

VALIDAÇÃO DE MODELOS DE CÁLCULO POR COMPARAÇÃO COM MEDIÇÕES “IN SITU” – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

RAFAEL FARIA RAPOSO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miiec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

A imaginação é mais importante que o conhecimento

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao concluir a presente dissertação gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que me apoiaram durante a sua realização.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Nuno Manuel Monteiro Ramos, o apoio incondicional e dedicação prestados neste trabalho. A sua compreensão e disponibilidade para ajudar, incentivaram-me a ultrapassar as dificuldades e a empenhar-me em concretizar este trabalho.

Agradeço à Eng.^a Katia Gomes e à Eng.^a Patrícia Silva pelas respectivas dissertações de mestrado, que motivaram a realização desta dissertação.

A todos os docentes da FEUP com quem tive o prazer de aprender, agradeço os ensinamentos e o conhecimento que me concederam e que me permitiu realizar esta dissertação com maior rigor.

À minha prima Andrea, pela sua companhia, preocupação e apoio em todos os momentos.

À minha namorada Claudia Guirado, agradeço a leitura da presente dissertação e a motivação que me transmitiu com a sua alegria e boa disposição que me fizeram sempre sentir bem na sua companhia.

Ao meu irmão Rodrigo, agradeço o apoio e a preocupação.

Ao meu irmão Tadeu, por todo o apoio e conselhos muito úteis, de quem já experimentou as mesmas dificuldades. Agradeço-lhe ainda o seu sentido de humor capaz de me fazer rir em muitos momentos.

Quero ainda demonstrar o meu agradecimento especial à minha avó Maria do Carmo, por todo o amor e carinho que sempre me transmitiu, mesmo nos momentos mais difíceis da sua vida.

Finalmente, agradeço aos meus pais por sempre me apoiarem e me proporcionarem todas as condições para conseguir alcançar os meus objectivos. Saber que poderei sempre contar com o seu amor é o que de mais valioso tenho na minha vida.

RESUMO

O EnergyPlus é um programa de simulação higratérmica e energética de edifícios, capaz de modelar as necessidades energéticas dos processos de aquecimento e arrefecimento, ventilação e iluminação, que pode ser usado na análise ou no dimensionamento do comportamento térmico de edifícios

Para avaliar se a utilização do programa seria a correcta, realizou-se o caso 195 do BESTEST que é um método comparativo de avaliação da precisão e fiabilidade de programas de análise energética em edifícios.

Com o intuito de proceder à validação dos resultados do EnergyPlus, estudou-se um edifício situado no Porto. Nesta moradia foram instalados vários sensores, para que se regista-se em diferentes locais, ao longo de sensivelmente dois meses e meio, a temperatura no seu interior. Foram definidas três zonas térmicas, com base nas suas condições fronteira.

Os resultados da simulação no EnergyPlus foram confrontados com os valores das medições “in situ”. Observou-se que os valores encontravam-se díspares para alguns períodos. Como tal, realizou-se um estudo de sensibilidade à influência das propriedades dos materiais, com o intuito de aproximar os dois resultados.

As propriedades que foram alvo de estudo, por serem as mais influentes, foram a resistência térmica de elementos da envolvente, o factor solar dos envidraçados, a rugosidade de superfícies e o calor específico dos materiais.

Foram realizadas simulações do caso em estudo com o programa EnergyPlus, em que se fez variar, entre intervalos aceitáveis, as propriedades dos materiais isoladamente, para que se observasse a influência de cada uma.

Numa tentativa de aproximar os resultados simulados dos medidos “in situ”, realizou-se uma simulação combinada, que entrou em linha de conta com todas as propriedades em simultâneo.

PALAVRAS-CHAVE: EnergyPlus, Análise de sensibilidade, Propriedades dos materiais, Medições “In Situ”, Comportamento higratérmico.

ABSTRACT

The EnergyPlus is a program of hygrothermal and energy simulation in buildings, capable of modeling the energy needs in the processes of heating and cooling, ventilation and lighting, which can be used in the analysis or the sizing of the thermal performance of buildings.

To evaluate if the application of the program would be correct, was performed the case 195 of the BESTEST, which is a comparative method for assessing accuracy and reliability of programs for energy analysis in buildings.

Aiming to make the validation of the results of EnergyPlus, a building located in Porto was studied. In this house were installed several sensors, to which was recorded, at different locations over approximately two and a half months, the inside temperature. Three thermal zones were defined based on their boundary conditions.

The results of the simulation in EnergyPlus were compared with the “in situ” measured values. Significant differences were observed in values for some periods. As such, there was a sensitivity study of the influence of material properties with the aim of approximate the two results.

The properties that were subject of study, based on their influence, were the thermal resistance from elements of the environment, the solar factor of the glazing, the surface roughness and the specific heat of materials.

In order to observe the influence of each property, several simulations of the case in study were conducted in EnergyPlus, which was varied the material properties separately, between acceptable ranges.

In an attempt to approximate the simulated results with the measured “in situ”, was performed a combined simulation which relates all the properties simultaneously.

KEYWORDS: EnergyPlus, Sensitivity analysis, Materials properties, “In Situ” measurements, Hygrothermal behavior.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2
2. Modelação do comportamento térmico com o programa EnergyPlus	3
2.1. O PROGRAMA ENERGYPLUS	3
2.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	4
2.2.1. Balanço de calor na superfície exterior	4
2.2.2. Balanço de calor na superfície interior	6
2.2.3. Balanço de calor da zona	7
2.2.4. Processo de condução térmica	7
2.2.5. Equações do balanço de calor	10
2.2.6. Ganhos solares e factor solar ($g_{\perp}$)	12
2.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	15
2.3.1. Resistência térmica (R)	15
2.3.2. Factor solar ($g_{\perp}$)	16
2.3.3. Outras propriedades	16
2.4. BESTEST	16
2.4.1. Descrição do BESTEST	16
2.4.2. Descrição do caso 195 – Teste de condução contínua para construções leves	18
2.4.3. Resultados do caso 195 do BESTEST	20
3. Caso de estudo	23
3.1. O EDIFÍCIO	23

3.1.1. Descrição do edifício	23
3.1.2. Descrição dos elementos construtivos	27
3.1.3. Definição de zonas térmicas	33
3.2. MEDIÇÕES “IN SITU”	34
3.2.1. Piso 0	35
3.2.2. Piso 1	36
3.2.3. Quarto	37

4. Estudo de sensibilidade – Propriedades dos materiais..... 39

4.1. ENQUADRAMENTO	39
4.2. RESISTÊNCIA TÉRMICA (R)	40
4.2.1.Redução da resistência térmica da parede Sudoeste – Piso 0	40
4.2.2.Redução da resistência térmica da parede Sudoeste – Piso 1	44
4.2.3.Redução da resistência térmica da parede Nordeste – Piso 0	47
4.2.4.Redução da resistência térmica da parede Nordeste – Piso 1	49
4.2.5.Redução da resistência térmica da cobertura	52
4.2.6.Comparação das simulações	54
4.3. FACTOR SOLAR ($g_{\perp}$)	55
4.3.1. $g_{\perp} = 0,5$ nos pisos 0 e 1	56
4.3.2. $g_{\perp} = 0,5$ no piso 0 e $g_{\perp} = 0,75$ no piso 1	59
4.3.3. $g_{\perp} = 0,5$ no piso 0 e $g_{\perp} = 0,65$ no piso 1	61
4.3.4.Comparação das simulações	62
4.4. OUTRAS PROPRIEDADES	62
4.4.1.Rugosidade das superfícies	62
4.4.2.Calor específico (C_p)	65
4.5. SIMULAÇÃO COMBINADA	69

5. Conclusões..... 73

5.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS	73
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	75

BIBLIOGRAFIA	77
---------------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Balanço de calor da superfície exterior	4
Fig.2 – Balanço de calor da superfície interior	6
Fig.3 – Exemplo de Estado de Espaço de dois nós	10
Fig.4 – Exemplo geral da condição de sombreamento	12
Fig.5 – Orientação solar	12
Fig.6 – Radiação solar sobre o vidro	16
Fig.7 – Modelo caso 195	17
Fig.8 – Resultados do caso 195	20
Fig.9 – Resultados para o aquecimento	20
Fig.10 – Resultados para o arrefecimento	21
Fig.11 – Localização da moradia em estudo	23
Fig.12 – Alçado da fachada Nordeste	24
Fig.13 – Fachada Nordeste	24
Fig.14 – Alçado da fachada Sudoeste	24
Fig.15 – Fachada Sudoeste	25
Fig.16 – Orientação das fachadas do edifício	25
Fig.17 – Plantas de arquitectura do edifício	26
Fig.18 – Pormenor da abertura	26
Fig.19 – Parede exterior piso 0 – Fachada Sudoeste	27
Fig.20 – Parede exterior piso 0 – Fachada Noroeste	27
Fig.21 – Parede exterior piso 0 – Fachada Nordeste	28
Fig.22 – Paredes exteriores piso 1	29
Fig.23 – Parede de Separação	29
Fig.24 – Paredes interiores	30
Fig.25 – Pavimento dos pisos 0 e 1 – Laje aligeirada	30
Fig.26 – Cobertura	31
Fig.27 – Envidraçados (vidro duplo)	32
Fig.28 – Clarabóias (vista do interior)	32
Fig.29 – Zona térmica Piso 0	33
Fig.30 – Zonas térmicas Piso 1 e Quarto	33
Fig.31 – Sensor utilizado nas medições “in situ”	34

Fig.32 – Sensor 18	34
Fig.33 – Posicionamento dos sensores no piso 0.....	35
Fig.34 – Posicionamento dos sensores no piso 1.....	35
Fig.35 – Temperatura (°C) dos sensores para o piso 0	36
Fig.36 – Temperatura (°C) dos sensores para o piso 1	36
Fig.37 – Temperatura (°C) dos sensores para o quarto	37
Fig.38 – Temperatura (°C) no piso 0.....	40
Fig.39 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 0 (°C).....	40
Fig.40 – Temperatura (°C) no piso 0 por ordem crescente.....	41
Fig.41 – Temperatura (°C) no piso 1	41
Fig.42 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C).....	42
Fig.43 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente.....	42
Fig.44 – Temperatura (°C) no quarto	43
Fig.45 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)	43
Fig.46 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente	43
Fig.47 – Temperatura (°C) no piso 0.....	44
Fig.48 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 0 (°C).....	44
Fig.49 – Temperatura (°C) no piso 1	45
Fig.50 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C).....	45
Fig.51 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente.....	46
Fig.52 – Temperatura (°C) no quarto	46
Fig.53 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)	46
Fig.54 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente.....	47
Fig.55 – Temperatura (°C) no piso 0.....	47
Fig.56 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 0 (°C).....	47
Fig.57 – Temperatura (°C) no piso 1	48
Fig.58 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)	48
Fig.59 – Temperatura (°C) no quarto	48
Fig.60 – Temperatura (°C) no piso 0.....	49
Fig.61 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 0 (°C).....	49
Fig.62 – Temperatura (°C) no piso 1	50
Fig.63 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C).....	50
Fig.64 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente.....	50

Fig.65 – Temperatura (°C) no quarto	51
Fig.66 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)	51
Fig.67 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente	51
Fig.68 – Temperatura (°C) no quarto	52
Fig.69 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)	52
Fig.70 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente	53
Fig.71 – Comparação das diferenças entre simulações no piso 0 (°C)	54
Fig.72 – Comparação das diferenças entre simulações no piso 1 (°C)	54
Fig.73 – Comparação das diferenças entre simulações no quarto (°C).....	55
Fig.74 – Temperatura (°C) no piso 0	55
Fig.75 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 0 (°C)	56
Fig.76 – Temperatura (°C) no piso 0 por ordem crescente	56
Fig.77 – Temperatura (°C) no piso 1	56
Fig.78 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C)	57
Fig.79 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente	57
Fig.80 – Temperatura (°C) no quarto	57
Fig.81 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)	58
Fig.82 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente	58
Fig.83 – Temperatura (°C) no piso 0	59
Fig.84 – Temperatura (°C) no piso 1	59
Fig.85 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C)	59
Fig.86 – Temperatura (°C) no quarto	60
Fig.87 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)	60
Fig.88 – Temperatura (°C) no piso 0	61
Fig.89 – Temperatura (°C) no piso 1	61
Fig.90 – Temperatura (°C) no quarto	62
Fig.91 – Temperatura no piso 0 (°C)	63
Fig.92 – Diferença entre Very Rough e Very Smooth (°C) no piso 0	63
Fig.93 – Diferença entre Very Rough e Very Smooth (°C) no piso 1	64
Fig.94 – Diferença entre Very Rough e Very Smooth (°C) no quarto	64
Fig.95 – Temperatura no piso 0 (°C)	65
Fig.96 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no piso 0	65
Fig.97 – Temperatura no piso 1 (°C)	66

Fig.98 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no piso 1	66
Fig.99 – Temperatura no quarto (°C)	66
Fig.100 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no quarto	67
Fig.101 – Temperatura no piso 0 (°C).....	67
Fig.102 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no piso 0.....	67
Fig.103 – Temperatura no piso 1 (°C).....	68
Fig.104 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no piso 1	68
Fig.105 – Temperatura no quarto (°C)	69
Fig.106 – Simulação combinada (°C) para o piso 0.....	70
Fig.107 – Diferença (°C) entre o simulado e a média dos sensores	70
Fig.108 – Simulação combinada (°C) para o piso 1.....	71
Fig.109 – Diferença (°C) entre o simulado e a média dos sensores	71
Fig.110 – Simulação combinada (°C) para o quarto	72
Fig.111 – Diferença (°C) entre o simulado e o sensor 12.....	72

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Paredes	18
Quadro 2 – Cobertura.....	18
Quadro 3 – Pavimento.....	18
Quadro 4 – Valores adoptados no IDF Editor	19
Quadro 5 – Resultados do caso 195.....	19
Quadro 6 – Parede exterior piso 0 – Fachada Sudoeste.....	27
Quadro 7 – Parede exterior piso 0 – Fachada Noroeste.....	28
Quadro 8 – Parede exterior piso 0 – Fachada Nordeste.....	28
Quadro 9 – Paredes exteriores piso 1	29
Quadro 10 – Parede de Separação.....	30
Quadro 11 – Paredes interiores	30
Quadro 12 – Pavimento dos pisos 0 e 1 – Laje aligeirada.....	31
Quadro 13 – Cobertura.....	31
Quadro 14 – Envidraçados (vidro duplo).....	32
Quadro 15 – Clarabóias (vista do interior).....	33
Quadro 16 – Resumo das alterações à resistência térmica.....	54
Quadro 17 – Resumo das alterações ao factor solar	62
Quadro 18 – Simulação combinada	72

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANSI – American National Standards Institute

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado

BESTEST – Building Energy Simulation TEST

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

CO₂ – Dióxido de Carbono

C_p – Calor específico [J/kg.K]

DEC - Departamento de Engenharia Civil

DOE – The Department of Energy

e – Espessura [m]

EPS – Poliestireno Expandido Moldado

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

g – Factor Solar

HR – Humidade Relativa [%]

IEA – International Energy Agency

K - Coeficiente de transmissão térmica [W/m².K]

R – Resistência térmica [m².K/W]

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RPH – Taxa de Renovação Horária [h⁻¹]

T – Temperatura [°C]

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/m².K]

WC – Quarto de Banho

XPS – Poliestireno Expandido Extrudido

λ– Condutibilidade térmica [W/m.K]

ρ – Densidade [kg/m³]

1

Introdução

1.1. Enquadramento

Na Europa, os edifícios são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 40% da energia. No entanto, mais de metade deste consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética, o que equivaleria a uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO₂ [1].

