterior.

Nas ferramentas computacionais, verifica-se que o balanço energético negativo associado à renovação de ar equilibra o aumento no balanço energético da envolvente opaca e vãos envidraçados, resultando num ligeiro aumento (Energy Plus) ou diminuição (TRNSYS) das necessidades nominais de arrefecimento, comparativamente com o caso de estudo anterior.

A metodologia abordada no RCCTE, com base numa análise em regime quase estacionário, não considera a influência da renovação de ar no balanço energético dos restantes elementos da habitação. O balanço energético associado à renovação do ar apresenta o valor negativo de 458,74 kWh, resultando numa diminuição das necessidades nominais de arrefecimento de 2,25 kWh/m^2.ano. Comparativamente com os valores registados nas ferramentas computacionais, a influência da renovação de ar no comportamento térmico da habitação na estação de arrefecimento é superior, pois a análise estática aplicada pelo RCCTE não considera a inexistência de necessidades de arrefecimento no período nocturno onde a temperatura do ar interior diminui, devido a perdas térmicas associadas à renovação do ar.

Capítulo 7 Definição dos ganhos internos da habitação

O sétimo capítulo apresenta a metodologia de cálculo associada aos ganhos internos da habitação aplicada no RCCTE e definição da calendarização e valores dos ganhos térmicos associados à ocupação, iluminação e equipamentos nas ferramentas de simulação computacional. O caso de estudo aplicado nas ferramentas de simulação computacional permite a avaliação da influência dos ganhos internos no comportamento térmico da habitação e comparação com os valores obtidos no RCCTE. O capítulo subdivide-se na metodologia de cálculo dos ganhos internos, de acordo com o RCCTE (subsecção 7.1), metodologia e definição dos ganhos internos recorrendo ao Energy Plus (subsecção 7.2) e TRNSYS (subsecção 7.3). Apresenta-se os resultados obtidos nas três ferramentas e avaliação dos mesmos (subsecção 7.4) e a comparação de resultados nas três ferramentas (subsecção 7.5).

7.1. Metodologia de cálculo de acordo com o RCCTE

O RCCTE considera ganhos térmicos internos que incluem qualquer fonte de calor situada na fracção autónoma, nomeadamente os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes, calor dissipado nos equipamentos e dispositivos de iluminação.

Os ganhos de calor de fontes internas (Q_i), durante toda a estação de aquecimento, são calculados com base na seguinte equação:

$$Q_i = q_i.M.A_p.0{,}720 \quad (kWh) \tag{7.1}$$

A equação define que os ganhos internos são o produto entre o valor tabelado de ganhos térmicos internos médios por unidade da área útil de pavimento (q_i), em W/m^2, a duração média da estação convencional de aquecimento (M), em meses, e a área útil do pavimento (A_p), em m^2, tratando-se o índice 0,720 associado à conversão de unidades para obter o resultado em kWh.

A equação (7.2) representa a metodologia de cálculo dos ganhos internos durante a estação de arrefecimento, possuindo as variáveis o significado anteriormente explicado.

$$Q_i = 2{,}928.q_i.A_p \quad (kWh) \tag{7.2}$$

7.2. Definição de ganhos internos recorrendo ao Energy Plus

O Energy Plus possibilita ao utilizador a introdução dos ganhos associados a diferentes tipos de equipamento, ocupação de pessoas, dispositivos de iluminação, entre outros. Os ganhos internos apresentam fracções convectivas, radiantes e latentes, definidos em função do tipo de equipamento. Os ganhos por convecção são instantaneamente adicionados ao ar interior, os ganhos radiantes são distribuídos pelas superfícies das zonas térmicas e posteriormente transmitidos para o ar interior, e os ganhos latentes são tratados pelos dispositivos de ventilação.

O campo de introdução dos ganhos internos da ocupação da habitação permite a definição de uma calendarização associada a períodos de permanência no interior da habitação e a actividade realizadas pelos habitantes. O calor produzido pelo corpo humano encontra-se directamente relacionado com a taxa de metabolismo. Na tabela 10 da referência bibliográfica [18] encontram-se valores da taxa de metabolismo do corpo humano associadas às diferentes actividades, elaborada de acordo com dados da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE).

O quadro 7.1 apresenta a definição da ocupação e actividades realizadas na habitação no quarto caso de estudo, aplicada na simulação realizada com recurso ao Energy Plus.

Quadro 7.1 - Definição da ocupação e actividades realizadas na habitação recorrendo ao Energy Plus

Horário diário	**Ocupantes**	**Actividade**	**Taxa metabólica (W/pessoa)**
0h - 8h	4	Dormir	72
8h - 15h	0	-	-
15h - 18h	2	Escrever	108
18h - 20h	4	Cozinhar	171
20h - 24h	4	Leitura/TV/PC	99

Os principais fenómenos térmicos associados aos dispositivos de iluminação são a fracção radiante, a fracção visível e a fracção convectiva, definidas em função do tipo de lâmpada e configuração do sistema de iluminação (suspensas, embutidas ou em superfície). A tabela 13 da referência bibliográfica [18] apresenta os valores dos fenómenos referidos em função do tipo do sistema de iluminação, com base nos dados da *Illuminating Engineering Society of North America*.

O quadro 7.2 indica os dispositivos de iluminação definidos na habitação e o seu horário de activação, assim como os parâmetros de cálculo de ganhos energéticos.

Quadro 7.2 - Definição da activação dos dispositivos de iluminação

Horário activação	Iluminação	Sistema	Fracção radiante	Fracção visível	Fracção convectiva
20h - 24h	2 x 90W	Suspenso	0,42	0,18	0,40
	4 x 60W	Em superfície	0,72	0,18	0,10

Relativamente à definição dos ganhos internos associados aos equipamentos eléctricos, devido aos vários dispositivos instalados na habitação e difícil definição de um horário constante da utilização, a metodologia adoptada envolve a consideração de um valor de ganhos fixos, 400 W, ao longo do período diário com ocupação da habitação, das 15 às 24 horas.

7.3. Definição de ganhos internos recorrendo ao TRNSYS

Na definição dos ganhos internos recorrendo ao TRNSYS aplica-se as potencialidades computacionais na introdução de dados permitidos no campo respectivo do TRNBuild.

Os ganhos internos associados à ocupação da habitação resulta na combinação da taxa metabólica dos ocupantes e calendarização da ocupação. A documentação de apoio ao TRNSYS [26] apresenta dados recolhidos da norma internacional ISO 7730:2005 - *Ergonomics of the thermal environment*, definindo-se a taxa metabólica dos ocupantes considerando um grau de actividade de trabalho leve ou sentados (aplicação típica para apartamentos), com o valor de 150 W por pessoa. A definição da ocupação da habitação encontra-se descrita no quadro 7.3, à semelhança dos dados introduzidos no Energy Plus.

Quadro 7.3 - Definição da ocupação e taxa metabólica na habitação, recorrendo ao TRNSYS

Horário diário	Ocupantes	Taxa metabólica (W/pessoa)
0h - 8h	4	150
8h - 15h	0	-
15h - 18h	2	150
18h - 20h	4	150
20h - 24h	4	150

A influência dos dispositivos de iluminação nos ganhos internos da habitação realiza-se com recurso a uma combinação de um valor de energia por área de pavimento e a calendarização da sua activação. Define-se o valor de 5 W/m^2 de ganhos associados à iluminação, com uma fracção convectiva de 10% (lâmpadas incandescentes), activadas no período nocturno das 20 às 24 horas.

O TRNSYS apresenta um parâmetro associado aos ganhos energéticos associados à utilização de computadores. Define-se a utilização contemporânea de dois computadores de 240 W durante o período diário das 15 às 24 horas.

7.4. Apresentação e análise de resultados obtidos

As diferentes metodologias aplicas nas três ferramentas de análise do comportamento térmico da habitação permitem a avaliação da influência dos ganhos internos na habitação e a correlação de resultados entre os valores tabelados no quadro IV.3 do RCCTE, analisando simultaneamente as potencialidades de ambas as ferramentas de simulação computacional.

7.4.1. Resultados obtidos com a metodologia do RCCTE

De acordo com o quadro IV.3 do RCCTE, o valor a aplicar nos ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento é de 4 W/m^2 para um edifício tipo residencial. Resolvendo a equação (7.1), elabora-se o quadro 7.4, com a definição dos ganhos internos da habitação e os restantes parâmetros anteriormente calculados na definição das necessidades nominais de aquecimento.

Quadro 7.4 - Resultados na estação de aquecimento, de acordo com o RCCTE

Perdas térmicas por condução da envolvente opaca (kWh)	3209,11
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	-289,18
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	2237,28
Ganhos internos (kWh)	1831,68
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m^2.ano)	32,89

A resolução da equação (7.1) resulta no valor de ganhos internos de 1831,68 kWh na habitação durante a estação de aquecimento. As parcelas térmicas associadas à envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar permanecem idênticas aos valores do caso de estudo anterior. Verifica-se

consequentemente a diminuição das necessidades nominais de aquecimento, associada exclusivamente à adição de ganhos internos na habitação, que no caso anterior apresenta o valor de 47,80 kWh/m².ano.

O quadro 7.5 apresenta os resultados dos parâmetros de cálculo associados às necessidades nominais de arrefecimento.

Quadro 7.5 - Resultados na estação de arrefecimento, de acordo com o RCCTE

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	293,25
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	232,10
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	458,74
Ganhos internos (kWh)	1405,44
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m².ano)	12,20

Com a definição de ganhos internos na estação de arrefecimento, o comportamento térmico da habitação altera profundamente, correspondendo ao principal parâmetro na determinação das necessidades nominais de arrefecimento. Comparativamente com o caso de estudo anterior, a definição de ganhos internos resulta num aumento de 9,98 kWh/m².ano nas necessidades energéticas.

7.4.2. Resultados obtidos da simulação recorrendo ao Energy Plus

O quadro 7.6 expõe os resultados do balanço energético da envolvente opaca, dos vãos envidraçados, das perdas térmicas associadas à renovação do ar e dos ganhos internos considerados no quarto caso de estudo, permitindo assim a determinação completa das necessidades nominais de aquecimento, com recurso à metodologia aplicada no Energy Plus.

Quadro 7.6 - Resultados na estação de aquecimento, de acordo com o Energy Plus

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-2476,03
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	217,37
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	2420,55
Ganhos internos (kWh)	1730,65
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	26,02

A definição dos ganhos internos de acordo com o procedimento mencionado para o Energy Plus, com a definição da ocupação e actividades dos habitantes e calendarização dos dispositivos de iluminação e equipamentos eléctricos, resulta num valor de 1730,65 kWh, durante a estação de aquecimento.

A existência de ganhos internos na habitação corresponde a uma situação benéfica em estação de aquecimento, verificando-se a diminuição das necessidades energéticas de 11,78 kWh/m^2.ano, comparativamente com o caso de estudo anterior.

Os resultados obtidos na estação de arrefecimento encontram-se no quadro 7.7, com a indicação do balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados, renovação de ar e ganhos internos da habitação.

Quadro 7.7 - Resultados na estação de arrefecimento, de acordo com o Energy Plus

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-535,61
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	958,86
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-684,85
Ganhos internos (kWh)	1371,04
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m^2.ano)	6,78

A definição de ganhos internos na estação de arrefecimento resulta num aumento da temperatura interior da habitação. O aumento da temperatura interior desequilibra o balanço energético da habitação, onde se verifica o aumento das perdas térmicas e diminuição dos ganhos térmicos, resultando numa diminuição do balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar.

Apesar da diminuição do balanço energético associado aos três parâmetros térmicos referidos, os ganhos internos, com o valor de 1371,04 kWh, superam a diminuição analisada, resultando num aumento das necessidades nominais de aquecimento de 4,72 kWh/m^2.ano, comparativamente com o caso de estudo anterior.

7.4.3. Resultados obtidos da simulação recorrendo ao TRNSYS

Os resultados obtidos no TRNSYS durante estação de aquecimento encontram-se descritos no quadro 7.8, com a determinação do balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados, perdas térmicas associadas à renovação de ar e ganhos internos, assim como as respectivas necessidades nominais de aquecimento.