Actualmente, as exigências a nível do conforto térmico e eficiência energética dos edifícios são tais, que a importância dada ao projecto térmico tem vindo a ser cada vez maior, na tentativa de adoptar novas soluções construtivas que permitam racionalizar melhor os consumos energéticos.

Os programas de simulação do comportamento térmico de edifícios continuam a ser algo de grande inovação e actualização. Um dos programas mais populares deste tipo de software é o EnergyPlus. Esta ferramenta de simulação higratérmica e energética de edifícios, consegue modelar nas diferentes fracções de uma habitação a temperatura, humidade, ventilação, etc. É muito usada no dimensionamento térmico de sistemas AVAC (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) e outros equipamentos.

Muitos trabalhos de investigação e de aplicação do EnergyPlus têm sido desenvolvidos por todo o mundo. Não obstante, a fiabilidade e precisão, não só deste programa como também de outros do género, são frequentemente questionadas pelos seus utilizadores. Contudo, a confiança nos resultados do programa pode ser renovada, através da realização de testes de validação de software de simulação térmica, em que o utilizador pode comparar os seus resultados com resultados padrão.

No âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia da FEUP, foram realizadas duas dissertações que consistiram na aplicação do EnergyPlus a um caso prático. Nestes trabalhos, foram realizadas medições de temperatura em diversas zonas de uma moradia unifamiliar. Este edifício foi também modelado e simulado com o EnergyPlus.

Os resultados apresentaram, para alguns períodos, discrepâncias significativas entre os valores medidos e simulados.

Conclui-se que seria interessante realizar um estudo de sensibilidade aos resultados, avaliando a influência de factores como as condições fronteiras, as propriedades dos materiais ou mesmo a própria modelação da envolvente.

É neste enquadramento, que o presente trabalho pretende dar resposta ao acima exposto, no que às propriedades dos materiais diz respeito.

1.2. Objectivos

Esta dissertação propõe-se a analisar a influência das propriedades dos materiais na modelação do comportamento higrotérmico de edifícios por comparação com medições “in situ”. Será feita uma análise de sensibilidade às propriedades dos materiais mais importantes de uma simulação base, previamente efectuada para uma habitação, com recurso ao programa EnergyPlus.

Deste modo, planificou-se a seguinte ordem de trabalhos, na esperança de atingir os seguintes objectivos parciais:

- Abordagem ao EnergyPlus e às suas potencialidades. Caracterização do programa, introdução ao manual e domínio dos tutoriais de iniciação.
- Análise da formulação matemática envolvida nos processos de simulação do caso em estudo.
- Definição das propriedades dos materiais mais importantes para o estudo.
- Concretização de um teste modelo de avaliação da utilização do programa e respectiva confrontação de resultados.
- Análise pormenorizada do caso de estudo em termos construtivos e energéticos.
- Tratamento dos dados da modelação do edifício e das medições “in situ”, ponto de partida para a análise de sensibilidade.
- Análise de sensibilidade às propriedades dos materiais em estudo.
- Descrição da influência nos resultados de cada propriedade em separado.
- Aproximação dos resultados da simulação aos resultados das medições “in situ”.

1.3. Organização do texto

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos:

- O Capítulo 1 enumera os objectivos e estabelece a organização deste trabalho.
- O Capítulo 2 apresenta uma introdução ao EnergyPlus e aborda as principais expressões matemáticas e conceitos térmicos, que serão envolvidos na análise das propriedades dos materiais. É ainda realizado um teste modelo à capacidade de precisão e fiabilidade do programa. No final, procede-se à confrontação dos resultados e à avaliação da fiabilidade e precisão do EnergyPlus.
- O Capítulo 3 descreve com pormenor o caso em estudo. É feita a caracterização completa da habitação ao nível de materiais e sistemas construtivos. São descritos também os aspectos mais importantes da simulação base, nomeadamente, definição de zonas térmicas e parâmetros relevantes adoptados. Neste capítulo apresentam-se ainda os resultados das temperaturas finais da simulação base, que são o ponto de partida do estudo da análise de sensibilidade.
- O Capítulo 4 concretiza a análise de sensibilidade às propriedades dos materiais. Para cada propriedade, é indicada a metodologia utilizada para avaliar a influência da mesma nos resultados, assim como são expostas e discutidas todas as alterações provocadas nos resultados da simulação base. Este capítulo contempla ainda uma tentativa de aproximação dos resultados da simulação base às medições “in situ”, por alteração combinada das propriedades dos materiais estudadas.
- O Capítulo 5 sintetiza as principais conclusões deste trabalho.

2

Modelação do comportamento térmico com o programa EnergyPlus

2.1. O PROGRAMA ENERGYPLUS

Impulsionados pela crise energética da década de 70, os programas BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2 surgiram como ferramentas de simulação do comportamento energético de edifícios. À medida que estes programas se tornaram antiquados, foi desenvolvido com base nestes programas o EnergyPlus; um software mais completo e de fácil manutenção, suporte e melhoramento [2].

O EnergyPlus é um programa de simulação higrotérmica e energética de edifícios, criado pelo DOE (U.S. Department of Energy). É capaz de modelar as necessidades energéticas dos processos de aquecimento e arrefecimento, ventilação e iluminação, podendo ser usado como ferramenta de dimensionamento de sistemas AVAC, painéis fotovoltaicos, etc [3].

No funcionamento do programa, existem três campos (*Inputs*, *Weather file* e *Outputs*), que são fundamentais para que a simulação possa ser efectuada.

É comum começar-se por fornecer os *Inputs* (dados de entrada), que permitem definir com exactidão a constituição do modelo e as características dos equipamentos.

O *Weather file* (ficheiro climático) contém informação ao nível de temperatura, humidade, vento e radiação solar, que permite caracterizar o clima na região onde se encontra o edifício [4]. O utilizador dispõe de uma biblioteca online com ficheiros climáticos para as principais regiões de todo o mundo e ainda pode criar o seu próprio ficheiro climático com recurso a medições climatéricas no local [5].

Após efectuar a simulação, o programa produz diversos *Outputs* (ficheiros de saída) em diferentes formatos. É possível consultar o desenho do modelo, uma série de ficheiros de registo e relatórios com os valores de temperatura, humidade relativa, energia necessária para os equipamentos, etc.

O DOE permite que o EnergyPlus seja descarregado gratuitamente a partir do seu sítio na internet [6]. É também por esta razão, que este software é muito popular e bastante utilizado no estudo e dimensionamento do comportamento térmico de edifícios em todo o mundo.

A primeira versão original foi lançada em 2001 e desde então o programa tem sido melhorado e actualizado, de modo que o lançamento da nova versão 6.0 está previsto para Outubro de 2010 [7]. Para a produção desta dissertação foi utilizada a versão 4.0.0.024, lançada a 12 de Outubro de 2009.

2.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O programa EnergyPlus é um conjunto de vários módulos que trabalham juntos para calcular a energia necessária para aquecimento e arrefecimento de um edifício, usando uma variedade de sistemas e fontes de energia [8]. O núcleo da simulação é um modelo de edifício, que se baseia em princípios fundamentais do equilíbrio térmico. Segue-se uma breve abordagem sobre o fundamento matemático envolvido nas principais acções que se desenvolveram no programa.

O modelo do balanço de calor tem por base as premissas que assumem que o ar na zona encontra-se bem misturado e a sua temperatura é uniforme, as superfícies da zona têm temperaturas e irradiações uniformes e a condução do calor é unidimensional.

Com base nesses pressupostos, apresenta-se a formulação mais clássica do balanço de calor, que envolve quatro elementos distintos:

- Balanço de calor na superfície exterior,
- Balanço de calor na superfície interior,
- Balanço de calor da zona,
- Processo de condução térmica

Cada um desses elementos é brevemente discutido a seguir. Note-se que cada elemento tem vários processos de transferência de calor para os quais podem ser aplicados modelos particulares, que não serão aqui enumerados.

2.2.1. BALANÇO DE CALOR NA SUPERFÍCIE EXTERIOR

A abordagem ao balanço de calor no estudo térmico de um edifício, assenta nos princípios fundamentais da física, através da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica – Conservação da Energia [8].

No balanço de calor da superfície exterior, as quatro "forças" térmicas que actuam sobre o volume de controle no exterior da superfície de cada parede devem ser equilibradas, para que se verifique a conservação da energia, como se mostra na fig. 1.

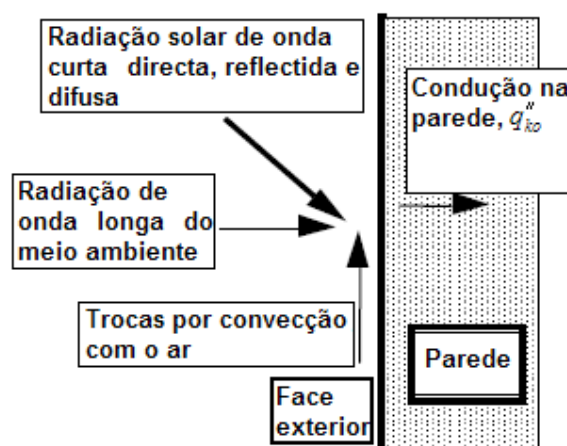


Fig. 1 – Balanço de calor da superfície exterior

Isso pressupõe que o volume de controle em si não tem massa, logo não tem qualquer capacidade de armazenar energia [9]. Pode-se formular em linguagem matemática a seguinte equação deste diagrama:

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

Onde:

$q''_{\alpha sol}$ = fluxo de radiação solar de curto comprimento de onda de absorção directa e difusa [W/m²]

q''_{OLR} = fluxo de trocas com o ar de radiação de longo comprimento de onda [W/m²]

q''_{conv} = fluxo de convecção entre a superfície e o ar [W/m²]

q''_{ko} = fluxo de calor por condução na parede [W/m²]

Procedimentos simplificados geralmente combinam os três primeiros termos, utilizando o conceito de temperatura ar-sol. Cada uma destas componentes do balanço de calor é introduzida de seguida.

A radiação exterior de curto comprimento de onda $q''_{\alpha sol}$, inclui a radiação solar incidente directa e difusa, absorvida pela superfície. É influenciada pela localização, pelo ângulo e inclinação da área exposta da superfície, assim como pelas propriedades dos materiais e condições meteorológicas, etc.

A radiação exterior de longo comprimento de onda q''_{OLR} , é uma formulação padrão de trocas de radiação entre a superfície, o ar e o solo. O fluxo de radiação de calor é calculado a partir da absortividade e temperatura da superfície e das temperaturas do ar e do solo. As trocas de calor entre as superfícies de radiação de longo comprimento de onda são dependentes da temperatura das mesmas, das relações espaciais entre as superfícies e o ambiente e das propriedades dos materiais.

A transferência de calor devido à convecção exterior pode ser modelada utilizando a formulação clássica:

$$Q_c = h_{c,ext} A (T_{sup} - T_{ar}) \quad (2)$$

Em que:

Q_c = taxa de transferência de calor por convecção exterior

$h_{c,ext}$ = coeficiente de convecção exterior

A = área da superfície [m²]

T_{sup} = temperatura da superfície [°C]

T_{ar} = temperatura do ar [°C]

Muita investigação foi desenvolvida na formulação de modelos para estimar o coeficiente de convecção exterior ($h_{c,ext}$). Desde 1930, que têm sido publicados muitos métodos diferentes para o cálculo deste coeficiente e todos com muita disparidade entre eles.

O EnergyPlus oferece uma escolha de seis algoritmos para o cálculo de coeficientes de transferência de calor por convecção: *Simple*, *Detailed*, *BLAST*, *TARP*, *MoWiTT* e *DOE-2*, que se encontram no campo *SurfaceConvectionAlgorithm:Outside*.

O modelo de convecção *Simple*, é um coeficiente de transferência de calor combinado, que inclui a radiação para o ambiente, solo e ar. Aplica-se a coeficientes de transferência de calor dependendo da rugosidade e velocidade do vento. Todos os outros modelos para o cálculo de coeficientes de transferência de calor por convecção aplicáveis, dependem da rugosidade do material, do vento, do terreno e da localização do edifício. Estes são apenas coeficientes de transferência de calor por convecção. Os coeficientes de transferência de calor por radiação são calculados automaticamente pelo programa.

O termo de condução q''_{ko} , pode, em teoria, ser calculado através de uma ampla variedade de formulações de condução de calor. Normalmente no EnergyPlus a função transferência de condução (FTC) é o método utilizado.

2.2.2. BALANÇO DE CALOR NA SUPERFÍCIE INTERIOR

O essencial do método do balanço de calor é o balanço de calor interior, que envolve o interior das faces das superfícies da zona.

Este balanço é geralmente modelado com quatro componentes de transferência de calor: condução através do elemento de construção, convecção do ar, absorção e reflexão de radiação e trocas internas de radiação. A radiação incidente de curto comprimento de onda, atinge a superfície a partir da radiação solar que entra na zona através de janelas e aberturas, e a partir de fontes emissoras internas, tais como luzes. As trocas internas de radiação de longo comprimento de onda, incluem a absorção e emissão da radiação de fontes de baixa temperatura, que são as outras superfícies da zona, equipamentos e pessoas.

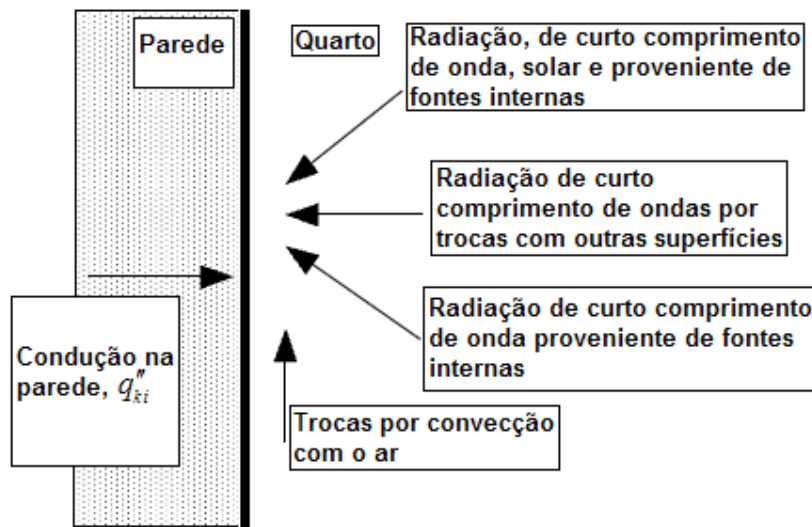


Fig. 2 – Balanço de calor da superfície interior

O balanço de calor na superfície interior da parede pode ser escrito pela seguinte equação:

$$q''_{OL} + q''_{OC} + q''_{OLe} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (3)$$

q''_{OL} = fluxo radiante de longo comprimento de onda entre as superfícies da zona [W/m²]

q''_{OC} = fluxo de radiação de curto comprimento de onda [W/m²]

q''_{OLe} = fluxo de radiação de longo comprimento de onda devido aos equipamentos na zona [W/m²]

q''_{ki} = fluxo de condução através da parede [W/m²]

q''_{sol} = fluxo de radiação solar absorvido na superfície [W/m²]

q''_{conv} = fluxo de calor por convecção [W/m²]

Tal como acontece com o balanço de calor da superfície exterior, cada balanço interior de calor é uma equação única (ou série de equações), com as temperaturas interiores e exteriores da superfície como incógnitas. Note-se que a temperatura do ar na zona é outro termo do balanço interior de calor que também pode ser desconhecido.