Quadro 7.8 - Resultados na estação de aquecimento, de acordo com o TRNSYS

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-2517,60
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	28,00
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	1917,80
Ganhos internos (kWh)	1477,20
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	24,45

A metodologia adoptada na definição dos ganhos internos recorrendo às potencialidades do respectivo campo no TRNBuild resulta no valor de 1477,20 kWh, durante a estação de aquecimento. Os restantes parâmetros térmicos da habitação apresentam uma ligeira diminuição, comparativamente ao caso de estudo anterior, associado ao aumento da temperatura no interior da habitação em períodos finais na estação de aquecimento. A combinação das variações nos quatro parâmetros térmicos resulta na diminuição das necessidades nominais de aquecimento em 11,05 kWh/m^2.ano, principalmente associada à introdução de ganhos internos na habitação.

O quadro 7.9 apresenta os resultados obtidos dos parâmetros de cálculo associados às necessidades nominais de arrefecimento.

Quadro 7.9 - Resultados na estação de arrefecimento, de acordo com o TRNSYS

Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-835,51
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	693,99
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-548,33
Ganhos internos (kWh)	1365,28
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m².ano)	5,63

A definição de ganhos internos na habitação, com o valor de 1365,28 kWh durante a estação de arrefecimento, resulta no aumento da temperatura interior da habitação. Com aumento de temperatura interior verifica-se o aumento das perdas térmicas e diminuição dos ganhos térmicos associados aos restantes elementos da habitação, verificando-se a diminuição do balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar.

A combinação dos ganhos internos com a diminuição do balanço energético dos restantes parâmetros resulta num aumento das necessidades nominais de arrefecimento, comparativamente com o valor anterior de 1,09 kWh/m^2.ano.

7.5. Comparação de resultados obtidos recorrendo às três ferramentas

O quadro 7.10 apresenta os resultados obtidos na estação de aquecimento recorrendo às três ferramentas de análise do comportamento térmico de edifícios, indicando o balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados, renovação de ar e ganhos internos da habitação.

Quadro 7.10 - Resultados finais de necessidades nominais de aquecimento da habitação

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-3209,11	-2476,03	-2517,60
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	-289,18	217,37	28,00
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-2237,28	-2420,55	-1917,80
Ganhos internos (kWh)	1831,68	1730,65	1477,20
Necessidades de aquecimento quarto caso (kWh/m².ano)	32,89	26,02	24,45
Necessidades de aquecimento caso anterior (kWh/m².ano)	47,80	37,80	35,50

Os ganhos internos apresentam valores distintos nas três ferramentas, devido à diferente metodologia adoptada e durações da estação de aquecimento. O TRNSYS apresenta um valor ligeiramente inferior de ganhos internos associados a uma menor duração da estação de aquecimento, de 4,4 meses, comparativamente com a duração de 5,1 e 5,3 meses considerada no Energy Plus e RCCTE, respectivamente.

Nas ferramentas de simulação computacional, durante a estação de aquecimento, os valores obtidos no balanço energético da envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar diminuem ligeiramente comparativamente com os valores registados no caso anterior, pois a temperatura interior da habitação aumenta em períodos finais da simulação.

A diminuição verificada nas necessidades de aquecimento, comparativamente com o caso de estudo interior, são referentes à introdução de ganhos internos na habitação. A simulação realizada recorrendo ao RCCTE, com valores superiores de ganhos internos, apresenta a maior variação de necessidades energéticas, de 14,91 kWh/m^2.ano. Apesar da diferença de ganhos internos registados na simulação recorrendo ao Energy Plus e TRNSYS, a variação das necessidades energéticas é semelhante, com a diminuição de 11,78 e 11,05 kWh/m^2.ano, respectivamente.

A definição de ganhos internos na habitação corresponde a uma vantagem na estação de aquecimento, verificando-se uma diminuição significativa nas necessidades energéticas. Recorrendo às ferramentas de simulação computacional, na avaliação do comportamento térmico de edifícios é

necessário evitar a definição incorrecta de actividades ou activação de dispositivos, na óptica da optimização dos ganhos internos e consequentemente a diminuição excessiva das necessidades energéticas.

A figura 7.1 apresenta o resultado final dos parâmetros térmicos da habitação no quarto caso de estudo em estação de aquecimento, recorrendo às três ferramentas.

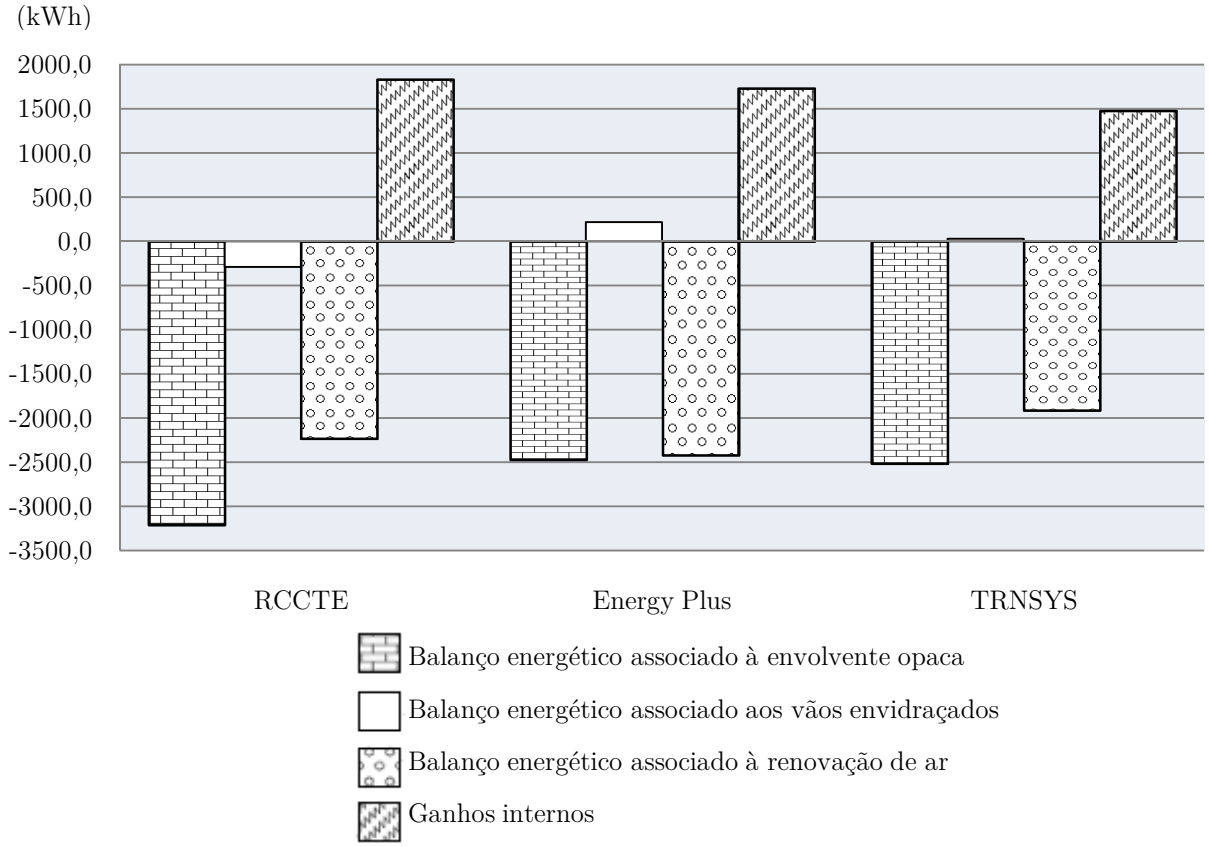


Figura 7.1 - Avaliação dos parâmetros térmicos da habitação na estação de aquecimento, recorrendo às três ferramentas

A figura anterior apresenta a comparação dos resultados obtidos nas três ferramentas associados aos parâmetros térmicos da habitação implantada em Lisboa. O RCCTE apresenta um balanço energético negativo inferior na envolvente opaca ao registado nas ferramentas computacionais, correspondendo a maiores perdas térmicas durante a estação de aquecimento. De acordo com a metodologia do RCCTE, a orientação definida dos vãos envidraçados corresponde a um balanço energético negativo na estação de aquecimento e consequente influência negativa no comportamento térmico da habitação. As ferramentas computacionais indicam resultados opostos, apresentando os vãos envidraçados balanço energético positivo e consequente influência positiva nas necessidades de aquecimento. Relativamente à renovação de ar interior e ganhos internos, dependentes da duração da

estação convencional de aquecimento, verifica-se que o TRNSYS apresenta valores inferiores entre as três ferramentas, associados a uma menor duração da simulação.

A combinação dos quatro parâmetros térmicos mencionados resulta em valores de necessidades nominais de aquecimento na habitação implantada em Lisboa, verificando-se que o RCCTE apresenta valores superiores aos registados com recurso às ferramentas computacionais, Energy Plus e TRNSYS.

O quadro 7.11 indica o resultados obtidos nas três ferramentas, durante a estação de arrefecimento, nomeadamente o balanço energético associado à envolvente opaca, aos vãos envidraçados, à renovação de ar e os ganhos internos analisados no presente capítulo.

Quadro 7.11 - Resultados finais de necessidades nominais de arrefecimento da habitação

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	293,25	-535,61	-835,51
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	232,10	958,86	693,99
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-458,74	-684,85	-548,33
Ganhos internos (kWh)	1405,44	1371,04	1365,28
Necessidades de arrefecimento quarto caso (kWh/m².ano)	12,20	6,78	5,63
Necessidades de arrefecimento caso anterior (kWh/m².ano)	2,22	2,06	1,09

Na estação de arrefecimento, as diferentes metodologias associadas aos ganhos internos apresentam valores semelhantes, permitindo assim uma análise correcta entre a calendarização definida nas ferramentas computacionais e a adoptada no RCCTE, pois apresentam duração idêntica da estação de aquecimento.

Os valores de ganhos internos são semelhantes nas três ferramentas, no entanto a simulação dinâmica realizada no Energy Plus e TRNSYS considera a alteração das condições de temperatura interior e correspondente diminuição do balanço energético associado aos restantes parâmetros analisados. Devido a esta diferença, os ganhos internos no RCCTE apresentam uma influência superior nas necessidades energéticas, com o aumento de 9,98 kWh/m^2.ano, comparativamente com o aumento no Energy Plus e TRNSYS de 4,72 e 4,54 kWh/m^2.ano, respectivamente.

A figura 7.2 apresenta os parâmetros térmicos da habitação implantada no concelho de Lisboa, durante a estação de arrefecimento, com base nos resultados descritos no quadro 7.11.

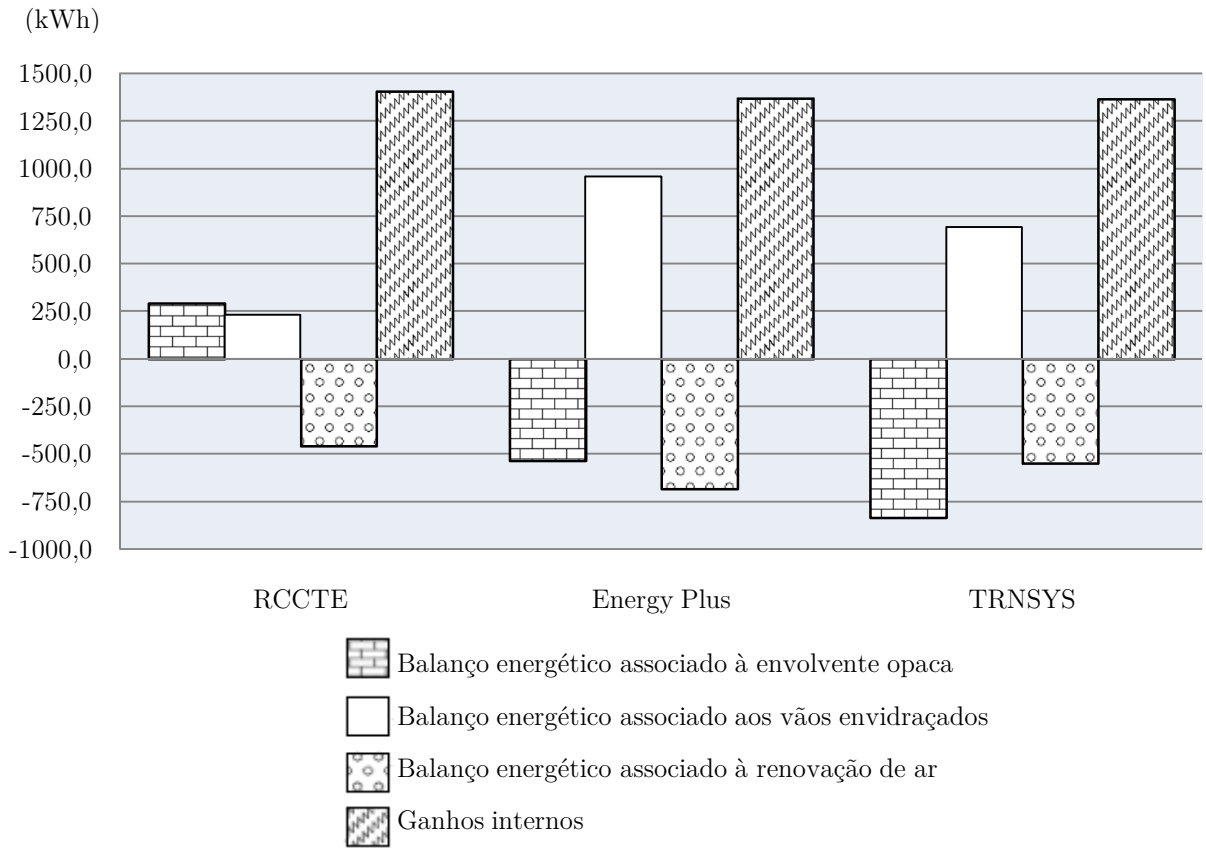


Figura 7.2 - Avaliação dos parâmetros térmicos da habitação na estação de arrefecimento, recorrendo às três ferramentas

A figura 7.2 apresenta a comparação dos resultados obtidos nas três ferramentas associados aos parâmetros térmicos da habitação implantada em Lisboa. Relativamente ao balanço energético da envolvente opaca, o RCCTE considera os ganhos solares superiores às perdas térmicas, resultando num balanço energético positivo e consequente aumento das necessidades nominais de arrefecimento. Na análise dinâmica realizada nas ferramentas de simulação computacional, a envolvente opaca apresenta valores de balanço energético negativo (períodos superiores com a temperatura interior superior à temperatura exterior), ocorrendo superiores perdas térmicas e correspondente influência benéfica no comportamento térmico da habitação durante a estação de arrefecimento.

Os vãos envidraçados também apresentam resultados distintos entre o RCCTE e as ferramentas de simulação computacional. A solução definida para os vãos envidraçados da habitação resultam num balanço energético positivo subvalorizado pelo RCCTE, comparativamente com os valores obtidos com recurso ao Energy Plus e TRNSYS, resultando assim num aumento inferior das necessidades nominais de arrefecimento. Entre as ferramentas de simulação computacional, o Energy Plus apresenta valores

superiores de balanço energético dos vãos envidraçados orientados a Sul, comparativamente com o TRNSYS, resultando assim num influência superior no comportamento térmico da habitação.

A renovação do ar interior apresenta valores semelhantes entre as três ferramentas, apresentando o Energy Plus um valor ligeiramente inferior ao registado no TRNSYS associado a valores superiores de temperatura interior da habitação (como verificado na figura 7.3). Os ganhos internos apresentam valores semelhantes entre as três ferramentas, como analisado anteriormente.

A figura 7.3 apresenta a evolução da temperatura interior da habitação implantada no concelho de Lisboa, durante a estação de arrefecimento, recorrendo às três ferramentas, apresentando valores da temperatura média diária.

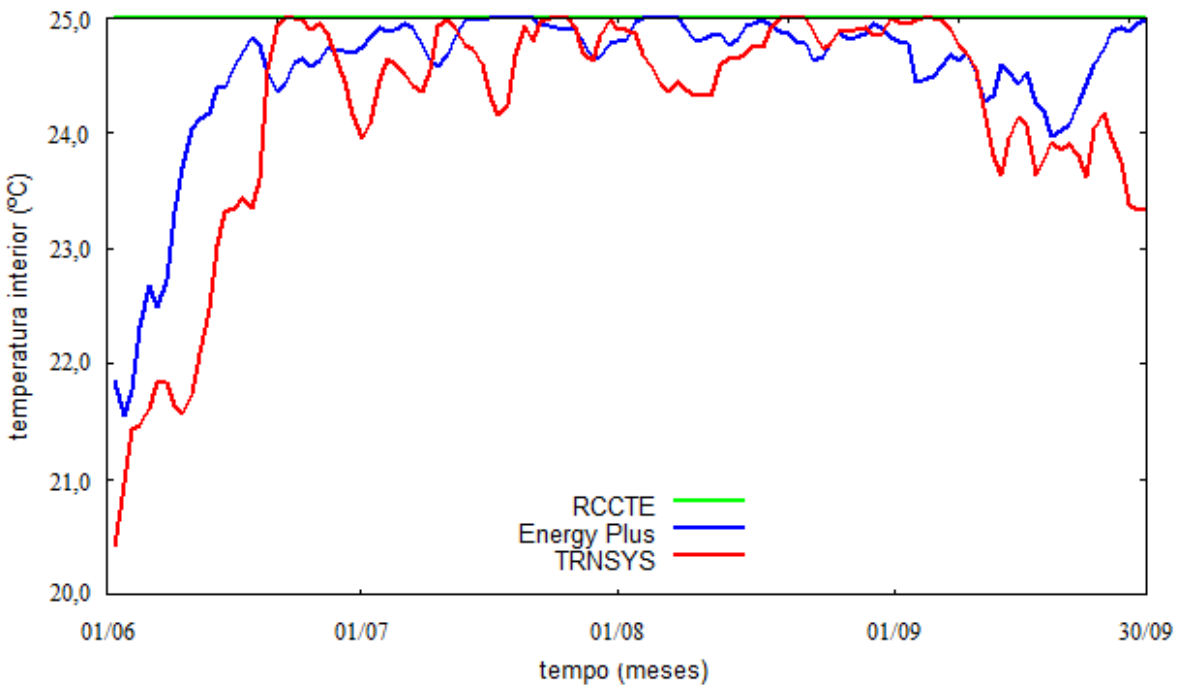


Figura 7.3 - Temperatura interior na habitação implantada em Lisboa, durante a estação de arrefecimento

O RCCTE considera uma temperatura interior de referência de 25 ºC constante na estação de arrefecimento, ao contrário da análise dinâmica aplicada nas ferramentas computacionais, resultando numa variação da temperatura interior frequentemente inferior ao valor definido pelo RCCTE. Assim verifica-se diferenças entre as necessidades nominais de arrefecimento obtidas recorrendo ao RCCTE, 12,20 kWh/m^2.ano, e às ferramentas de simulação computacionais, 6,78 e 5,63 kWh/m^2.ano, relativas ao Energy Plus e TRNSYS.

Capítulo 8 Alteração da localização da implantação da habitação

O presente capítulo expõe os resultados obtidos do comportamento térmico da habitação em diferentes localizações de Portugal continental, nomeadamente as capitais de distrito Lisboa, Porto, Faro e Évora, recorrendo ao RCCTE, Energy Plus e TRNSYS na sua análise. Os resultados obtidos são justificados em função dos dados climáticos associados a cada concelho e diferenças entre a temperatura interior e exterior. O oitavo capítulo subdivide-se nos resultados obtidos de acordo com a metodologia do RCCTE (subsecção 8.1), resultados obtidos recorrendo ao Energy Plus (subsecção 8.2) e recorrendo ao TRNSYS (subsecção 8.3). A ultima subsecção apresenta a compilação e comparação de resultados obtidos com recurso às três ferramentas de avaliação do comportamento térmico (subsecção 8.4).

8.1. Resultados de acordo com a metodologia do RCCTE

O anexo III exposto no RCCTE apresenta os dados climáticos dos concelhos de Portugal e em função do zonamento climático recolhe-se os dados associados à energia solar média mensal incidente numa superfície orientada a sul na estação de aquecimento, à temperatura média do ar exterior e intensidade da radiação solar durante a estação de arrefecimento. O quadro 8.1 apresenta os principais dados climáticos dos concelhos analisados na definição do comportamento térmico da habitação.

Quadro 8.1 - Dados climáticos nos concelhos analisados, recorrendo ao RCCTE

Dados climáticos	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Zona climática de Inverno	I_1	I_2	I_1	I_1
Zona climática de Verão	V_2S	V_1N	V_2S	V_3S
Número de graus-dias de aquecimento (ºC.dias)	1190	1610	1060	1390
Duração da estação de aquecimento (meses)	5,3	6,7	4,3	5,7
Temperatura média do ar na estação de arrefecimento (ºC)	23	19	23	23

De acordo com os dados climáticos apresentados no RCCTE, o concelho do Porto apresenta um regime de Inverno mais rigoroso que os restantes três concelhos, com um valor superior de graus-dias de aquecimento e maior duração da estação de aquecimento. Permitindo a comparação dos resultados

obtidos no concelho de Lisboa na estação de arrefecimento, realiza-se a análise da habitação implantada em Faro e Évora. O concelho de Évora apresenta um regime de Verão mais rigoroso comparativamente com Lisboa, apresentando valores superiores de radiação solar incidente em algumas orientações dos elementos construtivos. Recorrendo aos dados climáticos registados no RCCTE, os concelhos de Lisboa e Faro apresentam parâmetros idênticos na estação de arrefecimento.

Os resultados obtidos no concelho de Lisboa são idênticos aos apresentados no capítulo anterior, com a definição do balanço energético da envolvente opaca e vãos envidraçados, perdas térmicas associadas à renovação de ar e ganhos internos. A alteração do local de implantação da habitação realiza-se unicamente com a alteração dos dados climáticos introduzidos nas folhas de cálculo identificadas no RCCTE, visto que a geometria, soluções construtivas da habitação e parâmetros associados à renovação de ar e ganhos internos permanecem idênticas.

O quadro 8.2 apresenta os parâmetros térmicos associados à habitação na estação de aquecimento, implantada nos concelhos de Lisboa, Porto, Faro e Évora. Encontram-se ainda indicadas as necessidades nominais de aquecimento e seu limite máximo admissível, de acordo com a metodologia do RCCTE.

Quadro 8.2 - Resultados obtidos nos quatro concelhos na estação de aquecimento, recorrendo ao RCCTE

Concelho	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Perdas térmicas pela envolvente opaca (kWh)	3209,11	4341,73	2858,53	3748,45
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	-289,18	-651,99	-335,94	-429,11
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	2237,28	3026,90	1992,87	2613,29
Ganhos internos (kWh)	1831,68	2315,52	1486,08	1969,92
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	32,89	47,82	31,05	40,46
Necessidades de aquecimento máximas (kWh/m².ano)	59,39	78,77	53,40	68,62

O concelho do Porto apresenta um valor superior de graus-dias de aquecimento, comparativamente com os restantes três concelhos, registando-se assim maiores perdas térmicas da habitação pela envolvente opaca e renovação de ar. A combinação de valores superiores de graus-dias de aquecimento, duração da estação convencional de aquecimento e menor energia solar média mensal incidente confere à habitação implantada no Porto o menor balanço energético associado aos vãos envidraçados. Os ganhos internos da habitação apenas dependem da duração da estação de aquecimento, apresentando o concelho do Porto o valor superior de ganhos internos associado à duração de 6,7 meses. A combinação dos parâmetros térmicos analisados no concelho do Porto resulta no valor de necessidades nominais de aquecimento 47,82 kWh/m^2.ano, superiores aos registados nos restantes três concelhos.

O concelho de Faro, apesar de apresentar um valor inferior de graus-dias de aquecimento e consequente valor inferior de perdas térmicas pela envolvente opaca e renovação de ar, possui uma duração da estação de aquecimento inferior à de Lisboa, resultando em menores ganhos internos e menores ganhos solares pelos vãos envidraçados. A diminuição das perdas térmicas associadas à envolvente opaca, comparativamente com a diminuição dos ganhos internos e ganhos solares, resulta num valor de necessidades nominais de aquecimento 31,05 kWh/m^2.ano, valor inferior ao registado no concelho de Lisboa com uma diferença de 1,84 kWh/m^2.ano.

Na estação de aquecimento, o concelho de Évora apresenta um valores superiores de graus-dias de aquecimento e duração da estação de aquecimento, comparativamente com Lisboa. Com base no valor superior de graus-dias de aquecimento verifica-se maiores perdas térmicas pela envolvente opaca e renovação de ar. A duração superior da estação de aquecimento resulta em maiores ganhos internos. O balanço energético associado aos vãos envidraçados depende dos dois dados mencionados, registando-se uma superioridade das perdas térmicas e consequente diminuição do balanço energético dos vãos envidraçados, comparativamente com Lisboa. A implantação da habitação em Évora resulta num valor de necessidades energéticas de 40,46 kWh/m^2.ano na estação de aquecimento, superior ao registado no concelho de Lisboa.