2.2.3. BALANÇO DE CALOR DA ZONA

No balanço de calor da zona formulado para efeitos de cálculo da carga de arrefecimento, é geralmente assumido que a qualidade do ar na zona pode ser ignorada e que o mesmo encontra-se em estado quase constante em cada intervalo de tempo da simulação [10]. Assim, o balanço de calor do ar adquire uma forma simplificada, semelhante à do balanço de calor numa superfície.

$$q_{conv} + q_{CI} + q_{IV} + q_{sys} = 0 \quad (4)$$

Onde:

q_{conv} = transferência de calor por convecção através das superfícies interiores [W]

q_{CI} = convecção a partir de fontes internas; pessoas, luzes, equipamentos, etc [W]

q_{IV} = carga devido à infiltração e ventilação [W]

q_{sys} = transferência de calor dos sistemas AVAC [W]

2.2.4. PROCESSO DE CONDUÇÃO TÉRMICA

Para efeitos de cálculo de necessidades de aquecimento e arrefecimento, é normalmente adequado assumir o processo de condução térmica nas paredes como um processo transiente unidimensional através de superfícies multi-camadas. Cada camada de material é considerada homogénea e com constantes propriedades térmicas. A equação geral para o calor de condução unidimensional transiente, é expressa como:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (5)$$

Sendo que,

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (6)$$

α = condução térmica do material [m^2/s]

T = temperatura da parede como função da posição (x), e do tempo (t) [K]

k = condutibilidade térmica do material [$\text{W}/\text{m.K}$]

ρ = densidade do material [kg/m^3]

C_p = calor específico do material [$\text{J}/\text{kg.K}$]

Esta equação é geralmente associada à lei de condução de Fourier, que relaciona o fluxo de calor em qualquer posição e tempo com a temperatura da seguinte forma:

$$q''(x, t) = -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad (7)$$

Existem soluções analíticas para as equações (5) e (7) quando se trata de uma camada única e homogénea. Para superfícies multi-camadas, a solução torna-se extremamente complexa, podendo ser resolvida através de processos como o método de elementos finitos, o método numérico de diferenças finitas, métodos de transformação, ou ainda através de métodos de séries de tempo.

Embora cada um desses métodos tenha vantagens sobre os outros em várias aplicações, na construção de simulações térmicas tem-se usado ambos os métodos. O método de séries temporais utiliza funções de transferência de condução e tem a vantagem de ser mais rápido no processo computacional.

A formulação do processo de condução nas paredes passa pelo uso de Funções de Transferência de Condução (FTC), que relacionam os fluxos de calor por condução com as temperaturas em ambas as faces e com os fluxos de calor anteriores.

A solução básica da série de tempo é o factor de resposta da equação, o qual relaciona o fluxo de uma superfície de um elemento com uma série infinita de temperaturas:

$$q''_{k0}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (8)$$

Embora na maioria dos casos, os termos da série decresçam muito rapidamente, o número infinito de termos necessários para uma solução exacta do factor de resposta torna o uso da equação indesejável. Felizmente, a semelhança dos termos de ordem superior pode ser usada para substituí-los pelos termos do fluxo. A nova solução contém elementos da FTC. A forma mais simples da solução da FTC para o fluxo de calor na superfície interior é apresentada pela equação (9):

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (9)$$

Sendo que a solução para fluxo na superfície exterior é:

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (10)$$

Seja:

i = interior do elemento

o = exterior do elemento

t = tempo [s]

X, Y = factores de resposta

δ = intervalo de tempo [s]

X_j = coeficiente do fluxo na superfície exterior de calor da FTC, $j = 0, 1, \dots, n_z$ [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Y_j = coeficiente do fluxo de calor atravessado da FTC, $j = 0, 1, \dots, n_z$ [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Z_j = coeficiente do fluxo na superfície interior da FTC, $j = 0, 1, \dots, n_z$ [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Φ_φ = coeficiente do fluxo da FTC, $j = 1, 2, \dots, n_q$

T_i = temperatura da superfície interior [$^\circ\text{C}$]

T_o = temperatura da superfície exterior [$^\circ\text{C}$]

q''_{ko} = transmissão do fluxo de calor na face exterior [W/m^2]

q'' = transmissão do fluxo de calor na face interior [W/m^2]

Os primeiros termos da série (com índice 0 nas equações (9) e (10)), foram separados do resto a fim de facilitar a resolução da expressão. Estas equações indicam que o fluxo de calor em ambos os lados da superfície de um elemento genérico de construção é linearmente relacionável com a temperatura em ambas as superfícies e com alguns dos valores do fluxo na superfície interior.

A transferência de calor por condução de um elemento pode ser calculada com uma única equação relativamente simples, linear com coeficientes constantes. Os coeficientes (da FTC) na equação são constantes e só precisam de ser determinados uma vez para cada tipo de construção. Os únicos dados necessários para armazenamento são as FTC e um número limitado de temperatura e condições de fluxo. A formulação é válida para qualquer tipo de superfície e não requer o cálculo ou o armazenamento da temperatura interior do elemento.

O método simplificado utilizado no EnergyPlus para o cálculo da FTC é conhecido como o Estado de Espaço. Outro método mais comum é o método de Laplace, que usa transformações de Laplace para chegar à solução.

Para uma camada simples de laje interior com dois nós e convecção em ambos os lados, como mostra a fig 3, a resultante das equações de diferenças finitas é dado por:

$$C \frac{dT_1}{dt} = hA(T_o - T_1) + \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (11)$$

$$C \frac{dT_2}{dt} = hA(T_i - T_2) + \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (12)$$

$$q''_i = h(T_i - T_2) \quad (13)$$

$$q''_o = h(T_1 - T_o) \quad (14)$$

Sendo que:

$$R = \frac{l}{kA} \quad (15)$$

$$C = \frac{\rho C_p l A}{2} \quad (16)$$

ρ = densidade do material [kg/m³]

A = área da superfície exposta à temperatura ambiente. [m²]

R = resistência térmica da superfície [m²K/W]

h = coeficiente de convecção

l = comprimento da superfície exposta à temperatura ambiente [m]

k = condutibilidade térmica da superfície [W/m.K]

C_p = calor específico do material [J/kg.K]

C = calor específico do material seco [J/kg.k]

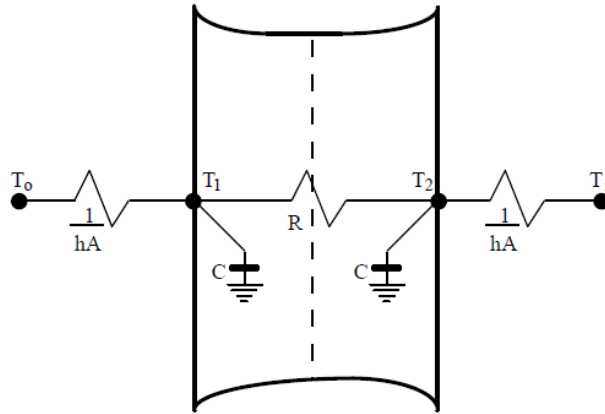


Fig. 3 – Exemplo de Estado de Espaço de dois nós

2.2.5. EQUAÇÕES DO BALANÇO DE CALOR

Os processos do balanço de calor para a zona térmica são formulados para 24 horas e condições periódicas estáveis [11]. A equação (1) é combinada com a equação (10) para determinar a temperatura na superfície exterior (T_{so}) para produzir equações aplicáveis a cada passo de tempo para cada superfície:

$$T_{so,j} = \frac{-\sum_{k=1}^{nz} T_{si,j-k} Y_{i,k} + \sum_{k=1}^{nz} T_{so,i,j-k} X_{i,k} - \sum_{k=1}^{nq} \Phi_{i,k} q''_{ko,i,j-k} + q''_{asol,i,j} + q''_{OLR,i,j} - T_{si,j} Y_{i,o} + T_{o,j} h_{co,i,j}}{-X_{i,o} + h_{co,i,j}} \quad (17)$$

Atribuindo i como o índice de superfície e j como o índice de horas, então as principais variáveis são:

$T_{so_{i,j}}$ = temperatura na face exterior (i=1, 2, ... ; j=1, 2, ... 24), °C

$T_{si_{i,j}}$ = temperatura na face interior (i=1, 2, ... ; j=1, 2, ... 24), °C

q_{sys_j} = carga de arrefecimento, (j=1,2, ... 24), [W]

h_{co} = coeficiente de convecção exterior [W/m²K]

Este coeficiente (h_{co}) é obtido pela expressão:

$$q_{conv}'' = h_{co}(T_o - T_{so}) \quad (18)$$

A temperatura na face interior (T_{si}), é determinada à custa da equação (12), que deriva da confluência das equações (3) e (9):

$$T_{si_{i,j}} = \frac{T_{so_{i,j}} Y_{i,0} + \sum_{k=1}^{nz} T_{so_{i,j-k}} Y_{i,k} - \sum_{k=1}^{nz} T_{si_{i,j-k}} Z_{i,k} + \sum_{k=1}^{nq} \Phi_{i,k} q_{ki_{i,j-k}}'' + q_{OLe}'' + q_{OL}'' + q_{OC}'' + q_{sol}'' + T_a h_{ci_{i,j}}}{Z_{i,o} + h_{ci_{i,j}}} \quad (19)$$

Analogamente à expressão (17):

T_a = temperatura do ar na zona [°C]

h_{ci} = coeficiente de convecção interior [W/m²K]

Nas equações (17) e (19), a temperatura da restante superfície é função da temperatura da superfície que se pretende calcular. As duas equações podem ser resolvidas simultaneamente para eliminar essa variável. Dependendo de como se actualizar os outros termos nas equações, isso poderá ter um efeito benéfico sobre a estabilidade da solução.

A última equação que falta apresentar neste capítulo, vem do balanço de calor do ar na zona e determina a carga do sistema de arrefecimento q_{sys} a cada hora:

$$q_{sys_j} = \sum_{i=1}^{12} A_i h_{c,i} (T_{si_{i,j}} - T_{a_j}) + q_{CI} + q_{IV} \quad (20)$$

O termo de transferência de calor convectivo na equação (20), é expandido para mostrar a relação entre as temperaturas da superfície e a carga de refrigeração. A equação (20) é formulada desta forma, mas também pode ser formulada de outras formas, como por exemplo, ser formulada para dar a temperatura do ar da zona, com ou sem funcionamento de sistema AVAC.

2.2.6. GANHOS SOLARES E FACTOR SOLAR ($g_{\perp}$)

Ao avaliar os ganhos de calor em edifícios devido à radiação solar, é necessário saber que parte do edifício está protegida e que parte está exposta à luz solar directa.

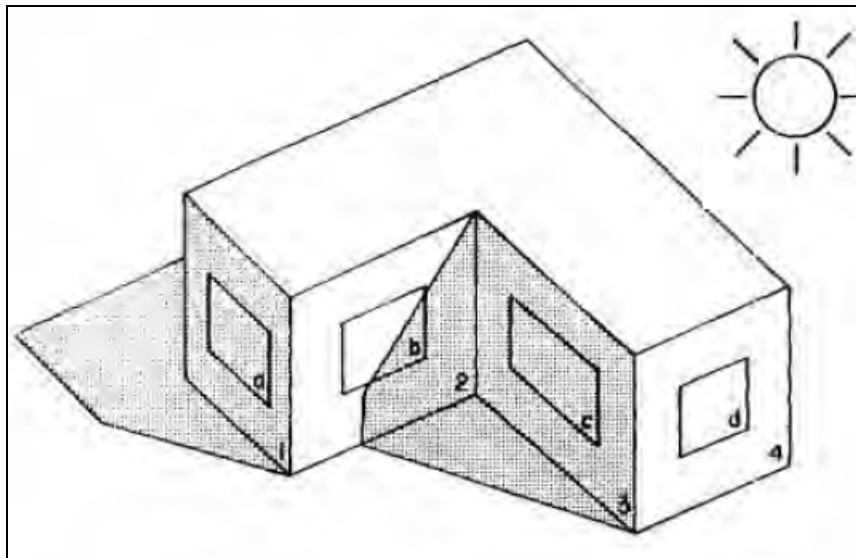


Fig. 4 – Exemplo geral da condição de sombreamento

A título de exemplo, a fig. 4 mostra uma estrutura plana, em forma de L e com uma janela em cada um dos lados visíveis. Para esta orientação solar, as paredes 1 e 3 estão completamente sombreadas, enquanto que a parede 4 está totalmente iluminada. A parede 2 encontra-se parcialmente sombreada. À medida que a posição do sol muda ao longo do dia, também se altera a área iluminada pelo sol em cada parede.

A posição solar é descrita através de três cosenos de direcção, que são necessários para determinar o ângulo de incidência dos raios solares na superfície do edifício. Atendendo à fig. 5, o ângulo de altitude solar (β) é o ângulo do sol acima da horizontal e o azimuth solar (ϕ) é o ângulo medido a partir do norte no sentido horário. Ambos são expressos em graus.

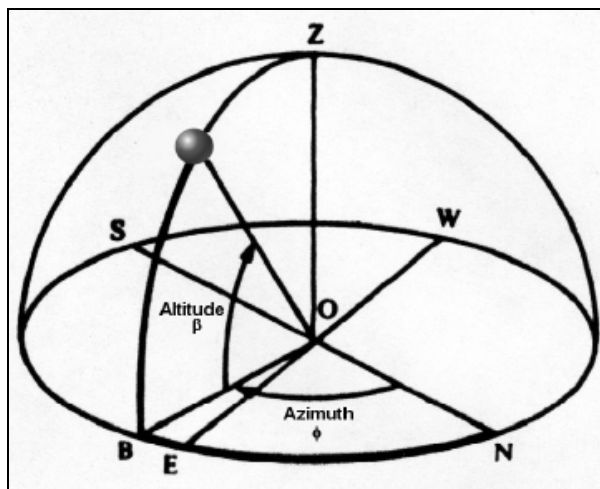


Fig. 5 – Orientação solar

O ganho solar total em toda a superfície exterior é uma combinação de absorção directa e radiação solar difusa dada por:

$$Q_s = \alpha \cdot \left(I \cdot \cos \theta \frac{A_i}{A_s} + I_d \cdot F_{sc} + I_{ds} \cdot F_{ss} \right) \quad (21)$$

Para a superfície de um edifício localizado numa planície:

$$F_{sc} = \frac{1 + \cos \phi}{2} \quad (22)$$

$$F_{ss} = \frac{1 - \cos \phi}{2} \quad (23)$$

α = ângulo de incidência do sol sobre a superfície [rad]

A_s = área da superfície [m²]

A_i = área de sol incidente [m²]

I = intensidade da radiação directa [W/m²]

I_d = intensidade da radiação difusa [W/m²]

I_{ds} = intensidade da radiação difusa reflectida no solo [W/m²]

ϕ = ângulo de inclinação da superfície [rad]

θ = ângulo de incidência [rad]

F_{sc} = factor do ângulo entre a superfície e a vertical

F_{ss} = factor do ângulo entre a superfície e o solo

O EnergyPlus possui um modelo simplificado de introdução de dados das propriedades de janelas e envidraçados que recorre ao coeficiente de transmissão térmica (U) do envidraçado e ao factor solar ($g_{\perp}$), muito útil sobretudo quando não são conhecidas todas as propriedades do envidraçado. Trata-se contudo de um método aproximado, pelo que o método mais completo de introdução de dados camada a camada apresenta resultados mais precisos e deve ser usado sempre que possível

Neste método simplificado, a transmissão solar de incidência normal (T_{sol}), é calculada através de uma correlação que é função de U e do factor solar ($g_{\perp}$).

$$T_{sol} = 0,939998 \cdot (g_{\perp})^2 + 0,20332 \cdot (g_{\perp}) , \text{ para } U > 4,5 \text{ e } g_{\perp} < 0,73 \quad (24)$$

$$T_{sol} = 1,30415 \cdot g_{\perp} - 0,30515 , \text{ para } U > 4,5 \text{ e } g_{\perp} \geq 0,73 \quad (25)$$

$$T_{sol} = 0,41040 \cdot g_{\perp} , \text{ para } U < 3,4 \text{ e } g_{\perp} \leq 0,15 \quad (26)$$

Para valores de U entre os 3,4 e 4,5 o valor de T_{sol} é interpolado utilizando os resultados das equações anteriores.