De acordo com a metodologia do RCCTE, as soluções construtivas definidas na habitação possuem características térmicas adequadas, verificando-se nos quatro concelhos analisados, as necessidades nominais de aquecimento apresentam valores inferiores ao limites de energia útil para aquecimento.

O quadro 8.3 indica os resultados obtidos dos parâmetros térmicos da habitação nos quatro concelhos em estudo, Lisboa, Porto, Faro e Évora, durante a estação de arrefecimento. Apresentam-se as necessidades nominais de arrefecimento e respectivas limitações impostas pelo RCCTE em função do zonamento climático.

Quadro 8.3 - Resultados obtidos nos quatro concelhos na estação de arrefecimento, recorrendo ao RCCTE

Concelho	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	293,25	-947,07	293,25	295,83
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	192,82	-330,24	192,82	215,79
Perdas térmicas associadas à renovação de ar (kWh)	458,74	1376,21	458,74	458,74
Ganhos internos (kWh)	1405,44	1405,44	1405,44	1405,44
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m^2.ano)	12,20	1,62	12,20	12,40
Necessidades de arrefecimento máximas (kWh/m^2.ano)	32,00	16,00	32,00	32,00

O zonamento climático no concelho do Porto é V_1N, correspondendo aos valores inferiores de temperatura média diária e radiação solar incidente em elementos horizontais e orientações Este e Oeste, na estação de arrefecimento. O valor de temperatura media diária inferior resulta em maiores perdas térmicas na envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar.

O concelho do Porto apresenta os menores valores de radiação solar incidente na estação de arrefecimento em elementos horizontais, comparativamente com os restantes três concelhos analisados, resultando em menores ganhos solares associados à envolvente opaca, resultando no único concelho no qual a habitação apresenta um balanço energético negativo na envolvente opaca. As orientações Sul e Norte apresentam valores idênticos de radiação solar incidente no zonamento climático definido pelo RCCTE nos concelhos de Porto, Lisboa e Faro, assim o balanço energético negativo dos vãos envidraçados, registado no concelho do Porto, depende de maiores perdas térmicas por condução. No concelho do Porto, os ganhos internos são o único parâmetro que contribuem negativamente no comportamento térmico da habitação durante a estação de arrefecimento, resultando num valor de necessidades energéticas de 1,62 kWh/m^2.ano, comparativamente com o valor limite, 16,00 kWh/m^2.ano.

Ambos os concelhos de Lisboa e Faro apresentam igual zonamento climático na estação de arrefecimento, V_2S, com valores idênticos de temperatura média exterior e radiação solar incidente em elementos horizontais e verticais, com distintas orientações. Assim os parâmetros térmicos associados à habitação são idênticos em Lisboa e Faro, e consequentes necessidades nominais de arrefecimento 12,20 kWh/m^2.ano.

No concelho de Évora, a temperatura média diária exterior é idêntica aos concelhos de Lisboa e Faro, resultando em perdas térmicas pela envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar idênticas às registadas nas habitações implantadas em Lisboa e Faro. Associado ao zonamento climático do concelho de Évora, a orientação Norte e Sul apresentam valores ligeiramente superiores de radiação incidente e valor inferiores na orientação Este e Oeste. A combinação de diferenças existentes entre orientações, confere à habitação maior ganhos solares associados à envolvente opaca e vãos envidraçados, registando-se valores ligeiramente superiores no seu balanço energético, comparativamente com Lisboa e Faro. Os ganhos internos nos quatro concelhos são idênticos, dependentes da duração da estação de arrefecimento. Assim, as necessidades energéticas da habitação implantada em Évora são de 12,40 kWh/m^2.ano, ligeiramente superiores aos valores registados em Lisboa e Faro.

8.2. Resultados obtidos recorrendo ao Energy Plus

Aplicando pressupostos idênticos ao RCCTE na determinação dos parâmetros climáticos da estação convencional de aquecimento, apresenta-se no quadro 8.4 a duração da estação de aquecimento, graus-dias de aquecimento e temperatura média do ar na estação de arrefecimento nos quatro concelhos analisados, recorrendo aos ficheiros climáticos aplicados no Energy Plus.

Quadro 8.4 - Dados climáticos nos concelhos analisados, recorrendo ao Energy Plus

Dados climáticos	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Número de graus-dias de aquecimento (ºC.dias)	1267	1839	994	1578
Duração da estação de aquecimento (meses)	5,1	7,6	4,9	6,0
Temperatura média do ar na estação de arrefecimento (ºC)	21,6	18,6	22,7	21,9

De acordo com os dados apresentados no quadro anterior, de acordo com os ficheiros climáticos do Energy Plus, os concelhos de Porto e Évora possuem uma estação de aquecimento mais rigorosa que o concelho de Lisboa, com superior duração da estação e graus-dias de aquecimento. Os concelhos de Évora e Faro apresentam temperatura média na estação de arrefecimento superior ao concelho de Lisboa.

Os resultados obtidos na estação de aquecimento encontram-se no quadro 8.5, com a indicação do balanço energético associado à envolvente opaca, aos vãos envidraçados, à renovação de ar e ganhos internos, assim como necessidades energéticas da habitação implantada nos concelhos de Lisboa, Porto, Faro e Évora.

Quadro 8.4 - Resultados obtidos nos quatro concelhos na estação de aquecimento, recorrendo ao Energy Plus

Concelho	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-2476,03	-3456,68	-1936,24	-2995,06
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	217,37	242,51	534,82	294,24
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-2420,55	-3599,76	-1951,10	-2980,12
Ganhos internos (kWh)	1730,65	2551,03	1651,99	2011,60
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	26,02	36,73	15,76	31,85

O concelho do Porto apresenta uma duração da estação de aquecimento superior e valores inferiores de temperatura exterior, resultando em maiores perdas térmicas pela envolvente opaca, vãos

envidraçados e renovação de ar. No entanto, quanto maior a duração da estação de aquecimento, maiores são os ganhos solares associados aos vãos envidraçados, verificando-se valores superiores de balanço energético nos vãos envidraçados, comparativamente com o concelho de Lisboa. A habitação implantada no Porto apresenta os valores superiores de ganhos internos, devido a uma maior duração da estação de aquecimento. A conciliação do balanço energético negativo associado à envolvente opaca e renovação de ar e balanço energético positivo associado aos vãos envidraçados e ganhos internos, resultam num valor de necessidades nominais de aquecimento de 36,73 kWh/m^2.ano na habitação implantada no Porto, correspondendo à situação de estudo com maiores necessidades energéticas na estação de aquecimento.

Semelhante ao caso da habitação no Porto, no concelho de Évora a duração da estação de aquecimento é superior a Lisboa, apresentando superiores perdas térmicas pela envolvente opaca e renovação de ar, associado aos ganhos internos, e maiores ganhos solares pelos vãos envidraçados e correspondente balanço energético, comparativamente com o concelho de Lisboa. As necessidades nominais de aquecimento da habitação em Évora são 31,85 kWh/m^2.ano, ligeiramente superiores aos valores estimados no concelho de Lisboa, e inferiores ao concelho do Porto.

Na habitação implantada em Faro, a combinação de temperaturas exteriores superiores e uma duração da estação de aquecimento inferior resulta num balanço energético pela envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar superiores, contrastando com a diminuição registada nos ganhos internos, comparativamente com os restantes três concelhos. Com base nos resultados analisados, a habitação apresenta o valor de 15,76 kWh/m^2.ano de necessidades nominais de aquecimento, significativamente inferior aos restantes concelhos.

O quadro 8.6 apresenta o balanço energético associado à envolvente opaca, aos vãos envidraçados, à renovação de ar e ganhos internos, assim como necessidades nominais de arrefecimento na habitação implantada nos concelhos de Lisboa, Porto, Faro e Évora.

Quadro 8.5 - Resultados obtidos nos quatro concelhos na estação de arrefecimento, recorrendo ao Energy Plus

Concelho	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-535,61	-742,70	-205,53	-347,50
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	958,86	990,25	923,79	941,93
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-684,85	-1150,31	-512,29	-593,28
Ganhos internos (kWh)	1371,04	1371,04	1371,04	1371,04
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m^2.ano)	6,78	0,56	10,32	7,66

Na estação de arrefecimento, o comportamento térmico da habitação obtido, recorrendo a ferramentas de simulação computacional, depende fortemente da temperatura interior da habitação, que varia entre os limites definidos de temperatura, nomeadamente 20 e 25 ºC, em função da temperatura exterior, fluxos de calor ocorridos e radiação solar incidente.

A figura 8.1 representa a evolução da temperatura média diária no interior da habitação implantada nos quatro concelhos durante a estação de arrefecimento. Como mencionado anteriormente, a temperatura interior da habitação depende fortemente da temperatura exterior, representada na figura 8.2, com base nos ficheiros climáticos definidos no Energy Plus nos quatro concelhos.

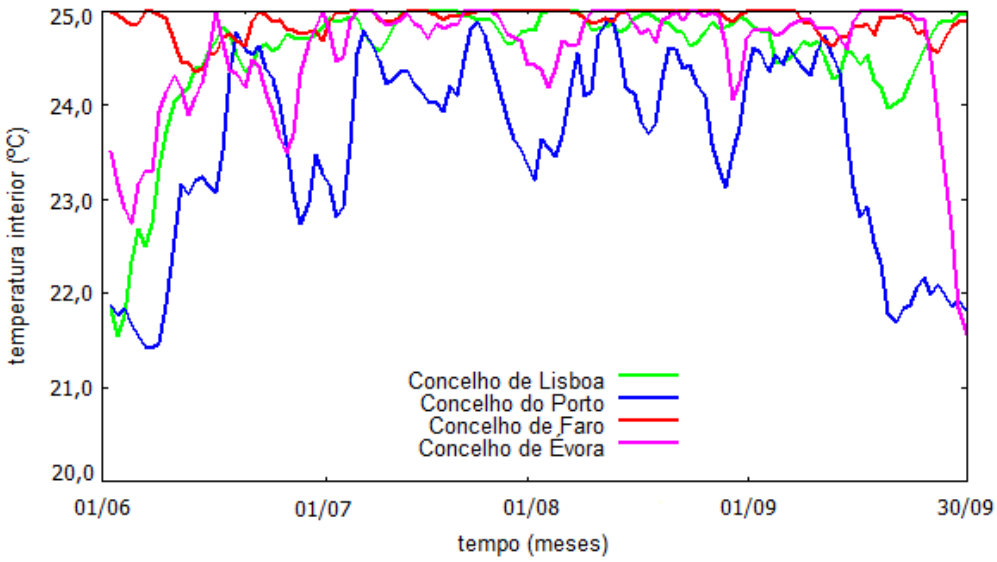


Figura 8.1 - Temperatura interior na habitação implantada nos quatro concelhos, na estação de arrefecimento

A relação entre a temperatura interior e temperatura exterior verifica-se visualmente com a análise da habitação implantada em Évora, na qual as variações entre temperatura máximas e mínimas exteriores superiores, resulta na diferença entre valores de temperatura interior baixos e valores de temperatura limite de 25 ºC.

O concelho do Porto apresenta os menores valores de temperatura média diária exterior, resultando na habitação com temperaturas interiores inferiores, comparativamente com os restantes três concelhos. Com base na diferença de temperaturas analisadas, a habitação implantada no Porto possui o menor balanço energético associado à envolvente opaca e renovação de ar.

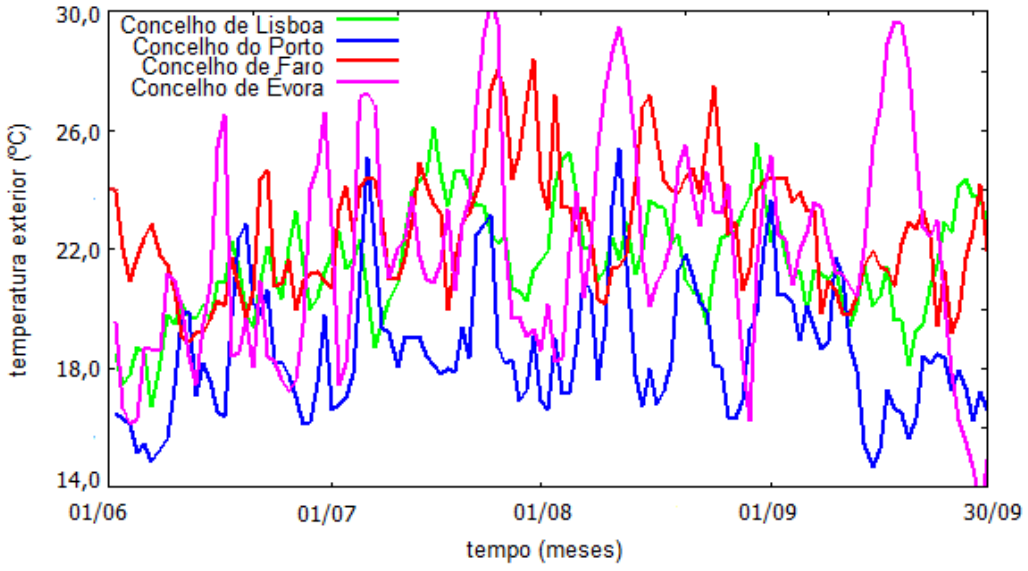


Figura 8.2 - Temperatura média diária exterior nos quatro concelhos, na estação de arrefecimento

De acordo com resultados obtidos no Energy Plus no caso de estudo abordando os vãos envidraçados, na estação de arrefecimento, o vão envidraçado orientado a Norte com área de 11,75 m^2 define maioritariamente o balanço energético associado aos vãos envidraçados. Nas simulações realizadas da habitação em diferentes concelhos, verifica-se que os ganhos solares associados aos vãos envidraçados são superiores no concelho do Porto, comparativamente com os restantes três concelhos. Este resultado é obtido devido à calendarização dos dispositivos de protecção móvel dos vãos envidraçados definida no Energy Plus, considerando a sua activação no período em que a habitação se encontra em arrefecimento. Assim, a habitação implantada no concelho do Porto, com períodos inferiores de necessidades energéticas e correspondente activação dos estores, apresenta maiores ganhos solares pelos vãos envidraçados e correspondente balanço energético. Os valores negativos de balanço energético associado à envolvente opaca e renovação de ar reduzem as necessidades energéticas associadas aos ganhos internos e balanço energético positivo associado aos vãos envidraçados, registando-se o valor de 0,56 kWh/m^2.ano de necessidades nominais de arrefecimento na habitação implantada no Porto.

Na habitação implantada em Évora os balanços energéticos associados à envolvente opaca e renovação de ar são superiores aos registados em Lisboa. O balanço energético associado aos vãos envidraçados é semelhante nos dois concelhos, com o equilíbrio entre as inferiores perdas térmicas nos vãos envidraçados e inferiores ganhos solares registados em Évora, associados a uma duração superior da activação dos dispositivos de protecção móvel, comparativamente com Lisboa. As diferenças registadas nos três parâmetros térmicos mencionados resulta num valor ligeiramente superior de necessidades nominais de arrefecimento na habitação implantada em Évora, 7,66 kWh/m^2.ano, complementada por

resultados da figura 8.1 que exibem uma maior duração do período na qual habitação apresenta temperatura interior de 25 ºC.

O concelho de Faro apresenta valores superiores de temperatura média diária exterior, no decorrer da estação de arrefecimento, correspondendo a valores superiores de temperatura interior da habitação. Com base na diferença de temperaturas analisada, a habitação implantada em Faro apresenta os valores superiores de balanço energético associado à envolvente opaca e renovação de ar, comparativamente com os restantes três concelhos. O valor significativamente superior de balanço energético registado na envolvente opaca da habitação, comparativamente com Évora e Lisboa, deve-se à maior incidência solar nas paredes verticais orientadas a Este e Oeste, resultando em temperaturas superiores na superfície exterior e menores perdas térmicas pela envolvente opaca. Os vãos envidraçados apresentam menores ganhos solares devido a um período superior de activação dos dispositivos de protecção móvel, resultando no menor balanço energético dos vãos envidraçados no concelho de Faro. A conciliação dos três parâmetros térmicos analisados, tendo em conta que os ganhos internos são idênticos nos quatro concelhos, conferem à habitação implantada em Faro o valor superior de necessidades nominais de arrefecimento de 10,32 kWh/m^2.ano.

8.3. Resultados obtidos recorrendo ao TRNSYS

Á semelhança do procedimento adoptado no Energy Plus, torna-se necessário a determinação da duração da estação de aquecimento nos quatro concelhos, de acordo com a definição do RCCTE, permitindo assim a comparação de resultados. O quadro 8.7 apresenta os dados climáticos associados aos concelhos de Lisboa, Porto, Faro e Évora, obtidos nos respectivos ficheiros climáticos aplicados no TRNSYS.

Quadro 8.7 - Dados climáticos nos concelhos analisados, recorrendo ao TRNSYS

Dados climáticos	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Número de graus-dias de aquecimento (ºC.dias)	1019	1811	964	1576
Duração da estação de aquecimento (meses)	4,4	6,8	4,4	5,9
Temperatura média do ar na estação de arrefecimento (ºC)	21,8	19,1	22,2	22,0

De acordo com os dados do quadro anterior, os concelhos de Évora e Porto apresentam um regime de Inverno mais rigoroso que o concelho de Lisboa, com uma duração da estação de aquecimento

superior e respectivos graus-dias de aquecimento. Na estação de arrefecimento, os concelhos de Faro e Évora apresentam temperaturas médias diárias superiores ao concelho de Lisboa.

Os resultados obtidos na estação de aquecimento encontram-se no quadro 8.8, com a indicação do balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados, renovação de ar e ganhos internos, assim como necessidades energéticas da habitação implantada nos concelhos de Lisboa, Porto, Faro e Évora.

Quadro 8.6 - Resultados obtidos nos quatro concelhos na estação de aquecimento, recorrendo ao TRNSYS

Concelho	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-2517,60	-4349,89	-2404,65	-3774,65
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	28,00	-81,84	212,94	51,99
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-1917,80	-3409,44	-1812,50	-2982,78
Ganhos internos (kWh)	1477,20	2338,89	1477,20	2014,17
Necessidades nominais de aquecimento (kWh/m².ano)	24,45	45,74	21,09	39,15

O ficheiro climático do concelho do Porto apresenta valores inferiores de temperatura exterior ao longo da estação de aquecimento, comparativamente com os restantes concelhos, resultando num consumo energético superior para manter a temperatura interior da habitação constante a 20 ºC. A combinação de valores inferiores de temperatura exterior e maior duração da estação de aquecimento registadas no concelho do Porto, resultam em valores inferiores de balanço energético associado à envolvente opaca e renovação de ar. Relativamente aos vãos envidraçados, a habitação implantada no Porto é a única que apresenta balanço energético negativo, com ganhos solares inferiores às perdas térmicas. A maior duração da estação de aquecimento confere à habitação os maiores ganhos internos devido à ocupação e equipamentos activados. No concelho do Porto, a habitação apresenta os valores superiores de necessidades nominais de aquecimento, de 45,74 kWh/m².ano, comparativamente com a habitação implantada em Lisboa, Faro e Évora.

O concelho de Évora apresenta uma duração da estação de aquecimento e graus-dias de aquecimento superior a Lisboa e Faro. Assim, a habitação implantada em Évora apresenta valores inferiores de balanço energético da envolvente opaca e perdas térmicas associadas à renovação de ar. A maior exposição solar da habitação confere maiores ganhos solares e correspondente valor superior de balanço energético dos vãos envidraçados, comparativamente com o concelho de Lisboa. A habitação do concelho de Évora o valor de necessidades energéticas de 39,15 kWh/m².ano, superior ao valor de 24,45 kWh/m².ano registado em Lisboa.

Os concelhos de Faro e Lisboa apresentam igual duração da estação de aquecimento, no entanto no concelho de Faro o número de graus-dias de aquecimento é inferior, verificando-se assim valores superiores de balanço energético associado à renovação de ar, envolvente opaca e vãos envidraçados (maiores ganhos solares), comparativamente com Lisboa. Os valores superiores nos três parâmetros térmicos mencionados resultam num valor de necessidades nominais de aquecimento 21,09 kWh/m².ano, correspondendo ao valor inferior na habitação comparativamente com os restantes concelhos analisados.

O quadro 8.9 indica os parâmetros térmicos das habitações implantadas em Lisboa, Porto, Faro e Évora, na estação de arrefecimento, obtidos recorrendo ao TRNSYS.

Quadro 8.7 - Resultados obtidos nos quatro concelhos na estação de arrefecimento, recorrendo ao TRNSYS

Concelho	**Lisboa**	**Porto**	**Faro**	**Évora**
Balanço energético associado à envolvente opaca (kWh)	-835,51	-949,56	-760,98	-748,65
Balanço energético associado aos vãos envidraçados (kWh)	693,99	455,87	641,84	679,72
Balanço energético associado à renovação de ar (kWh)	-548,33	-846,39	-481,94	-457,22
Ganhos internos (kWh)	1365,28	1365,28	1365,28	1365,28
Necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m².ano)	5,63	0,37	6,37	7,10

As figuras 8.3 e 8.4 representa a temperatura diária média no interior e exterior da habitação, respectivamente, permitindo assim a analise detalhada dos resultados obtidos na habitação durante estação de arrefecimento, nos quatro concelhos em estudo.

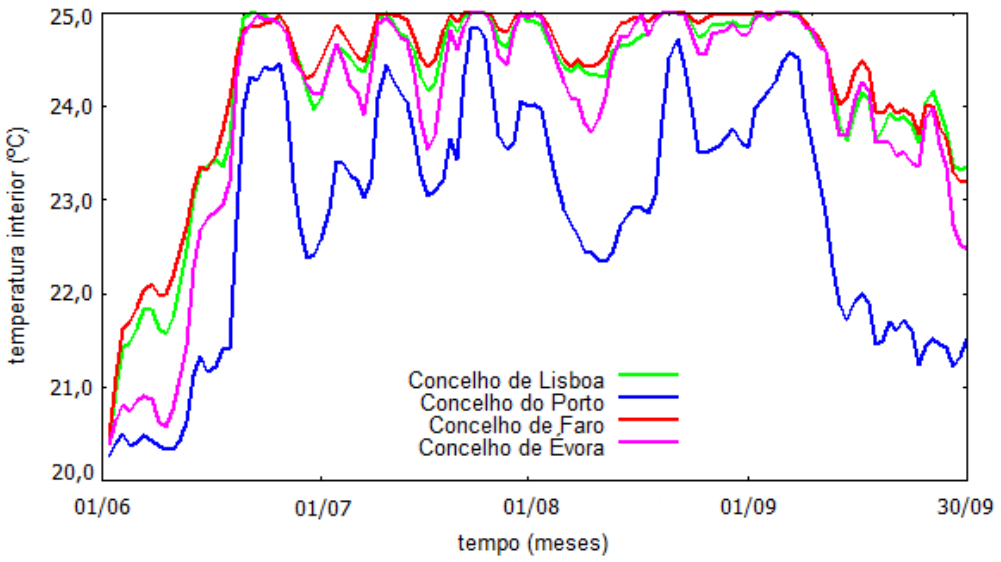


Figura 8.3 - Temperatura interior na habitação implantada nos quatro concelhos, na estação de arrefecimento

Á semelhança dos resultados obtidos no Energy Plus, a temperatura interior da habitação depende fortemente da temperatura exterior, registando-se uma evolução semelhante entre a temperatura máxima no interior e temperatura exterior superior. O concelho do Porto apresenta valores inferiores de temperatura exterior ao longo da estação de arrefecimento, comparativamente com os restantes três concelhos com valores semelhantes .