A reflexão solar (R_s) é calculada pela determinação prévia da fracção que atravessa para o interior e que requer o conhecimento dos valores dos coeficientes de resistência térmica das superfícies interior e exterior, respectivamente $R_{i,s}$ e $R_{o,s}$.

$$R_{i,s} = \frac{1}{\left(29,436546(g_{\perp} - T_{sol})^3 - 21,943415(g_{\perp} - T_{sol})^2 + 9,945872(g_{\perp} - T_{sol}) + 7,426151\right)} \quad (27)$$

$$R_{i,s} = \frac{1}{\left(199,8208128(g_{\perp} - T_{sol})^3 - 90,639733(g_{\perp} - T_{sol})^2 + 19,737055(g_{\perp} - T_{sol}) + 6,766575\right)} \quad (28)$$

A equação (27) é válida para valores de $U > 4,5$ e a equação (28) para $U < 3,4$.

$$R_{o,s} = \frac{1}{\left(2,225824(g_{\perp} - T_{sol}) + 20,57708\right)}, \text{ para } U > 4,5 \quad (29)$$

$$R_{o,s} = \frac{1}{\left(5,763355(g_{\perp} - T_{sol}) + 20,541528\right)}, \text{ para } U < 3,4 \quad (30)$$

A fracção atravessada é dado por:

$$Frac = \frac{(R_{o,s} + 0,5 \cdot R_{l,w})}{(R_{o,s} + R_{l,w} + R_{i,s})} \quad (31)$$

Sendo que:

$$\frac{1}{U} = R_{i,w} + R_{o,w} + R_{l,w} \quad (32)$$

Onde:

R_i = coeficiente de resistência térmica da superfície interior do vidro [$m^2.K/W$]

R_o = coeficiente de resistência térmica da superfície exterior do vidro [$m^2.K/W$]

R_l = coeficiente de resistência térmica do espaço vazio [$m^2.K/W$]

s = condições de verão

w = condições de inverno

Assim, a reflexão térmica das duas faces do vidro é igual e função do factor solar:

$$R_{s,f} = R_{s,b} = 1 - T_{sol} - \frac{(g_{\perp} - T_{sol})}{Frac} \quad (33)$$

2.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Neste subcapítulo encontra-se a síntese das propriedades dos materiais que foram consideradas como tendo maior relevância para o estudo.

Considerou-se que a resistência térmica dos elementos e o factor solar dos envidraçados seriam as propriedades mais importantes. Outras propriedades, ainda que com menor relevância, como o calor específico e a rugosidade dos materiais foram também analisadas.

2.3.1. RESISTÊNCIA TÉRMICA (R)

A resistência térmica é a capacidade de um material resistir a uma transferência de calor transmitido através da sua espessura, numa direcção normal à superfície, devido apenas a uma variação de temperatura [12].

Quanto maior a resistência térmica, mais o material é capaz de bloquear a transferência de calor através de sua superfície.

A nível de paredes, é de esperar que as fachadas mais extensas, apresentem maior influência nos resultados. Também é expectável que a cobertura seja o piso em que as alterações de resistência térmica surtem maior efeito, devido à suas condições fronteira, nomeadamente, a exposição solar.

A resistência térmica global (R) de um elemento construtivo, é a razão entre a diferença de temperatura (ΔT) e o fluxo de calor que o atravessa, por unidade de área ($\dot{Q}_A$).

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_A} \quad (34)$$

É inversamente proporcional ao coeficiente global de transferência de calor (U), que mede a taxa de transferência de calor sobre uma determinada área de um elemento de construção. O valor de R, tem influência directa no fluxo de calor transmitido através das paredes no processo de condução. É directamente proporcional à espessura do elemento construtivo (L) e inversamente proporcional à condutibilidade térmica (k), como ilustrado na equação (35).

$$R = \frac{1}{U} = \frac{L}{k} = \frac{l}{kA} \quad (35)$$

Assim torna-se mais perceptível que, qualquer alteração à resistência térmica de um material altera, logicamente, a resistência térmica global do elemento construtivo que é função da condutibilidade térmica.

Como se mostrou na equação (7), a lei de condução de Fourier sobre o fluxo de calor que atravessa uma camada homogénea é função da condutibilidade térmica (k).

A resistência térmica (R), é usada pelo EnergyPlus no método simplificado de cálculo das FTC's, que relacionam os fluxos de calor por condução com as temperaturas nas faces do material. Este método encontra-se ilustrado na fig. 3 e formulado pelas equações (11) a (16).

2.3.2. FACTOR SOLAR ($g_{\perp}$)

O factor solar de um vão envidraçado pode ser definido como o quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respectivo dispositivo de protecção e a energia da radiação solar que nele incide [13]. Quanto menor o factor solar, maior será a protecção solar do vidro.

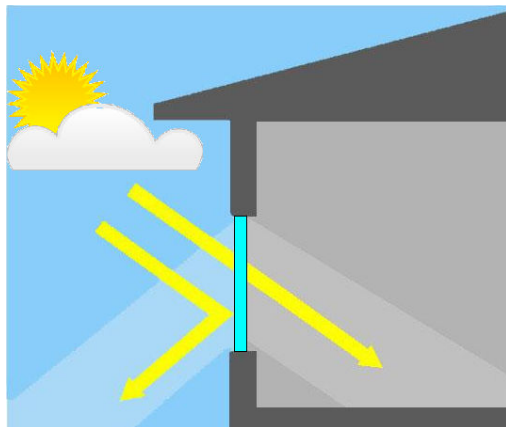


Fig. 6 – Radiação solar sobre um vidro

Esta propriedade terá maior ou menor influência, consoante a dimensão da área e orientação dos envidraçados. As fachadas orientadas a sul são as que recebem maior radiação solar.

O factor solar do envidraçado tem influência na transmissão e reflexão solar do vidro e consequentemente, influencia as resistências térmicas superficiais interior e exterior do vidro.

2.3.3. OUTRAS PROPRIEDADES

O calor específico (C_p), é uma grandeza física mensurável que se caracteriza pela quantidade de calor necessária para alterar a temperatura de um corpo. Apesar do calor específico dos materiais ser um valor conhecido, este não é dado por constantes fixas e pode variar um pouco dependendo da temperatura [14]. Esta propriedade está presente nas equações (6) e (16) e afecta o processo de condução térmica.

A rugosidade é uma medida da textura da superfície do material. A rugosidade do material afecta o cálculo de coeficientes de transferência de calor por convecção. Considerou-se também interessante observar a influência desta propriedade nos resultados.

2.4. BESTEST

2.4.1. DESCRIÇÃO DO BESTEST

A IEA (*International Energy Agency*) define que a validação de um software de simulação térmica é analisada através de três métodos [15]:

- Validação Analítica: Comparar os resultados com uma solução analítica conhecida;
- Validação Empírica: Comparar os resultados com uma estrutura real ou ensaio em laboratório;
- Teste comparativo: Comparar os resultados com os resultados de outros programas.

O BESTEST (*Building Energy Simulation TEST*) é um método comparativo de testes de avaliação de precisão e fiabilidade. É o método de testes de avaliação de programas de análise energética em edifícios, usado pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) na norma norte americana ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. Esta forma é utilizada como método padrão de testes para a avaliação de programas de análise de simulação energética, nos Estados Unidos.

A norma possui um conjunto variado de testes que derivam todos de um modelo base (caso 600). Um grande número de factores é tido em conta nos diferentes casos, tais como:

- Tipo de parede da edificação (leve ou pesada);
- Orientação das aberturas;
- Aquecimento por radiação solar directa;
- Elementos de sombreamento;
- Orientação das aberturas;
- Efeito do solo;
- Ventilação nocturna.

Embora a norma sirva em primeira instância para validação de software, a simplicidade da maioria dos exemplos é uma bom exercício para novos utilizadores de programas de simulação.

2.4.2. DESCRIÇÃO DO CASO 195 – TESTE DE CONDUÇÃO CONTÍNUA PARA CONSTRUÇÕES LEVES

A equipa do EnergyPlus realizou alguns dos casos presentes na norma norte americana ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 e comparou os resultados com outros programas de análise de energia que simularam os mesmos casos. Todas as informações aqui apresentadas acerca do caso 195 do BESTET, reportam a um documento preparado pela equipa de peritos do EnergyPlus [16], com base na norma americana.

O caso 195 é um teste de condução contínua para construções leves e está agrupado no grupo de testes de análise mais profunda (In-depht tests). Este caso foi escolhido para demonstração por ser o que tem a sua análise mais focada sobre as propriedades dos materiais que constituem o modelo.

O desenho do modelo encontra-se na fig.7:

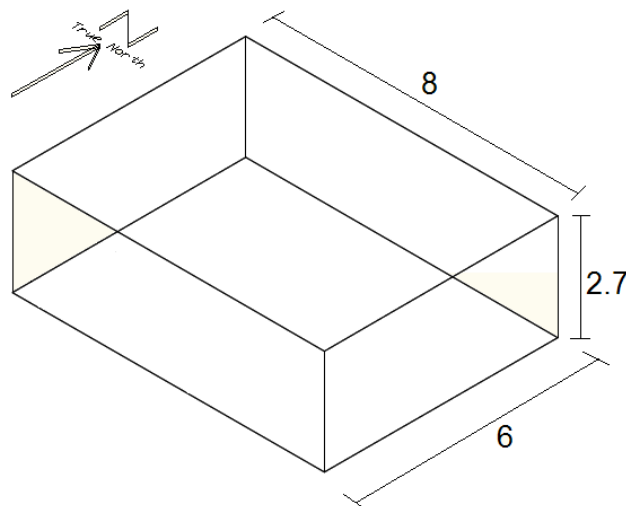


Fig. 7 – Modelo caso 195

O modelo é constituído por três elementos diferentes; paredes, cobertura e pavimento. As características dos materiais apresentam-se nos quadros seguintes:

Quadro 1 – Paredes

Elemento	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Reboco	0,012	0,160	0,075	13,333	950	840
Fibra de Vidro	0,066	0,040	1,650	0,606	12	840
Revestimento em Madeira	0,009	0,140	0,064	15,556	530	900

Quadro 2 – Cobertura

Elemento	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Reboco	0,010	0,160	0,063	16,000	950	840
Fibra de Vidro	0,1118	0,040	2,794	0,358	12	840
Revestimento	0,019	0,140	0,136	7,368	530	900

Quadro 3 – Pavimento

Elemento	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Soalho	0,025	0,140	0,179	5,600	650	1200
Isolamento	1,003	0,040	25,075	0,040	---	---

As especificidades do caso 195 são:

- Localização: cidade de Denver no estado do Colorado, USA
- Taxa de renovação de ar por infiltração: 0 rph;
- Ganhos internos nulos;
- Termóstato permanentemente a 20°C;
- Absortância (α) = 0.1 (baixo);
- O modelo não tem janelas.

A equipa do EnergyPlus adoptou alguns valores específicos para certos campos do *IDF Editor* (editor do programa).

Quadro 4 – Valores adoptados no IDF Editor

Campo	Valor
<i>Weather File</i>	<i>Denver (“DRYCOLD.TMY”)</i>
<i>Thermal Absorptance</i>	0,1
<i>Solar Absorptance</i>	0,1
<i>Visible Absorptance</i>	0,1
<i>Loads Convergence Tolerance Value</i>	0,04
<i>Temperature Convergence Tolerance Value</i>	0,004
<i>Solar Distribution</i>	<i>FullInteriorAndExterior</i>
<i>Surface Convection Algorithm:Inside</i>	<i>Detailed</i>
<i>Surface Convection Algorithm:Outside</i>	DOE-2
<i>Timestep</i>	4

2.4.3. RESULTADOS DO CASO 195 DO BESTEST

O consumo dos equipamentos é a base de comparação dos resultados, através das necessidades anuais e valores máximos.

Importa referir que os resultados do BESTEST, obtidos por um grupo de peritos da IEA apresentaram ligeiras diferenças em relação aos resultados da equipa EnergyPlus.

Estas diferenças são verificadas, essencialmente porque os casos do BESTEST não foram especificamente desenhados para o EnergyPlus, mas para poderem ser executados em toda a gama de programas de simulação deste tipo. Daí que, quando os testes aplicados a um programa, tenham que ser ajustados consoante os parâmetros e natureza do próprio programa, tal como aconteceu com a simulação do EnergyPlus.

Para o caso 195, somente o programa ESP foi aceite pela ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 como tendo resultados válidos. Todos os outros programas não foram capazes de modelar absorções de onda curta, daí que este caso não tenha um intervalo de valores para comparação.

Quadro 5 – Resultados do caso 195

Resultados	Necessidades Anuais de Aquecimento	Pico de Aquecimento	Necessidade Anuais de Arrefecimento	Pico de Arrefecimento
	[Mwh]	[kW]	[MWh]	[kW]
BESTEST	4,167	2,004	0,414	0,651
EnergyPlus	4,257	2,073	0,455	0,765
Resultados	4,136	2,054	0,493	0,792

A fig. 8 elucida os valores obtidos pelas diferentes entidades. A perspectiva geral é que os resultados estão muito próximos dos tabelados, embora para o arrefecimento os valores parecem ter sido um pouco superiores. Separou-se os resultados do aquecimento dos de arrefecimento para se analisar melhor as diferenças.

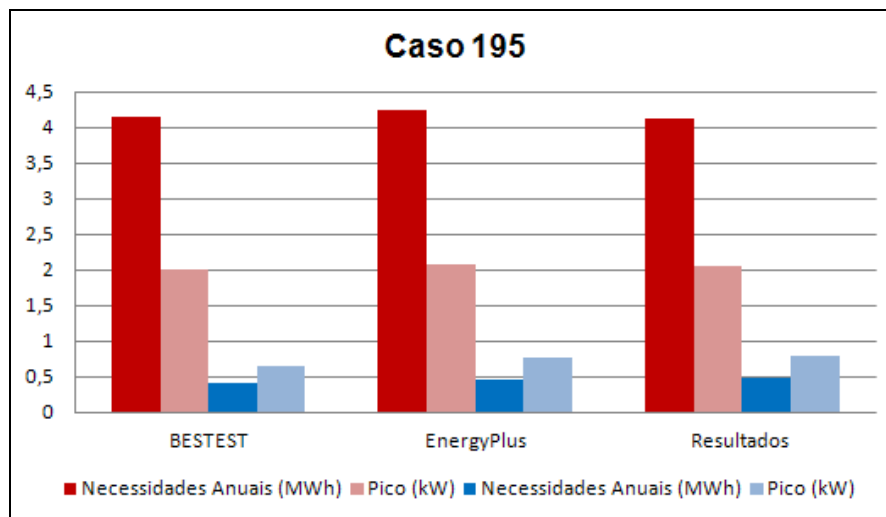


Fig. 8 – Resultados do caso 195

O consumo anual para aquecimento ultrapassou ligeiramente os 4 MWh para os três casos. O pico de aquecimento verificou-se no dia 4 de Janeiro às 6 horas da manhã e foi de cerca de 2 kW.