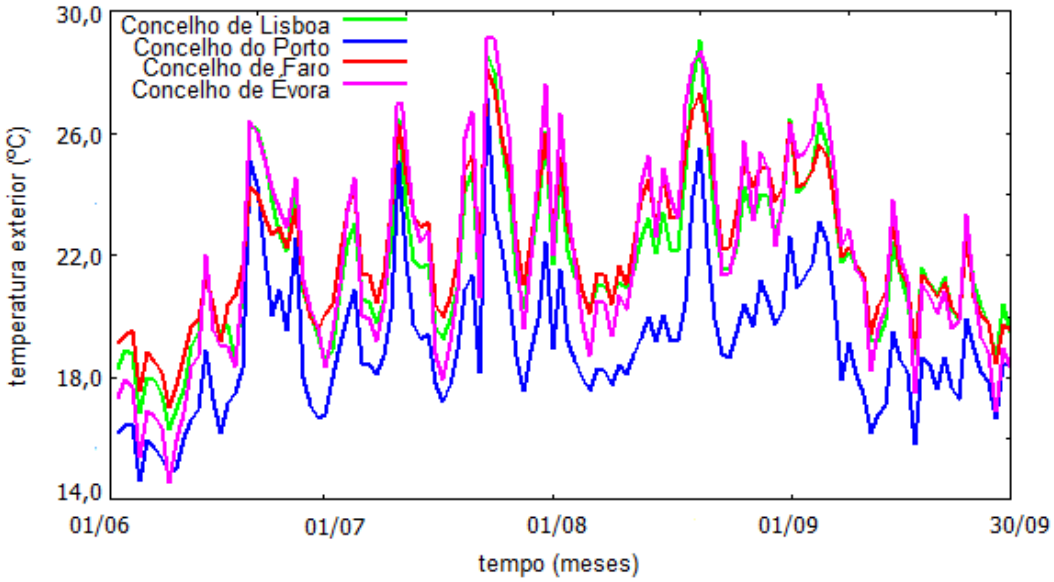


Figura 8.4 - Temperatura média diária exterior nos quatro concelhos, na estação de arrefecimento

A habitação implantada no Porto, com valores inferiores de temperatura interior apresenta menores valores de balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados e renovação de ar, principalmente influenciados pela temperatura exterior inferior. Ao contrário da calendarização da activação dos dispositivos de protecção móvel adoptada no Energy Plus, o TRNSYS a activação depende de uma calendarização constante ao longo da estação de arrefecimento, com uma diminuição percentual dos ganhos solares associado aos vãos envidraçados. Assim, no concelho do Porto, verificam-se os valores inferiores de ganhos solares e respectivo balanço energético pelos vãos envidraçados. Os ganhos internos da habitação e balanço energético equilibra a temperatura interior da habitação, resultando num valor de 0,37 kWh/m^2.ano de necessidades nominais de arrefecimento, associado a curtos períodos com a habitação a 25 ºC.

Os concelhos de Lisboa, Faro e Évora indicam valores semelhantes nos parâmetros térmicos associados à habitação. De acordo com os resultados do TRNSYS, a habitação implantada em Évora apresenta os valores superiores de balanço energético associado à envolvente opaca e renovação de ar, consequente de uma diferença inferior de temperatura interior e exterior, comparativamente com os

restantes concelhos. Nos três concelhos, os vãos envidraçados apresentam valores de balanço energético positivos semelhantes, com diferenças ligeiras em termos de perdas térmicas e ganhos solares entre análises. A diferença analisada entre os três parâmetros térmicos da habitação resulta num valor superior de necessidades energéticas de 7,10 kWh/m^2.ano no concelho de Évora, comparativamente com o valor 6,37 kWh/m^2.ano de Faro. O concelho de Lisboa apresenta um balanço energético associado aos vãos envidraçados superior, no entanto, com valores inferiores de balanço energético pela envolvente opaca e renovação de ar resulta num valor de necessidades nominais de arrefecimento de 5,63 kWh/m^2.ano, ligeiramente inferior aos resultados nos concelhos de Faro e Évora.

8.4. Comparação de resultados nas três ferramentas

A presente secção compila os resultados analisados anteriormente, permitindo a avaliação e influência dos parâmetros térmicos no comportamento térmico da habitação nos quatro concelhos, recorrendo às três ferramentas, nomeadamente o RCCTE, Energy Plus e TRNSYS.

O quadro 8.10 dispõe os dados climáticos da estação de aquecimento associados a cada concelho e necessidades energéticas da habitação nos quatro concelhos, recorrendo às três ferramentas.

Quadro 8.8 - Complicação de dados climáticos e necessidades de aquecimento nos quatro concelhos

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Duração da estação aquecimento em Lisboa (meses)	5,3	5,1	4,4
Número de graus-dia de aquecimento (ºC.dia)	1190	1267	1019
Necessidades de aquecimento em Lisboa (kWh/m^2.ano)	32,89	26,02	24,45
Duração da estação aquecimento no Porto (meses)	6,7	7,6	6,8
Número de graus-dia de aquecimento (ºC.dia)	1610	1839	1811
Necessidades de aquecimento no Porto (kWh/m^2.ano)	47,82	36,73	45,74
Duração da estação aquecimento em Faro (meses)	4,3	4,9	4,4
Número de graus-dia de aquecimento (ºC.dia)	1060	994	964
Necessidades de aquecimento em Faro (kWh/m^2.ano)	31,05	15,76	21,10
Duração da estação aquecimento em Évora (meses)	5,7	6,0	5,9
Número de graus-dia de aquecimento (ºC.dia)	1390	1578	1576
Necessidades de aquecimento em Évora (kWh/m^2.ano)	40,46	31,85	39,15

A duração da estação de aquecimento nos quatro concelhos foi definida de acordo com o pressuposto indicado no RCCTE, iniciando no primeiro decendio, posterior a 1 de Outubro, em que a temperatura média diária é inferior a 15ºC e com termo no último decendio em que a temperatura

referida é ainda inferior a 15 ºC, antes de 31 de Maio. A duração da estação de aquecimento é directamente proporcional ao número de graus-dias de aquecimento, verificando-se que as ferramentas computacionais fornecem valores superiores dos dois parâmetros referidos nos concelhos de Évora e Porto, com regimes de Inverno mais rigorosos.

O Energy Plus é a ferramenta que apresenta valores inferiores de necessidades de aquecimento nos concelhos do Porto, Faro e Évora, correspondendo o valor inferior registado em Lisboa obtido com recurso ao TRNSYS, associado principalmente a uma menor duração da estação de aquecimento. O RCCTE fornece os valores superiores de necessidades nominais de aquecimento nos quatro concelhos analisados. Nos concelhos de Lisboa e Faro, o TRNSYS regista valores de necessidades energéticas próximas dos valores obtidos no Energy Plus, enquanto que nos concelho do Porto e Évora, os valores registados são semelhantes aos obtidos com recurso ao RCCTE.

A figura 8.5 permite analisar as diferenças registadas, com a indicação gráfica conjunta do balanço energético associado à envolvente opaca, vãos envidraçados, renovação de ar e ganhos internos, com recurso à três ferramentas de análise do comportamento térmico de edifícios.

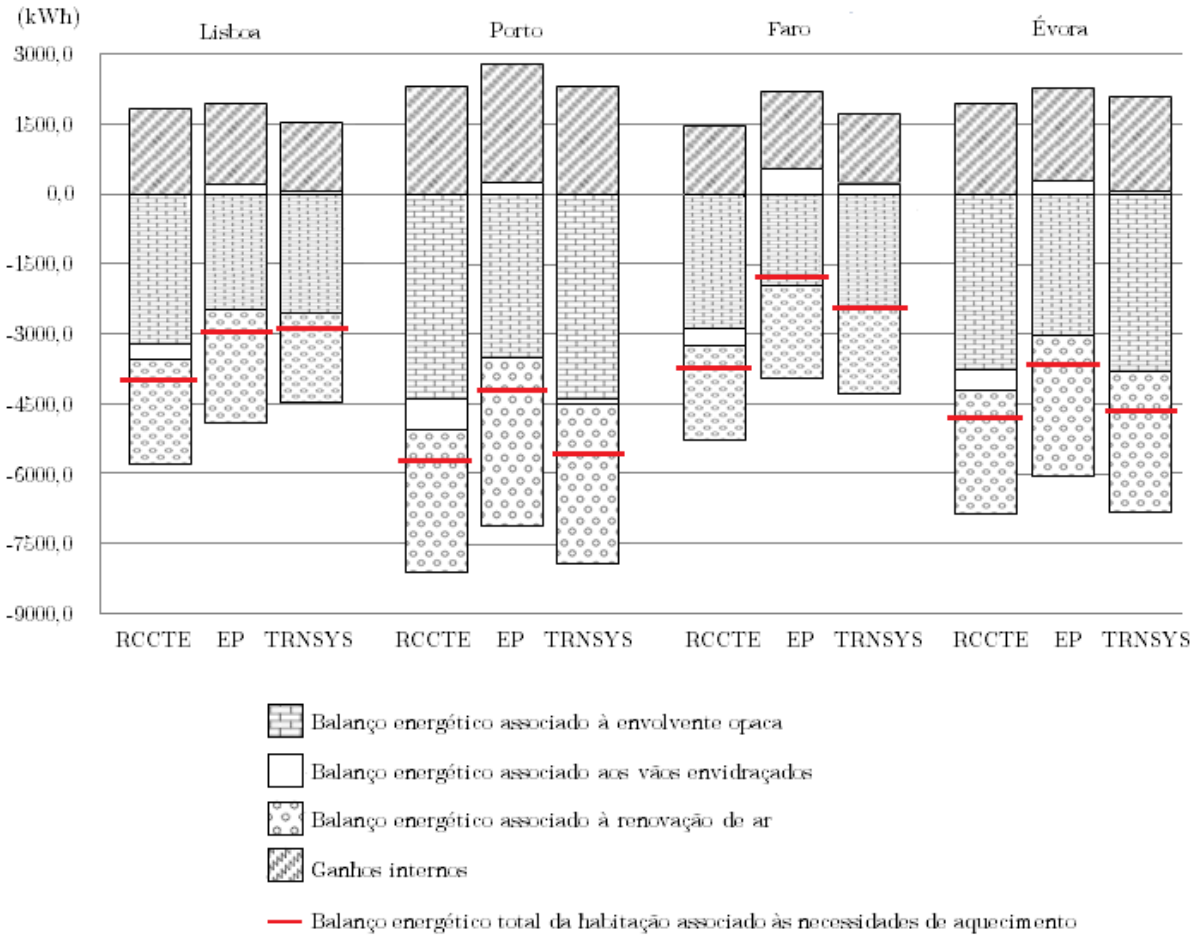


Figura 8.5 - Comparação de parâmetros térmicos nos quatro concelhos, na estação de aquecimento

No concelho de Lisboa, a menor duração da estação de aquecimento do TRNSYS resulta em menores perdas térmicas associadas à renovação de ar, correspondendo ao principal parâmetro que influencia o valor inferior nas necessidades de aquecimento, comparativamente com o Energy Plus. A análise recorrendo ao RCCTE resulta em maiores perdas térmicas associadas à envolvente opaca, correspondendo a um valor superior de necessidades nominais de aquecimento, entre as três ferramentas.

No concelho do Porto registam-se valor semelhantes de perdas térmicas pela envolvente opaca e renovação de ar na análise realizada no RCCTE e TRNSYS. Com menores ganhos solares e consequente balanço energético associado aos vãos envidraçados, as necessidades de aquecimento do RCCTE são superiores comparativamente ao TRNSYS. Na simulação realizada com recurso ao Energy Plus, registam-se menores perdas térmicas pela envolvente opaca e balanço energético positivo nos vãos envidraçados, resultando na ferramenta com menores necessidades de aquecimento no concelho do Porto.

No concelho de Faro, a análise elaborada com recurso ao RCCTE resulta em maiores perdas térmicas pela envolvente opaca e balanço energético negativo dos vãos envidraçados, contrastando com o valor positivo resultante nas simulações computacionais. Assim, as necessidades nominais de aquecimento resultantes do RCCTE são superiores, comparativamente com os valores obtidos no Energy Plus e TRNSYS.

No concelho de Évora, as menores perdas térmicas pela envolvente opaca e valor positivo de balanço energético dos vãos envidraçados, resulta em menores necessidades energéticas na simulação realizada com recurso ao Energy Plus, comparativamente com os resultados do RCCTE e TRNSYS.

De acordo com os resultados obtidos nos quatro concelhos, expostos na figura 8.5, a metodologia aplicada no Energy Plus resulta em menores perdas térmicas pela envolvente opaca, comparativamente com a metodologia do TRNSYS e RCCTE.

A orientação e geometria definida nos vãos envidraçados da habitação corresponde a um balanço energético negativo nos quatro concelhos, quando analisada de acordo com os pressupostos do RCCTE, onde as perdas térmicas por condução superam os ganhos solares. Resultados opostos verificam-se na análise realizada com o Energy Plus, onde o balanço energético dos vãos envidraçados orientados a Sul se apresenta positivo, com comportamento benéfico durante a estação de aquecimento nos quatro concelhos. O TRNSYS fornece valores inferiores de balanço energético associado aos vãos envidraçados, comparativamente com o Energy Plus, apresentando valores positivos nos concelhos de Lisboa, Faro e Évora, com excepção ao concelho de Porto, no qual as perdas térmicas por condução superam os ganhos solares. Como analisado no quinto capítulo, caso a habitação apresente vão envidraçados de áreas superiores orientados a Sul, as diferenças de necessidades de aquecimento entre as ferramentas computacionais e o RCCTE seriam superiores.