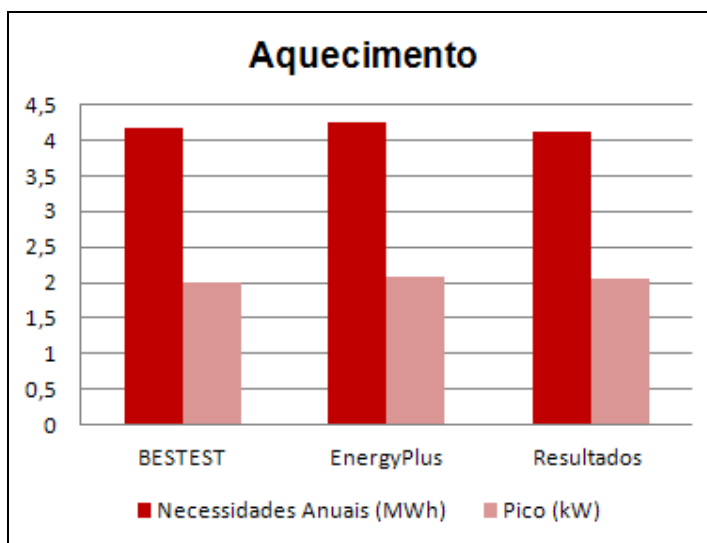


Fig. 9 – Resultados para o aquecimento

As necessidades anuais de arrefecimento variaram entre os 0,6 e 0,8 MWh. O consumo de pico máximo registou-se no dia 16 Julho às 4 horas da tarde e variou entre 0,4 e 0,5 kW.

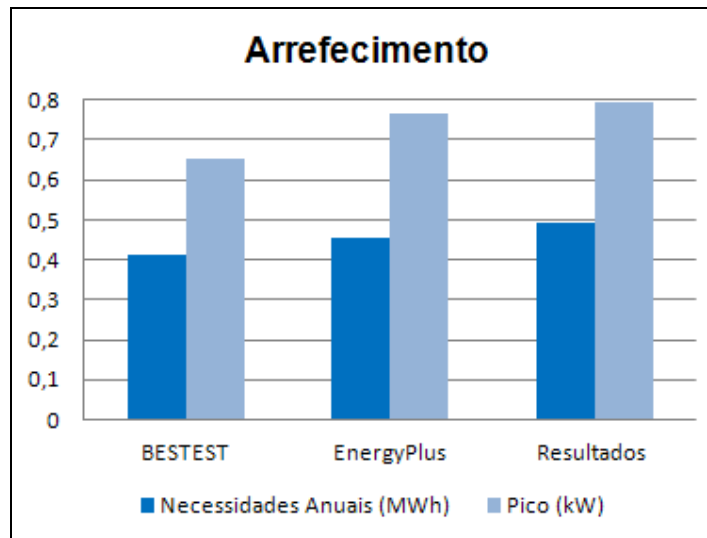


Fig. 10 – Resultados para o arrefecimento

Importa referir que a norma ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 é o documento padrão para a realização de testes para a avaliação de programas de análise de simulação energética. Devido ao seu valor actual no mercado, cerca de 80 €, não foi possível adquirir este documento [17]. A realização do caso 195 do BESTEST, foi realizada com base no documento produzido pela equipa de peritos do EnergyPlus. Este documento é uma derivação da norma ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, e a sua informação releva-se por vezes insuficiente.

Verificaram-se umas ligeiras discrepâncias nos resultados, que podem ser explicadas.

As diferenças, mais visíveis para o arrefecimento, podem dever-se ao ficheiro climático usado (*USA_CO_Denver.Intl.AP.725650.TMY3*), que foi descarregado da base de dados online do EnergyPlus [18]. O ficheiro usado pelas duas outras entidades (*Denver DRYCOLD.TMY*), consta de um CD que acompanha a norma norte americana ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 [16].

Outro factor que pode estar na origem da diferença dos resultados obtidos, foi a temperatura da superfície do solo. Na ausência de informação, optou-se por usar no campo *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* os valores definidos por defeito para a temperatura da superfície do solo, que é de 18 °C para todos os meses. Contudo, o programa tem a funcionalidade *slab*, que serve para calcular, com maior rigor, a temperatura mensal na superfície do solo.

Constata-se contudo, que os valores obtidos na realização do caso 195 do BESTEST foram suficientemente próximos dos tabelados pelas equipas do BESTEST e do EnergyPlus, pelo que há condições para concluir que a utilização do programa foi correcta.

3

Caso de Estudo

3.1 O EDIFÍCIO

3.1.1 DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

Antes de apresentar as características do caso em estudo, seria oportuno referir que o exposto neste capítulo foi baseado nas dissertações de mestrado de Katia Susana Afonso Gomes [19] e Patrícia Manuela Almeida Silva [20], ambas concluídas em Janeiro de 2010.

A moradia estudada faz parte de um complexo de doze habitações geminadas, situado perto da Av. da Boavista no Porto. É uma habitação T5 com jardim privativo e 3 pisos, um deles em cave. Na fig. 11 mostra-se os contornos da propriedade a vermelho e a moradia a azul.



Fig. 11 – Localização da moradia em estudo

A fachada Noroeste é revestida na parte inferior por granito. Está em contacto com o arruamento, por onde se faz o acesso ao complexo.

Na fachada Sudeste encontra-se o corredor principal ao nível do R/C, por onde se faz a entrada para a habitação.

As fachadas Nordeste e Sudoeste são as mais extensas.

A fachada virada a Nordeste apresenta dois tipos de revestimentos e contornos muito próprios no topo e não tem qualquer envidraçado, como se observa nas figuras 12 e 13.

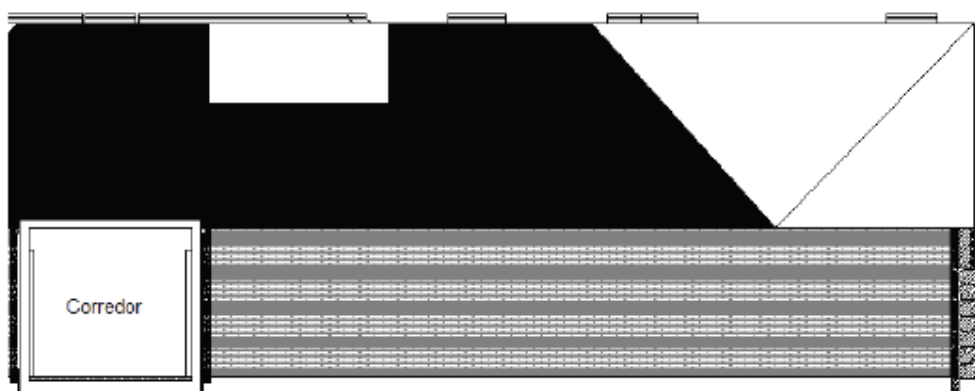


Fig. 12 – Alçado da fachada Nordeste

Na fig. 13, é nítido o revestimento a tijolo cerâmico maciço ao nível do R/C e o revestimento de argamassa de reboco no piso 1.

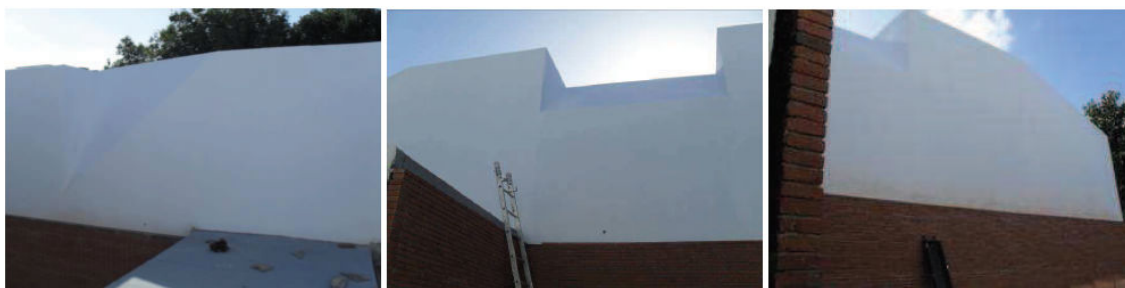


Fig. 13 – Fachada Nordeste

A fachada a Sudoeste é marcada pela sua significativa área de envidraçados. No R/C encontra-se a sala de estar à esquerda e a cozinha à direita, em contacto com o corredor. O piso 1 tem cinco envidraçados, cada um pertencente a um quarto diferente.

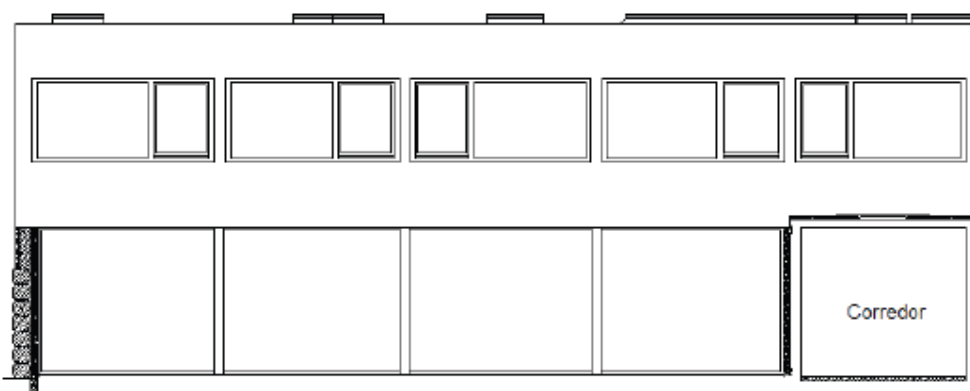


Fig. 14 – Alçado da fachada Sudoeste

Note-se que a cozinha e um dos quartos no piso 1 estão em contacto com o corredor, que é uma zona termicamente não aquecida. Ainda relativamente ao comportamento térmico, há a salientar a vasta área de envidraçados, que ao nível do R/C permitem o acesso ao jardim privativo e não têm qualquer

dispositivo de sombreamento. Estando esta fachada orientada a Sudoeste será interessante observar a influência destas condições no que a ganhos solares diz respeito.



Fig. 15 – Fachada Sudoeste

A fig. 16 sintetiza o que foi mencionado sobre as fachadas.



Fig. 16 – Orientação das fachadas do edifício

A cave é constituída maioritariamente pela garagem. Há também uma lavandaria, uma casa de banho e um compartimento técnico. O R/C tem uma sala, a cozinha e uma casa de banho. No piso 1 há cinco quartos, três casas de banho e um quarto de vestir ao fundo do corredor. A cobertura tem sete clarabóias, é plana e não tem acesso directo.

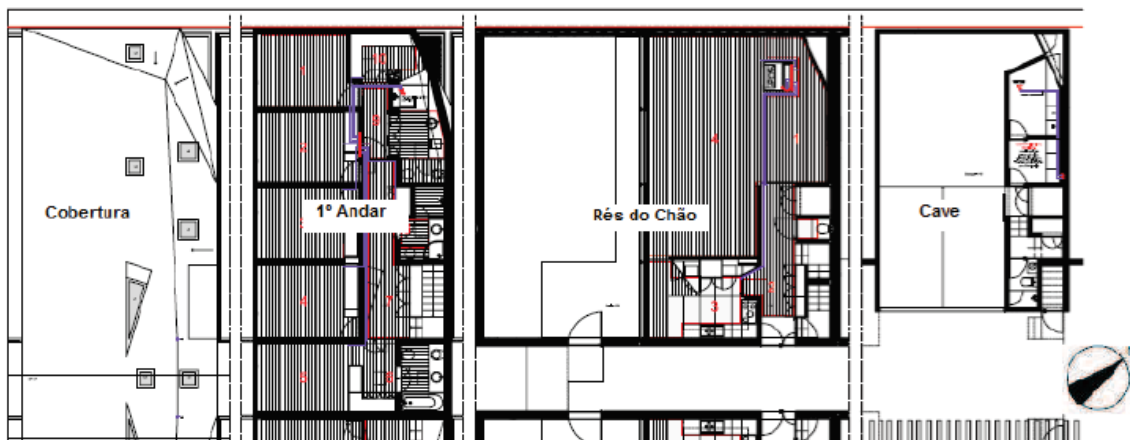


Fig. 17 – Plantas de arquitectura do edifício

Na intersecção das fachadas Noroeste e Nordeste, há uma abertura que não só aumenta a luz natural na sala, como também a faz chegar à cave.

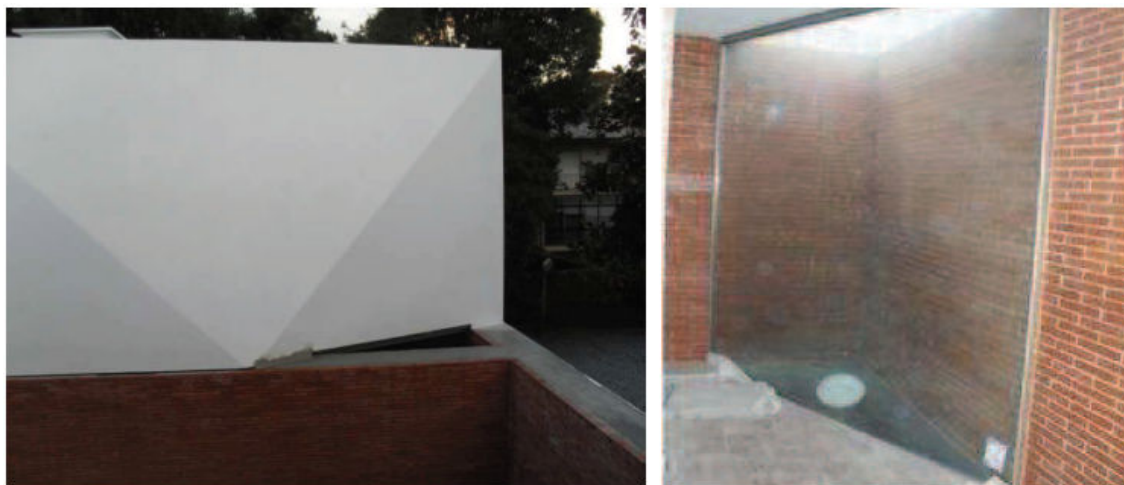


Fig. 18 – Pormenor da abertura

3.1.2 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Neste subcapítulo é feita a caracterização dos vários elementos construtivos do edifício. A ordem dos elementos presentes nos quadros está de acordo com a respectiva figura, segundo a orientação da esquerda para a direita ou de cima para baixo, no caso dos pavimentos.

As paredes do edifício são de cinco tipologias diferentes. Ao nível do piso 0 são definidas as paredes exteriores das fachadas Sudoeste, Noroeste e Nordeste.

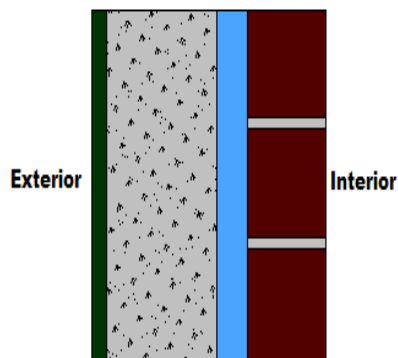


Fig. 19 – Parede exterior piso 0 – Fachada Sudoeste

Quadro 6 – Parede exterior piso 0 – Fachada Sudoeste

Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Reboco	0,02	1,3	0,015	1900	900
Betão	0,2	2	0,1	2450	750
Vidro Celular	0,04	0,037	1,081	33	1210
Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	0,13	1800	900

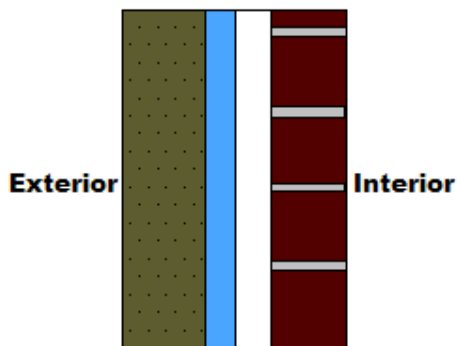


Fig. 20 – Parede exterior piso 0 – Fachada Noroeste

Quadro 7 – Parede exterior piso 0 – Fachada Noroeste

Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Granito	0,2	2,8	0,071	2600	790
Vidro Celular	0,04	0,037	1,081	33	1210
Caixa de ar	0,05		0,18		
Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	0,13	1800	900

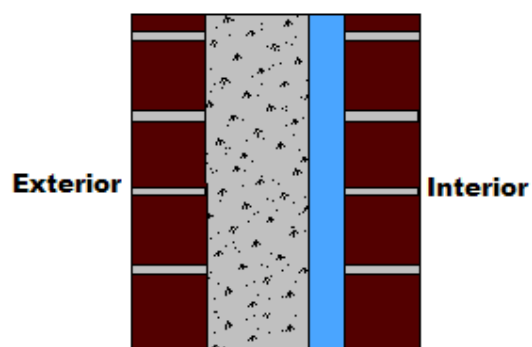


Fig. 21 – Parede exterior piso 0 – Fachada Nordeste

Quadro 8 – Parede exterior piso 0 – Fachada Nordeste

Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	0,13	1800	900
Betão	0,2	2	0,1	2450	750
Vidro Celular	0,04	0,037	1,081	33	1210
Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	0,13	1800	900

No piso 1, as paredes exteriores são todas do mesmo tipo, como se mostra na fig.22 e no quadro 9.

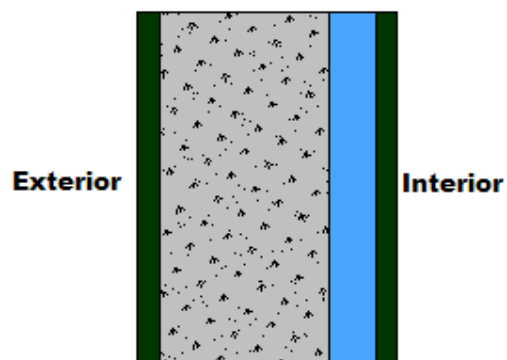


Fig. 22 – Paredes exteriores piso 1

Quadro 9 – Paredes exteriores piso 1

Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Reboco	0,02	1,3	0,015	1900	900
Betão	0,2	2	0,1	2450	750
Vidro Celular	0,04	0,037	1,081	33	1210
Reboco	0,02	1,3	0,015	1900	900

Na fachada sudeste há uma parede comum ao edifício e à moradia adjacente, ao nível do piso 1. Esta parede de separação apresenta as seguintes características:

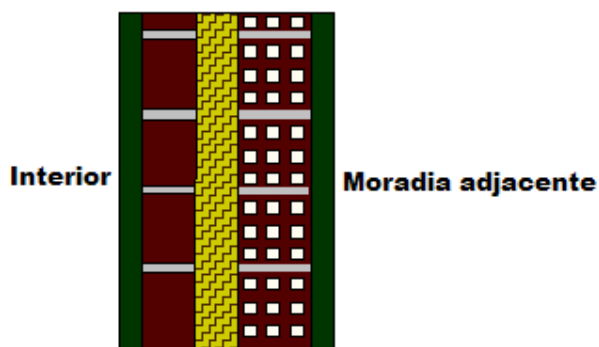


Fig. 23 – Parede de Separação

Quadro 10 – Parede de Separação

Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Reboco	0,02	1,3	0,015	1900	900
Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	0,13	1800	900
Lã de Rocha	0,05	0,04	1,24	68	840
Tijolo Cerâmico Furado	0,15	0,385	0,39	1200	900
Reboco	0,02	1,3	0,015	1900	900

As paredes interiores são todas idênticas ao longo do edifício.

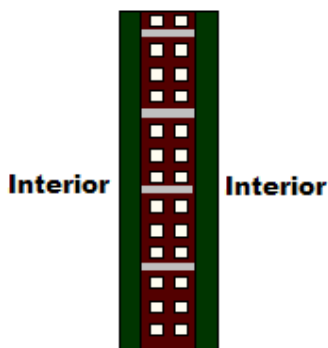


Fig. 24 – Paredes interiores

Quadro 11 – Paredes interiores

Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Reboco	0,02	1,3	0,015	1900	900
Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,407	0,27	1200	900
Reboco	0,02	1,3	0,015	1900	900

O pavimento dos pisos 0 e 1 é do mesmo tipo, em laje aligeirada.

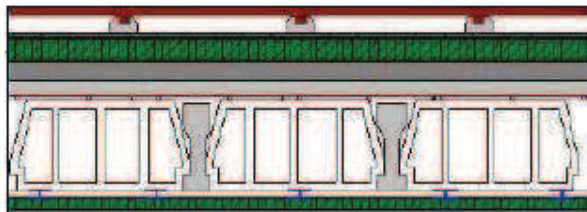


Fig. 25 – Pavimento dos pisos 0 e 1 – Laje aligeirada

Quadro 12 – Pavimento dos pisos 0 e 1 – Laje aligeirada

Posição	Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Camadas superiores	Revestimento (Soalho)	0,02	0,23	0,09	810	1200
	Lajeta flutuante	0,01				
	Elemento resiliente (Polietileno reticulado)	0,06				
	Camada de regularização de betão leve	0,05	0,46	0,109	1050	960
Elementos resistentes	Camada de compressão	0,05				
	Bloco de aligeiramento	0,23	0,885	0,26	1200	900
Camadas inferiores	Caixa-de-ar	0,02		0,19		
	Lã rocha	0,03	0,04	0,75	68	840
	Tecto (Gesso)	0,013	0,57	0,023	1150	840

A cobertura da moradia é plana com as seguintes características:

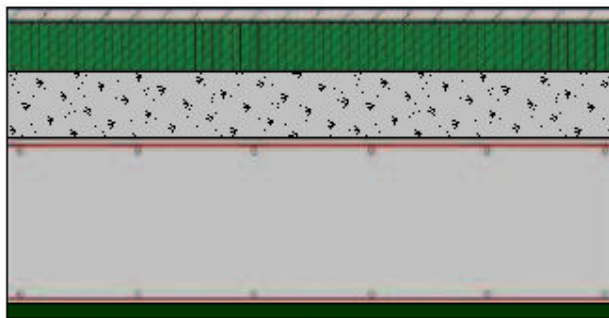


Fig. 26 – Cobertura

Quadro 13 – Cobertura

Posição	Material	e [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Camadas superiores	Lajeta flutuante	0,02				
	Elemento resiliente (Polietileno extrudido)	0,08	0,037	2,162	33	1210
	Camada de regularização de betão leve	0,10	0,46	0,217	1050	960
Elemento resistente	Laje de betão	0,26	2	0,13	2450	750
Camada inferior	Reboco	0,015	1,3	0,012	1900	900

Na fachada orientada a Sudoeste localizam-se os vãos envidraçados ao nível do piso 0, e as janelas dos quartos do piso 1, como explícito na fig. 27.



Fig. 27 – Envidraçados (vidro duplo)

Quadro 14 – Envidraçados (vidro duplo)

Posição	Material	e [m]	U [W/m ² .K]	Factor solar (g _⊥)	Transmissão luminosa
Piso 0	Vidro (exterior)	0,004	2,8	0,75	0,8
	Caixa-de-ar	0,012			
	Vidro (interior)	0,006			
Piso 1	Vidro (exterior)	0,005			
	Caixa-de-ar	0,014			
	Vidro (interior)	0,004			

Na cobertura existem sete clarabóias, uma delas triangular, cuja função é permitir a entrada de luz natural no corredor do 1º piso.

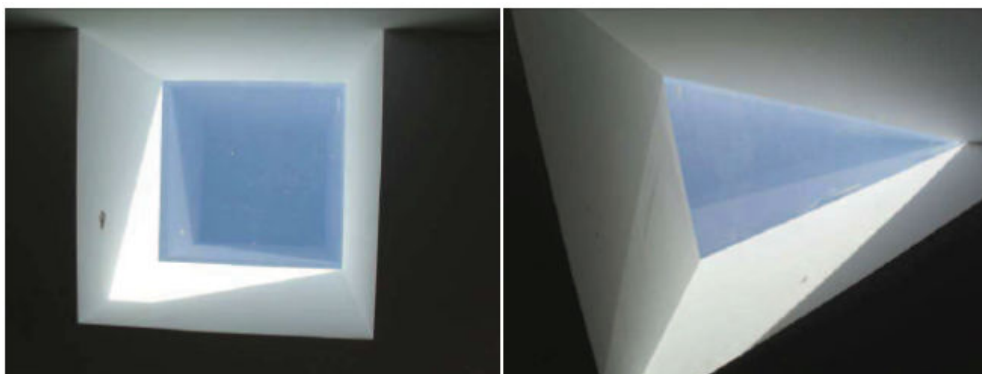


Fig. 28 – Clarabóias (vista do interior)

Quadro 15 – Clarabóias (vista do interior)

Material	e [m]	U [W/m ² .K]	Factor solar ($g_{\perp}$)	Transmissão luminosa
Vidro Simples Incolor	0,006	5,7	0,5	0,32

3.1.3 DEFINIÇÃO DE ZONAS TÉRMICAS

Na simulação higratérmica de um edifício é indispensável a definição de zonas térmicas. Uma zona térmica é definida sempre que se verificam diferenças significativas nos elementos construtivos ou nas condições fronteira.

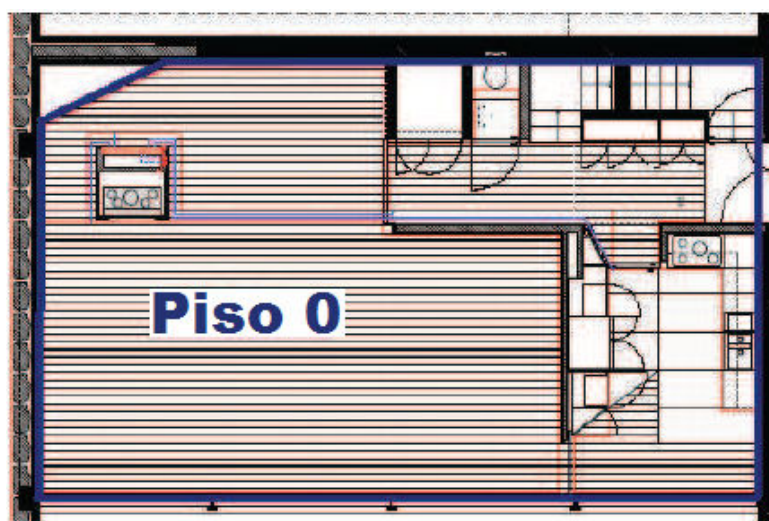


Fig. 29 – Zona térmica Piso 0

Foram definidas três zonas térmicas. O piso 0 constitui uma zona térmica, que por ser distinto do piso 1 obriga à criação de mais uma zona térmica (piso 1). A terceira zona é justificada pelas condições fronteira do quarto. Está em contacto com o corredor, que é um espaço não aquecido, e como tal, não se poderiam considerar as mesmas condições como nos restantes quartos.

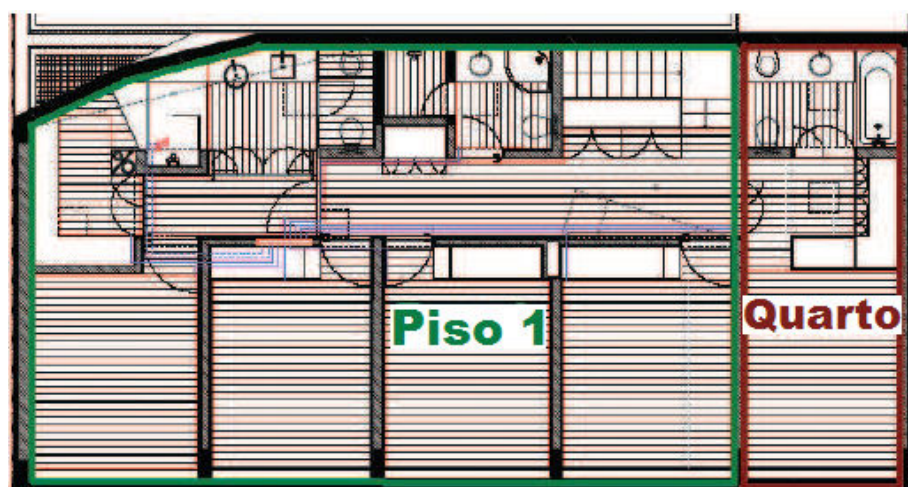


Fig. 30 – Zonas térmicas Piso 1 e Quarto

3.2 MEDIÇÕES “IN SITU”

Foram realizadas medições de temperatura em diferentes locais da habitação, para que posteriormente se pudesse proceder à comparação dos valores medidos com os resultados da simulação do EnergyPlus.

Para tal, foram utilizados vários sensores que registaram a temperatura interior a cada 15 minutos, ao longo de sensivelmente três meses.



Fig. 31 – Sensor utilizado nas medições “in situ”

Os sensores foram colocados estrategicamente a meia altura da parede. A fig. 32 mostra como foi colocado o sensor 18 no corredor do piso 1.

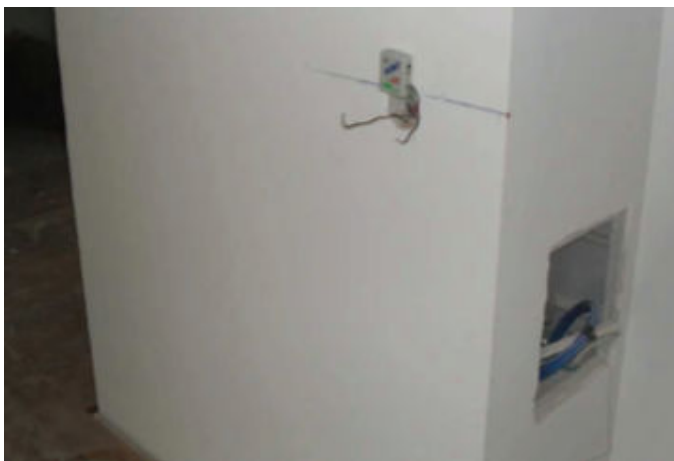


Fig. 32 –Sensor 18

Durante a fase de colocação dos sensores na habitação, houve a dificuldade de encontrar um local que resguarda-se o sensor da incidência directa da luz solar através dos envidraçados e das clarabóias. Esta dificuldade foi maior para os sensores 13 e 14 colocados no piso 0, devido a vasta área de envidraçado da sala.

As fig. 33 e fig. 34 revelam a posição dos 6 sensores na habitação. Os sensores 13 e 14 foram instalados no rés-do-chão. Na zona térmica piso 1, foram colocados três sensores, dois nos quartos e um no corredor, e na zona térmico quarto foi instalado o sensor 12.