Os ganhos internos, apesar da diferente definição introduzida nas três ferramentas, apresentam influência semelhante no comportamento térmico da habitação nos quatro concelhos, apresentando as simulações com maiores durações da estação de aquecimento valores superiores de ganhos internos.

O seguinte quadro apresenta os valores das necessidades nominais de arrefecimento nos quatro concelhos em estudo, recorrendo às três ferramentas de análise do comportamento térmico da habitação.

Quadro 8.9 - Complicação das necessidades de arrefecimento nos quatro concelhos

Ferramenta de análise do comportamento térmico	**RCCTE**	**Energy Plus**	**TRNSYS**
Necessidades de arrefecimento em Lisboa (kWh/m².ano)	12,20	6,78	5,63
Necessidades de arrefecimento no Porto (kWh/m².ano)	1,62	0,56	0,37
Necessidades de arrefecimento em Faro (kWh/m².ano)	12,20	10,32	6,37
Necessidades de arrefecimento em Évora (kWh/m².ano)	12,40	7,66	7,10

Os resultados apresentados no quadro 8.11 indicam valores superiores de necessidades nominais de arrefecimento nos quatro concelhos, recorrendo à metodologia do RCCTE. Entre as duas ferramentas de simulação computacional, o Energy Plus apresenta valores superiores de necessidades energéticas nos quatro concelhos, principalmente no concelho de Faro. A metodologia do RCCTE define uma temperatura interior na habitação constante de 25 ºC, durante a estação de arrefecimento. A análise dinâmica realizada nas ferramentas de simulação computacional indica que a temperatura interior da habitação apresenta alguns períodos com a temperatura a 25 ºC durante a estação de aquecimento (figura 8.1 e 8.3), resultando assim em menores necessidades energéticas comparativamente com o RCCTE. Comparando as ferramentas computacionais, verifica-se que o TRNSYS considera temperaturas interiores inferiores no início e final da estação de arrefecimento, correspondendo assim a um menor período no qual a habitação necessita de processos de arrefecimento.

A figura 8.6 representa graficamente os parâmetros térmicos da habitação conjuntos obtidos nas três ferramentas nos quatro concelhos em análise.

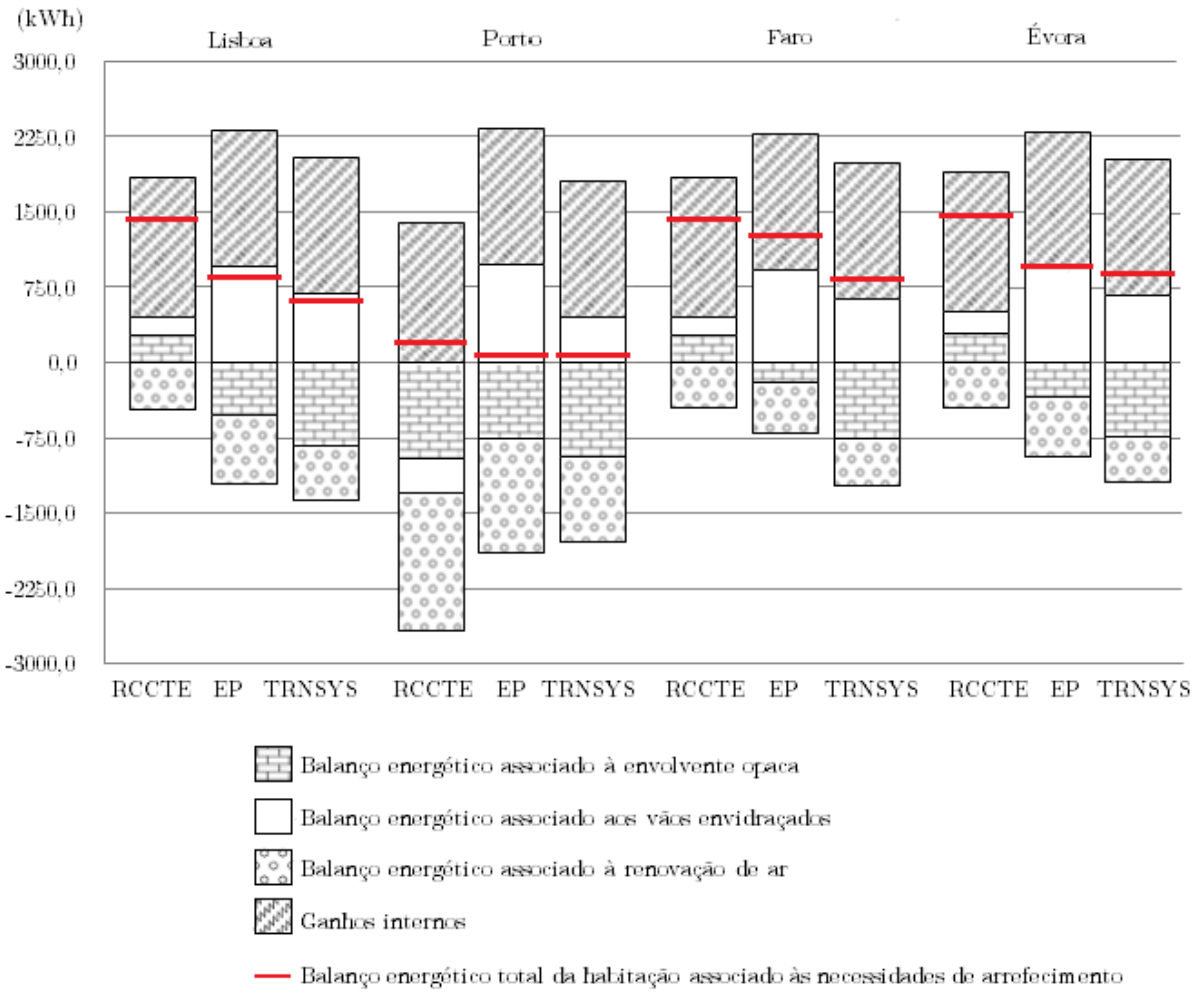


Figura 8.6 - Comparação de parâmetros térmicos nos quatro concelhos, na estação de arrefecimento

Relativamente ao balanço energético associado à envolvente opaca, nos concelhos de Lisboa, Faro e Évora, o RCCTE apresenta valores positivos, enquanto as ferramentas de simulação computacional apresentam valores negativos, correspondendo a um situação benéfica na estação de arrefecimento. O balanço energético negativo registado nas ferramentas de simulação computacional resulta da superioridade dos períodos nos quais a habitação se encontra a temperaturas superiores ao exterior (principalmente períodos nocturnos), contrastando com a metodologia do RCCTE, e principalmente à consideração de perdas térmicas pelo pavimento em contacto com o solo com balanço energético negativo.

A metodologia adoptada no RCCTE na definição do balanço energético dos vãos envidraçados resulta em valores de ganhos solares ligeiramente superiores às perdas térmicas por condução, resultando assim num balanço energético positivo, nos três principais concelhos com necessidades de arrefecimento, Lisboa, Faro e Évora. As ferramentas de simulação computacional apresentam ganhos solares associados

aos vãos envidraçados superiores e consequente balanço energético positivo superior, com uma influência significativamente superior no comportamento da habitação, como indicado na figura 8.6 .

O balanço energético associado à renovação de ar é semelhante entre as três ferramentas, nos quatro concelhos, dependente da diferença entre temperatura interior e exterior da habitação, visto que a metodologia de cálculo e duração da estação de arrefecimento é idêntica nas três ferramentas.

Como analisado na estação de aquecimento, a definição elaborada nos ganhos internos resulta em valores semelhantes nos quatro concelhos entre as ferramentas. Nas três ferramentas, os ganhos internos são o parâmetro térmico que influencia principalmente o comportamento térmico em estação de arrefecimento.

Capítulo 9 Conclusões

O trabalho desenvolvido insere-se no campo da análise do desempenho energético de edifícios residenciais com recurso às ferramentas computacionais, seguindo os pressupostos expostos na regulamentação térmica nacional. A metodologia de trabalho adoptada permitiu o cumprimento dos diversos objectivos propostos, entre os quais a análise das potencialidades e diferenças associadas ao Energy Plus e TRNSYS, simulação do comportamento térmico da habitação e respectiva análise dos principais parâmetros térmicos.

9.1. Comentário relativo à regulamentação térmica e ferramentas computacionais

A principal diferença entre a regulamentação térmica nacional (RCCTE) e as ferramentas computacionais (Energy Plus e TRNSYS) é a tipologia da abordagem na caracterização do comportamento térmicos de edifícios. O RCCTE aplica uma abordagem em regime quase estacionário, definindo valores de temperatura constantes no interior da habitação durante a estação convencional de aquecimento e arrefecimento, sendo as condições do meio exteriores definidas em função do número de graus-dias de aquecimento, temperatura média na estação de arrefecimento e radiação solar incidente, com base no zonamento climático e concelho de implantação da habitação. As ferramentas computacionais, como o Energy Plus e TRNSYS, aplicam uma abordagem em regime dinâmico, realizando uma contínua interacção entre o interior da habitação e o meio exterior, em função de ficheiros climáticos de cada região, com a definição de fluxos de calor nas envolventes do edifício, perdas e ganhos térmicos associados aos elementos construtivos e ganhos internos.

Resultando das distintas abordagens na caracterização do comportamento térmico, o RCCTE considera a temperatura no interior da habitação constante durante a estação de aquecimento e arrefecimento, enquanto as ferramentas computacionais apresentam a evolução da temperatura interior em função das condições exterior num período anual. A definição das temperaturas de referência, consideradas pelo RCCTE, nas ferramentas computacionais permite a determinação das necessidades energéticas associadas ao aquecimento (temperatura interior tende a ser inferior à temperatura de referência), e arrefecimento (temperatura interior tende a ser superior à temperatura de referência).

As principais diferenças analisadas entre as ferramentas computacionais prendem-se com o facto do Energy Plus corresponder a uma ferramenta específica de análise e optimização do comportamento térmico de edifícios, enquanto o TRNSYS corresponde a uma ferramenta computacional de análise de sistemas transitórios, apresentando um elemento que permite a análise de edifícios multizona. Com base num maior número de especificações de introduções de dados, o Energy Plus possibilita a criação de edifícios de geometria complexa, elaboração ou definição de controlos de activação dos dispositivos de protecção solar, definição e calendarização específica de ganhos internos da habitação, entre outros elementos, nos quais o TRNSYS fica aquém do esperado.

9.2. Conclusões definidas com base nos resultados obtidos

No estudo do fluxo de calor associado à envolvente opaca verifica-se que a abordagem do RCCTE considera a transferência de calor proporcional ao coeficiente de transmissão térmica da solução construtiva, área do elemento e diferença de temperatura entre o interior e exterior da habitação. Apenas na estação de arrefecimento são contabilizados os ganhos associados à radiação incidente na envolvente opaca. A transferência de calor por pavimentos em contacto com o solo é determinada recorrendo a metodologia específica, com a definição de coeficiente de transmissão térmica linear elaborada de acordo com pressupostos do RCCTE. O Energy Plus e o TRNSYS determinam a transferência de calor pela envolvente opaca com base nas temperaturas das superfícies interior e exterior do elemento construtivo e fluxos anteriormente ocorridos. Assim, os elementos climáticos como a radiação solar, humidade relativa e vento incidente nas superfícies exteriores da envolvente opaca influenciam directamente a transferência de calor durante ambas as estações em análise.

Com base nos resultados obtidos no primeiro caso de estudo elaborado no concelho de Lisboa, o RCCTE apresenta valores superiores de perdas térmicas pela envolvente opaca durante estação de aquecimento, comparativamente com as ferramentas computacionais. A metodologia aplicada no Energy Plus apresenta maior influência da radiação solar incidente no transferência de calor pela envolvente opaca, verificando-se valores inferiores de perdas térmicas por condução, principalmente na orientação Sul com maior radiação incidente durante a estação de aquecimento. A envolvente opaca e respectivas perdas térmicas correspondem a uma influência negativa no desempenho térmico da habitação na estação de aquecimento, com valores elevados de necessidades energéticas.

Na estação de arrefecimento, o pavimento em contacto com o solo corresponde ao elemento construtivo que apresenta as principais diferenças entre a regulamentação nacional e as ferramentas computacionais. O RCCTE não considera a transferência de calor pelo pavimento em contacto com o

solo durante a estação de arrefecimento, ao contrário do Energy Plus que apresentando no ficheiro climático valores de temperatura do solo inferiores à temperatura no interior da habitação, define perdas térmicas pelo pavimento e consequente influência favorável no desempenho térmico da habitação durante a estação de arrefecimento, não considerada na metodologia do RCCTE.

Na determinação da influência dos vãos envidraçados no comportamento térmico da habitação, verifica-se que as ferramentas computacionais apresentam distintos elementos na definição da solução construtiva e calendarização da activação dos dispositivos de oclusão nocturna. Ambas as ferramentas possuem uma biblioteca de soluções construtivas de vãos envidraçados, no entanto o Energy Plus apresenta modelos de calendarização da activação dos dispositivos de oclusão nocturna mais específicos na optimização dos ganhos solares, comparativamente com o TRNSYS,

Na estação de aquecimento, de acordo com o segundo caso de estudo elaborado, conclui-se que a metodologia aplicada no TRNSYS corresponde a maiores ganhos solares pelos vãos envidraçados orientados a Sul, Este e Oeste, apresentando o Energy Plus valores ligeiramente inferiores. No entanto, as ferramentas computacionais apresentam um balanço energético amplamente superior nas três orientações mencionadas, comparativamente com o RCCTE, correspondendo a uma situação benéfica no desempenho energético da habitação durante a estação de aquecimento. Na estação de arrefecimento, conclui-se que ambas as ferramentas computacionais apresentam valores superiores de ganhos solares e correspondente balanço energético nos vãos envidraçados orientados a Este, Oeste e Sul, comparativamente com o RCCTE.

Ambas as ferramentas computacionais indicam que a colocação de palas de sombreamento sobre vãos envidraçados orientados a Sul correspondem a uma situação negativa no desempenho energético da habitação, com o aumento das necessidades de aquecimento comparativamente com a diminuição analisada na estação de arrefecimento, associada a maiores ganhos solares durante a estação de aquecimento. O TRNSYS considera a colocação de palas de sombreamento sobre os vãos envidraçados orientados a Este e Oeste benéficas na redução das necessidades energéticas da habitação.

As ferramentas computacionais consideram que o balanço energético dos vãos envidraçados orientados a Sul influenciam positivamente o desempenho energético da habitação, com a diminuição significativa das necessidades de aquecimento comparativamente com o aumento analisado na estação de arrefecimento. Caso a habitação apresente vãos envidraçados de áreas elevadas orientados a Este e Oeste, o desempenho energético da habitação é influenciado negativamente, com um aumento elevado das necessidades de arrefecimento, devendo possuir sistemas automáticos para a activação de dispositivos de protecção solar, permitindo a diminuição dos ganhos solares associados. As três ferramentas analisadas indicam que a colocação de vãos envidraçados orientados a Norte correspondem a uma orientação

indesejável na óptica da optimização, influenciando negativamente o desempenho energético das habitações.

A renovação do ar interior da habitação é um processo fundamental para garantir o conforto dos habitantes e salubridade dos compartimentos afectados por cheiros incómodos, no entanto trata-se de um parâmetro térmico que influencia negativamente o comportamento térmico da habitação, principalmente durante a estação de aquecimento. A metodologia aplicada na análise da renovação de ar no interior da habitação depende fortemente do número de renovações horárias e da duração da estação em análise, verificando-se que os ficheiros climáticos com menor duração da estação de aquecimento, apresentam balanço energético superior e consequente influência inferior no comportamento térmico da habitação.

A troca de ar directa do ar interior com o meio exterior a temperatura inferiores resulta em perdas térmicas elevadas na estação de aquecimento e consequente valor elevado de necessidades de aquecimento associado. Nas ferramentas computacionais, durante a estação de arrefecimento verifica-se que o processo de renovação do ar interior conduz à diminuição da temperatura interior em períodos nocturnos e consequente redução das necessidades de arrefecimento associadas, equilibrando com o aumento da temperatura interior em períodos diurnos e ligeiro aumento das necessidades energéticas. Assim, as ferramentas computacionais indicam um influência ligeira da renovação do ar nas necessidades de arrefecimento, comparativamente com a redução significativa considerada no RCCTE.

Os ganhos internos correspondem a ganhos térmicos ocorridos na habitação associados à ocupação, actividades, activação de dispositivos de iluminação e equipamentos no interior da habitação. O Energy Plus apresenta vários parâmetros de definição e calendarização dos ganhos internos da habitação, com uma especificidade superior à presente no TRNSYS. Durante a estação de aquecimento, a calendarização definida resulta em valores semelhantes aos aplicados no RCCTE, verificando-se uma influência benéfica com a redução das necessidades nominais de aquecimento, em função da duração da estação convencional. Na estação de arrefecimento, os ganhos internos são o principal parâmetro que influencia as necessidades de arrefecimento, sendo a influencia no RCCTE superior pois nas ferramentas computacionais a temperatura interior da habitação aumenta resultando num balanço energético inferior nos restantes parâmetros térmicos da habitação.

A análise da habitação em diferentes concelhos de Portugal continental permite a comparação entre as diferentes metodologias e resultados associados ao desempenho térmico da habitação, recorrendo às ferramentas computacionais e RCCTE, em concelhos com regime de Inverno e Verão mais rigorosos. Na estação de aquecimento, a metodologia de transferência de calor em elementos construtivos aplicada no Energy Plus corresponde a menores perdas térmicas pela envolvente opaca e vãos envidraçados, comparativamente com a metodologia do TRNSYS e resultados obtidos com recurso ao RCCTE. As

ferramentas computacionais Energy Plus e TRNSYS consideram ganhos solares associados aos vãos envidraçados superiores ao RCCTE. A combinação dos dois parâmetros referidos resulta em menores necessidades de aquecimento associadas à análise recorrendo às ferramentas computacionais, comparativamente com o RCCTE, visto que a renovação do ar interior e ganhos internos dependem fortemente da duração da estação de aquecimento.

Nos quatro concelhos analisados, durante a estação de arrefecimento verifica-se a clara distinção entre a abordagem em regime quase estacionário realizada pelo RCCTE, com temperatura interior constante a 25 ºC, comparativamente com o Energy Plus e TRNSYS que apresentam a evolução da temperatura interior em função da temperatura exterior, com períodos de temperatura interior a 25 ºC correspondentes a necessidades nominais de arrefecimento na habitação. Com base na abordagem em regime dinâmico, as ferramentas computacionais apresentam valores inferiores de necessidades nominais de aquecimento nos quatro concelhos de implantação da habitação. Verificam-se diferenças entre a regulamentação nacional e as ferramentas computacionais no balanço energético da envolvente opaca e vãos envidraçados nos concelhos com regime de Verão rigoroso. De acordo com o RCCTE, os ganhos térmicos associados à envolvente opaca superam as perdas térmicas por condução, enquanto as ferramentas computacionais indicam que a envolvente opaca apresenta balanço energético negativo. Na solução definida dos vãos envidraçados da habitação, verifica-se que nas ferramentas computacionais os ganhos solares associados são elevados correspondendo a um balanço energético superior, comparativamente com os valores obtidos com recurso ao RCCTE.

9.3. Sugestões de trabalhos futuros

Com base no estudo desenvolvido e resultados obtidos, é possível identificar como desenvolvimento futuro uma investigação sobre a envolvente opaca da habitação recorrendo a ambas as ferramentas computacionais, nomeadamente a definição de soluções construtivas distintas com o objectivo de analisar a proporcionalidade do fluxo de calor considerado pela regulamentação nacional, em função do coeficiente de condutibilidade térmica e área do elemento construtivo.

Em função das diferenças analisadas nos vãos envidraçados entre os resultados da regulamentação nacional e as ferramentas computacionais, sugere-se um possível segundo desenvolvimento futuro na temática da optimização dos ganhos solares e calendarização da activação dos dispositivos de protecção solar durante a estação de arrefecimento, e respectiva influência no comportamento térmico do edifício, recorrendo às ferramentas computacionais.

Apresentando o RCCTE uma cláusula que permite a elaboração de dados na definição dos ganhos internos, desde que devidamente justificados e aceites pela entidade licenciadora, sugere-se a investigação em torno dos ganhos internos e calendarização de actividades no interior da habitação, com recurso às potencialidades do Energy Plus, para a elaboração de um conjunto valores de ganhos internos associados às diversas tipologias da habitação, com base em dados probabilísticos para uma adequada análise da influência no comportamento térmico da habitação.

Referências bibliográficas

[1] RCCTE (1990) - *Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios.* Decreto-Lei n.º 40/90. D.R. - I Série n.º 31 (1990-02-06), páginas 490-504.

[2] RCCTE (2006) - *Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios.* Decreto-Lei n.º 80/2006. D.R. - I Série-A n.º 67 (2006-04-04), páginas 2468-2513.

[3] U.S. Department of Energy (2010) - *EnergyPlus 5.0.* U.S. Department of Energy, Washington DC, USA.

[4] Solar Energy Laboratory (2007) - *TRNSYS 16: A TRaNsient SYstem Simulation program*, University of Wisconsin, Madison, USA.

[5] University of California (2011) - *HEED 4 build 17: Home Energy Efficient Design*, University of California, Los Angeles, USA.

[6] Energy Design Resources (2010) - *eQUEST 3.64: the QUick Energy Simulation Tool*, California State, USA.

[7] Sustainable Building Industry Council (2005) - *Energy-10 1.8: the QUick Energy Simulation Tool*, Washington DC, USA.

[8] PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO - Directiva Europeia 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias (2002-12-16), páginas L1/65-L1/71.

[9] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARTSATION - EN ISO 13790 - *Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for space heating.* Bruxelas, CEN, Dezembro de 2004.

[10] PANÃO, M., CAMELO, S. e GONÇALVES, H. (2011) - *Assessment of the Portuguese building thermal code: Newly revised requirements for cooling energy needs used to prevent the overheating of buildings in the summer*. Energy, volume 36, páginas 3262-3271.

[11] U.S. Department of Energy - http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/ (2011-03-02)

[12] University of Illiniois (1980) - *BLAST 3.0: Building Loads Analysis and System Thermodynamics*, Illiniois, USA.

[13] Lawrence Berkeley National Laboratory (1988) - *DOE-2.2*, University of California, USA.

[14] JUDKOFF R. and NEYMARK J. (1995) - *Building Energy Simulation Test* (BESTEST) *and Diagnostic Method*, National Renewable Energy Laboratory, International Energy Agency.

[15] JUDKOFF R. and NEYMARK J. (2002) - *Building Energy Simulation Test* (BESTEST) *and Diagnostic Method for Heating, Ventilation, and Air-Conditioning Equipment Models*, National Renewable Energy Laboratory, International Energy Agency.

[16] BRUN, A., SPITZ, C., WURTZ, E. e MORA, L. (2009) - *Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building*. Eleventh International IBPSA Conference, páginas 1185-1190.

[17] BRAHME, R., O'NEILL, Z., SISSON, W., OTTO, K. (2009) - *Using existing whole building energy tools for designing net-zero energy buildings - challenges and workarounds*. Eleventh International IBPSA Conference, páginas 9-16.

[18] U.S. Department of Energy (2010) - Manual de Utilização *EnergyPlus Engineering Reference*.

[19] U.S. Department of Energy (2010) - Manual de Utilização *EnergyPlus Input Output Reference*.

[20] Solar Energy Laboratory - http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html (2011-03-02)

[21] TRANSSOLAR Klima Engineering - http://www.transsolar.com/ (2011-03-02)

[22] Thermal Energy System Specialists - http://www.tess-inc.com/ (2011-03-02)

[23] ANDRÉ, P., THOMAS, S. (2009) - *Dynamic simulation of a complete solar assisted conditioning system in an office building using TRNSYS*. Eleventh International IBPSA Conference, páginas 25-32.

[24] DUFFY, M., HILLER, M., BRADLEY, D., KEILHOLZ, W., THORNTON, J. (2009) - *TRNSYS - Features and functionality for Building Simulation 2009 Conference*. Eleventh International IBPSA Conference, páginas 1950-1954.

[25] Meteonorm Software - http://meteonorm.com/products/meteonorm/ (2011-03-02)

[26] Solar Energy Laboratory (2007) - *TRNSYS 16: Volume 6 Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild*.

[27] SANTOS, C., MATIAS, L. (2006) - *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE 50*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[28] NORMA PORTUGUESA 1037-1 (2002) - *Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão de Locais com Aparelhos a Gás, Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural*. Instituto Português da Qualidade.