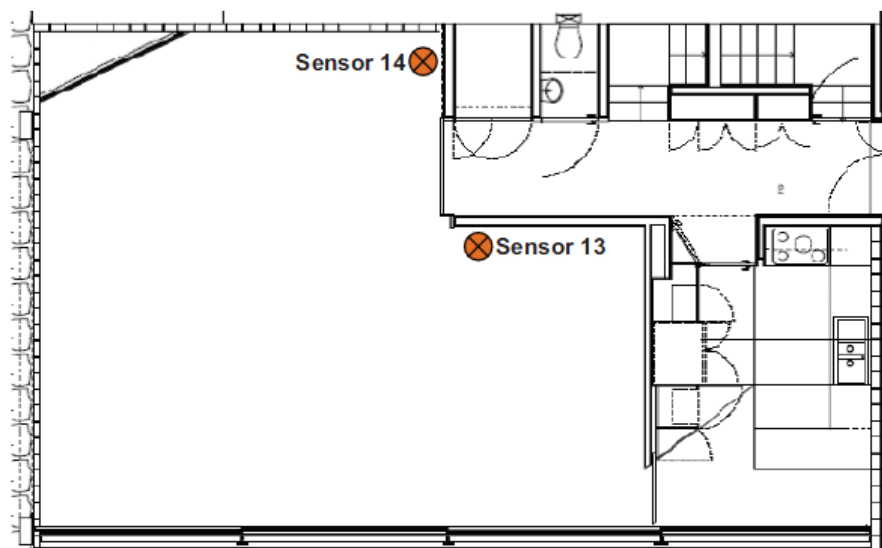


Fig. 33 – Posicionamento dos sensores no piso 0

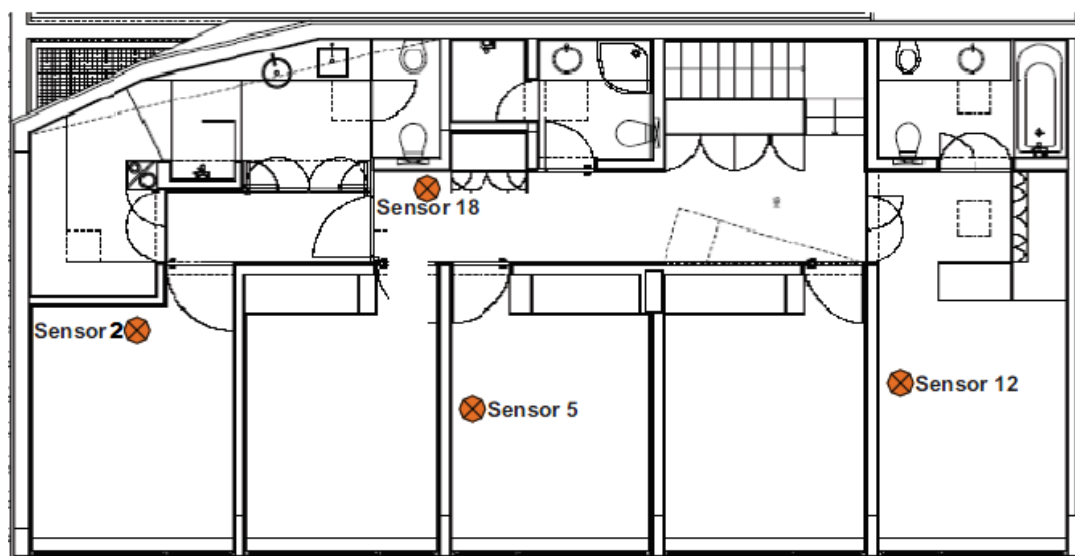


Fig. 34 – Posicionamento dos sensores no piso 1

De seguida, apresenta-se os registos das medições dos sensores para as 3 zonas térmicas em estudo. As medições foram feitas para intervalos de 15 minutos entre o dia 28 de Setembro a 10 de Dezembro de 2009.

3.2.1 Piso 0

Como se mostra na fig.35, a temperatura vai diminuindo à medida que avançamos de Setembro para Dezembro, acompanhado a tendência natural do clima para este período.

Os sensores colocados no piso 0, tiveram registos semelhantes. No entanto, o sensor 13 registou temperaturas mais elevadas e maiores amplitudes. Poderá dever-se ao facto de estar mais próximo dos envidraçados e à consequente flutuação de temperatura devido aos ganhos solares.

A amplitude térmica registada para o dia 24 de Novembro parece exagerada, pelo que o registo poderá ter sido afectado de alguma anomalia.

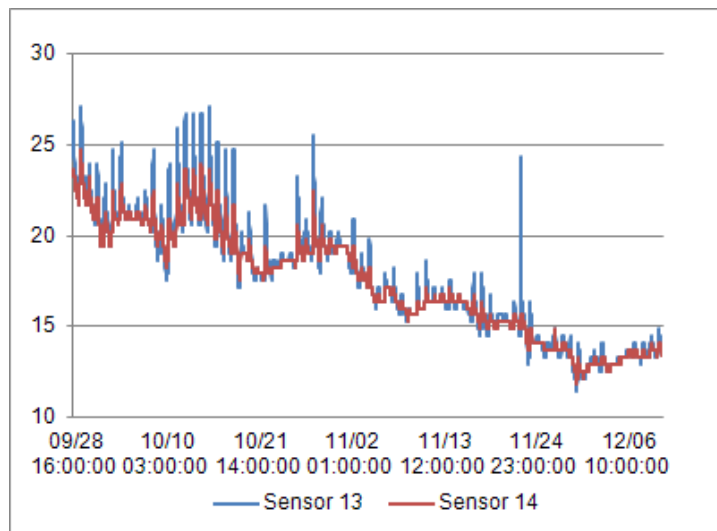


Fig. 35 – Temperatura (°C) dos sensores para o piso 0

3.2.2 Piso 1

Apesar da coerência nos registos dos três sensores, o sensor 5 apresenta valores extremos mais elevados. Possivelmente devido a sua proximidade ao envidraçado. Este sensor deixou de efectuar registo no final do mês de Novembro devido a um problema técnico. Contudo, este contra tempo não afectará de forma significativa as conclusões que se poderão alcançar.

O sensor 18, como se encontrava no corredor sem a incidência directa de luz solar, apresentou temperaturas ligeiramente mais baixas.

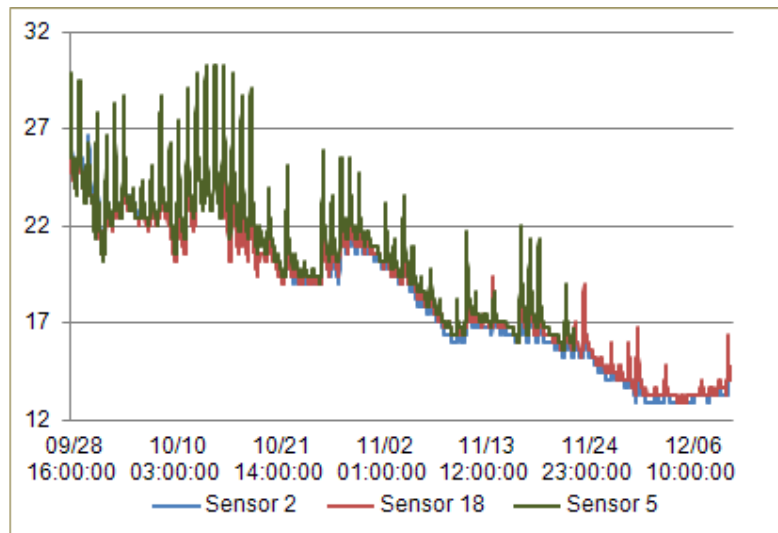


Fig. 36 – Temperatura (°C) dos sensores para o piso 1

3.2.3 QUARTO

A evolução dos valores registados pelo sensor 12 foi muito semelhante aos valores do sensor 5. Ambos foram colocados em paredes interiores de quartos no primeiro piso em condições semelhantes, sendo portanto expectável a coerência entre os valores medidos.

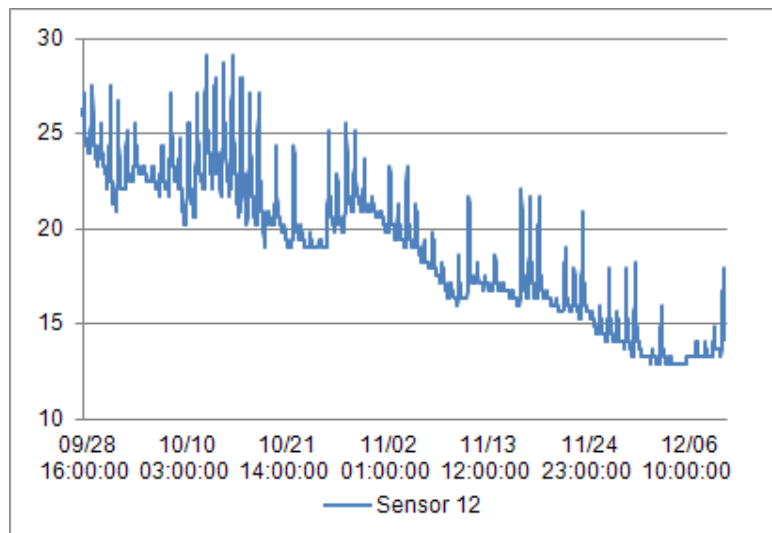


Fig. 37 – Temperatura (°C) dos sensores para o quarto

4

Estudo de sensibilidade – Propriedades dos materiais

4.1 ENQUADRAMENTO

Realizou-se uma análise de sensibilidade com o intuito de perceber a influência de cada propriedade na simulação. As propriedades dos materiais em avaliação foram a resistência térmica de elementos da envolvente, o factor solar de envidraçados, a rugosidade de superfícies e o calor específico de materiais.

Cada alteração a uma determinada propriedade produz alterações nos resultados para as três zonas térmicas, que serão analisados mediante a ordem: piso 0, piso 1 e quarto.

É importante lembrar que existem várias formas de fazer variar as diversas variáveis. Por isso, houve a necessidade de adoptar uma estratégia em cada modificação. Assim sendo, procurou-se alterar cada propriedade isoladamente e dentro de valores razoáveis.

À simulação em que se altera uma propriedade dos materiais denominou-se Simulado e à simulação original chamou-se de Simulação base. Esta simulação encontra-se no capítulo 5 de resultados, da dissertação de Katia Gomes [19] e servirá de termo de comparação para todas as alterações efectuadas.

Foi adoptada a cor verde para expor os resultados da simulação considerada base. As curvas a roxo nas figuras seguintes, exprimem os resultados da simulação para cada alteração às propriedades dos materiais.

Para os resultados exprimiu-se a temperatura em médias diárias e separou-se os gráficos em duas partes, sendo o dia 2 de Novembro o ponto de divisão. Esta divisão separa os meses de Setembro e Outubro, onde a influência do sol predomina, dos meses de Novembro e Dezembro onde a radiação solar é menor.

Note-se que, as curvas da simulação base bem como as curvas das medições dos sensores serão sempre as mesmas para cada zona térmica, pois estes valores são constantes. Assim, apenas as curvas a roxo variarão, exprimindo a temperatura resultante da alteração imposta.

Todas as simulações foram realizadas considerando o período de 28 de Setembro a 10 de Dezembro de 2009.

4.2 RESISTÊNCIA TÉRMICA (R)

O procedimento para avaliar a influência da resistência térmica nos resultados foi o de diminuir para metade, em cada simulação, a resistência térmica global de uma parede ou laje de piso diferente. Considerou-se para uma mesma fachada duas paredes diferentes, uma referente a cada piso.

A fachada Sudeste, deverá ser a menos expressiva, pois ao nível do piso 0 é um corredor protegido da luz solar directa e para o piso 1 é uma parede de separação, considerada adiabática.

4.2.1 REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE SUDOESTE – PISO 0

Quando se reduziu a resistência térmica da parede para metade, verificou-se uma aproximação geral dos resultados no piso 0. Embora ainda fique muito aquém de igualar as medições dos sensores para a primeira parte do gráfico, para a segunda os valores da temperatura encontram-se mais próximos. Os resultados da simulação não são uma redução constante de temperatura. Como se pode observar na fig. 38, o afastamento entre as curvas verde e roxa varia ao longo do período da simulação.

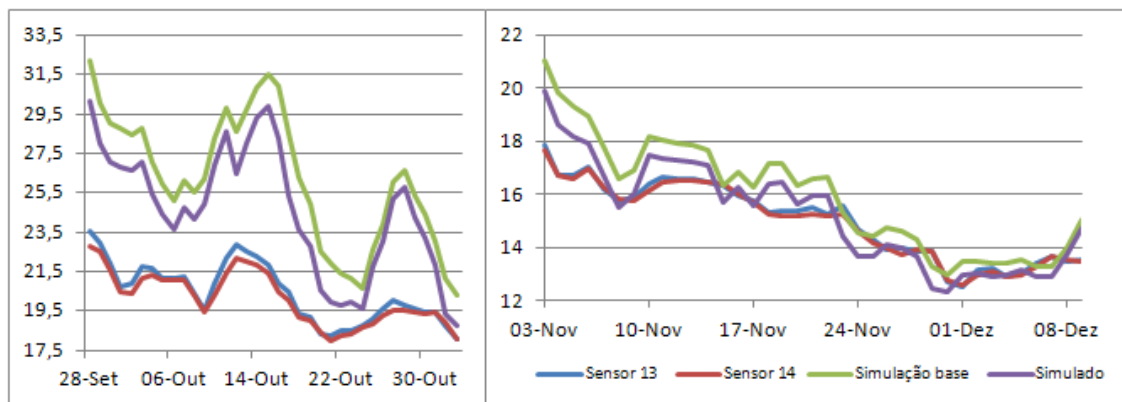


Fig. 38 – Temperatura (°C) no piso 0

Na fig. 39, é possível observar que as maiores diferenças verificam-se para meados de Outubro. Para o dia 17 de Outubro, a temperatura da simulação chegou a ser inferior à da simulação base em 3,2 °C. É também visível que a diferença é maior para os meses de Setembro e Outubro.

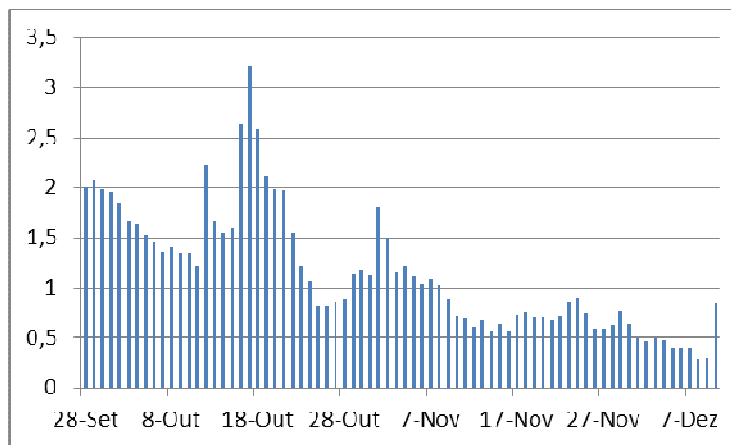


Fig. 39 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 0 (°C)

A representação da temperatura das duas simulações por ordem crescente com registo de cada 15 minutos encontra-se na fig. 40. Isto permite um outro tipo de análise, em que os valores da temperatura são agrupados por valor, independentemente da sequência cronológica. A fig. 40 indica que a redução de temperatura foi maior para a gama de valores entre a média e o P_{90} . Isto é, com esta solução, reduziria-se mais a temperatura no piso 0 quando a temperatura estivesse entre 20 e 30 °C. Em média a temperatura baixou 1,14 °C e a diferença entre as temperaturas máximas foi de 1,38 °C.

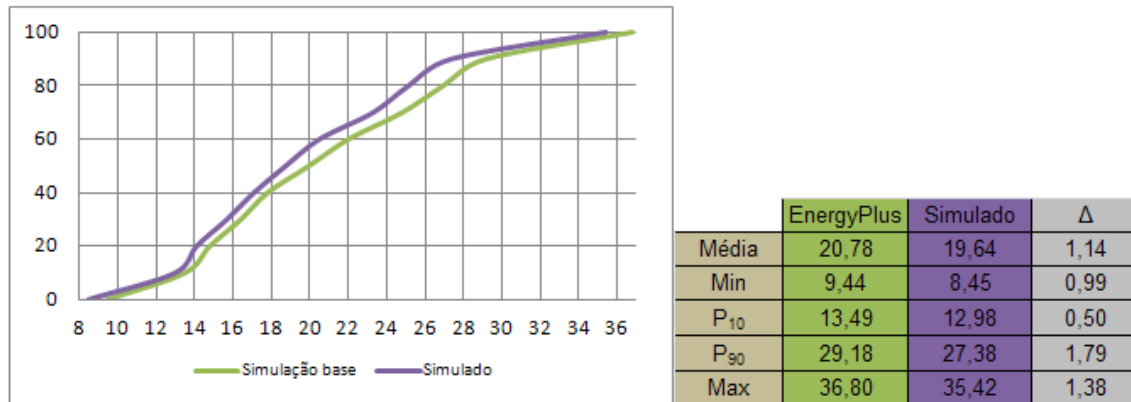


Fig. 40 – Temperatura (°C) no piso 0 por ordem crescente

No piso 1, a simulação base atingiu valores superiores para a primeira parte do gráfico e valores muito próximos na segunda.

Analisando o efeito da simulação no piso 1, verifica-se que a redução da temperatura foi menor neste piso. Como seria de esperar, uma diminuição da resistência térmica numa parede do piso 0 teria maior efeito neste mesmo piso. Como mostra a fig. 41, a simulação aproxima-se das medições para a primeira parte do gráfico e os valores mantêm-se quase sempre abaixo das medições para os meses de Novembro e Dezembro.

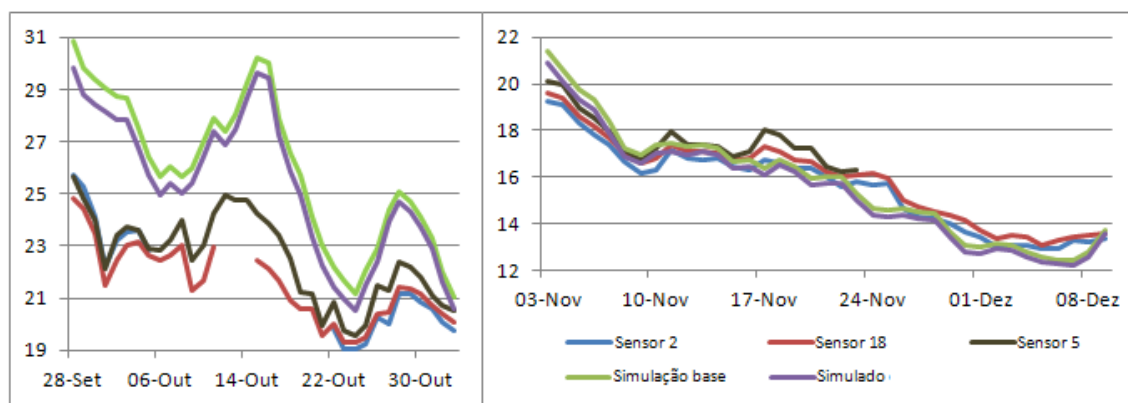


Fig. 41 – Temperatura (°C) no piso 1

Pela fig. 42, verifica-se que o decréscimo da diferença entre as simulações acompanha a descida natural das temperaturas ao longo do Outono. Também se constata que esta diferença foi praticamente sempre inferior a 1°C.

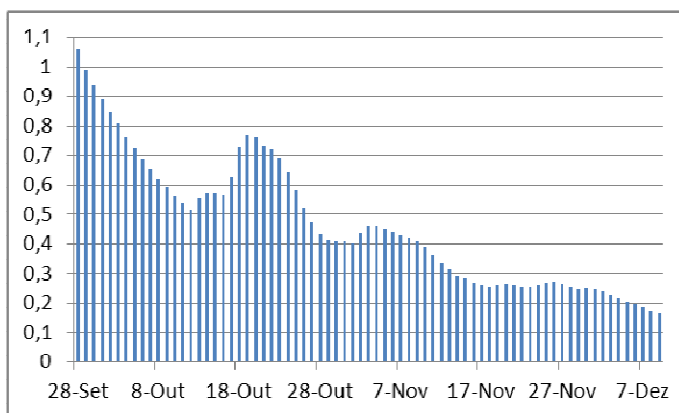


Fig. 42 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C)

Consta da fig. 43, que em média, a simulação reduziu a temperatura no piso 1 em cerca de meio grau. As maiores diferenças face à simulação base verificaram-se para valores de temperatura entre 25 e 28 °C. Ainda assim, o efeito da simulação foi pequeno na zona térmica piso 1, visto que a redução máxima de temperatura conseguida foi de pouco mais de 1 °C.

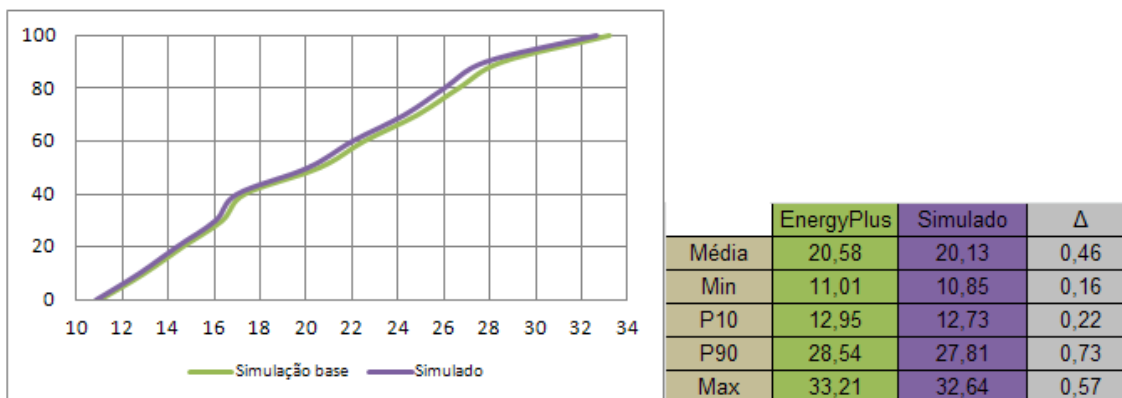


Fig. 43 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente

Os resultados da simulação para o quarto são superiores ao dos sensores para os primeiros dois meses e inferiores para o segundo período da simulação. Como se observa na fig. 44, o quarto é a zona térmica em que a alteração produz menor efeito. Assim seria de esperar, dada a distância do quarto aos envidraçados do piso 0, como consta do alçado da fachada sudoeste presente na fig. 11.

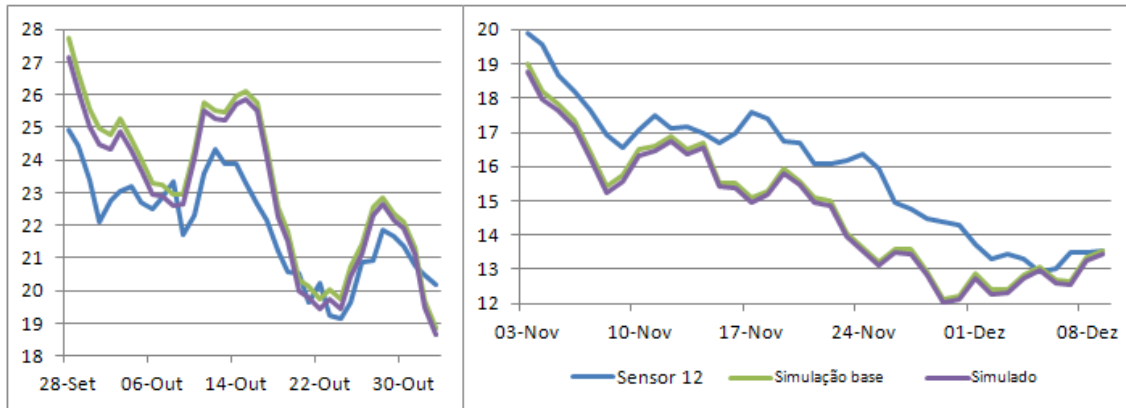


Fig. 44 – Temperatura (°C) no quarto

A redução de temperatura foi pouco significativa e tal como para o piso 1, foi diminuindo ao longo do período de simulação.

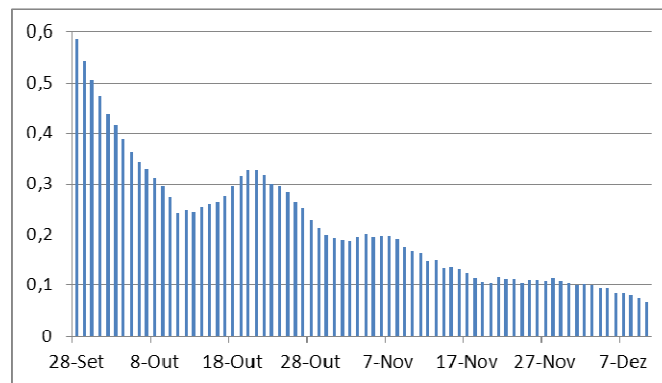


Fig. 45 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)

A temperatura média desceu 0,21 °C e ainda que pequenas, as diferenças foram superiores para os percentis altos.

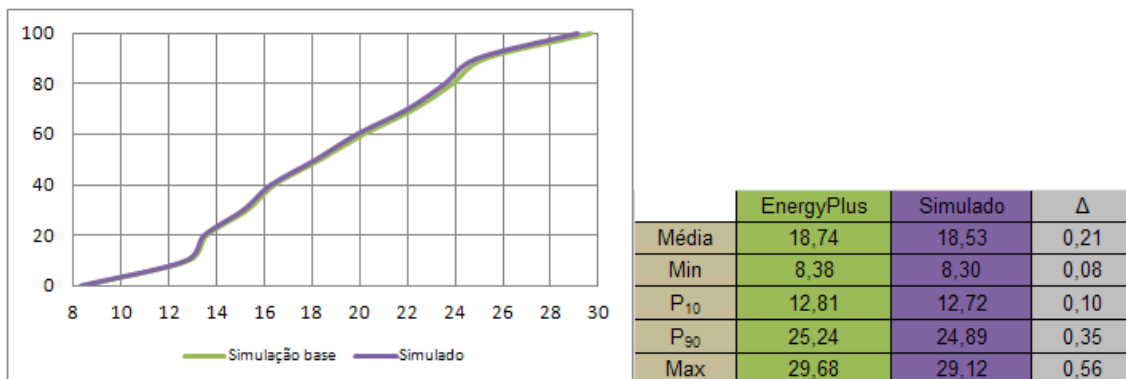


Fig. 46 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente

4.2.2 REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE SUDOESTE – PISO 1

A parede sudoeste tem cinco janelas ao nível do primeiro piso. Foi necessário diminuir a resistência da parte opaca e aumentar a condutibilidade térmica dos vidros, de forma a reduzir para metade a resistência térmica global da parede. Analogamente ao sucedido para o piso 0, esta alteração deverá ter maior impacto na zona em contacto com a parede, ou seja, as zonas térmicas piso 1 e quarto.

Observa-se na fig. 47 que o resultado da simulação é pouco expressivo para o piso 0.

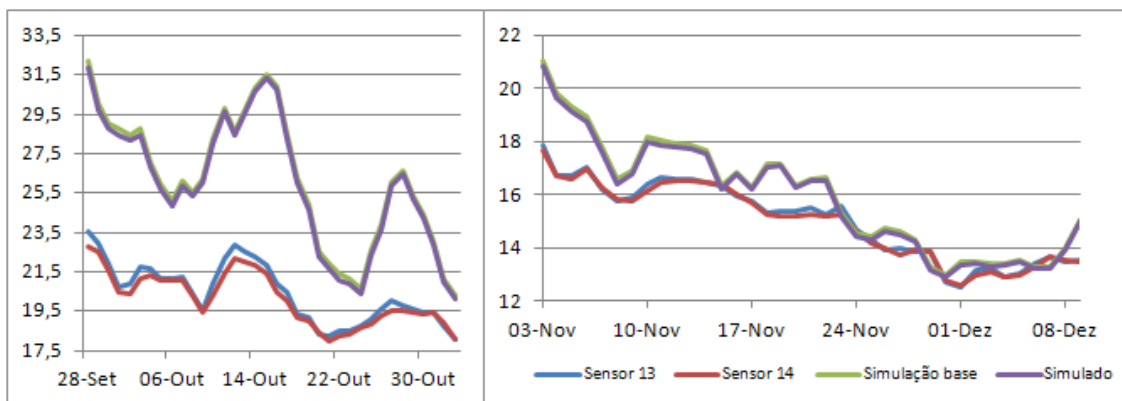


Fig. 47 – Temperatura (°C) no piso 0

Como se verifica na fig. 48, a variação esteve abaixo de meio grau centígrado. O abaixamento médio de temperatura foi de 0,17 °C. Este cenário torna desinteressante a análise gráfica dos valores de temperatura por ordem crescente para o piso 0.

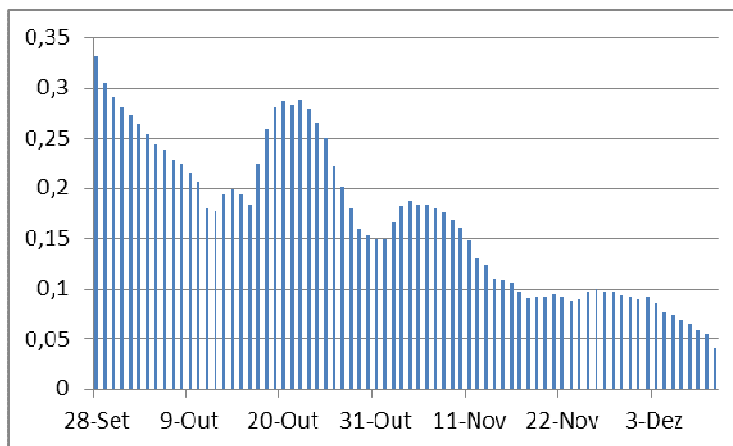


Fig. 48 – Diferença entre o EnergyPlus e o Simulado no piso 0 (°C)

A simulação produziu no piso 1 um decréscimo significativo da temperatura média diária. Este decréscimo aproximou a simulação às medições para a primeira metade do gráfico, enquanto que para a segunda o resultado é desfavorável, porque a temperatura tende a ser menor que a das medições.

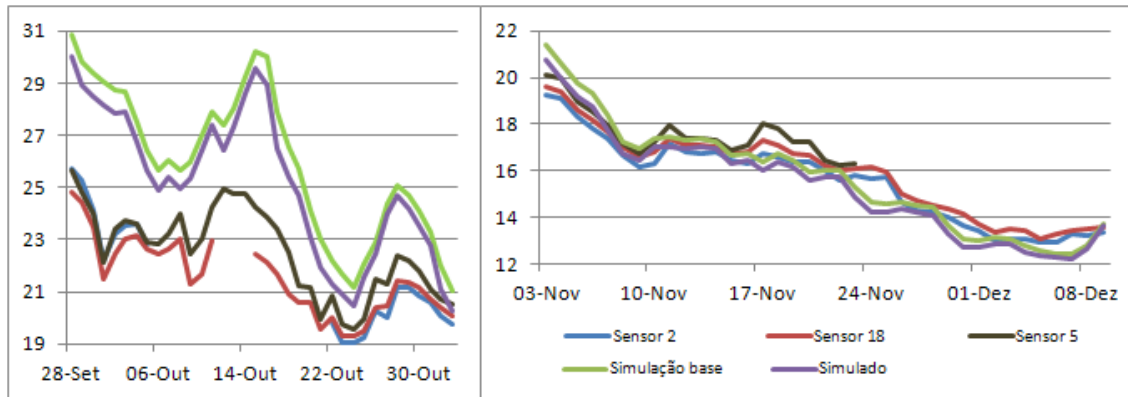


Fig. 49 – Temperatura (°C) no piso 1

A distribuição da diferença entre as duas simulações é semelhante à da fig. 42, ainda que neste caso este diferencial tenha sido inferior. A maior diferença, também se verificou para o dia 17 de Outubro e foi de 1,36 °C.

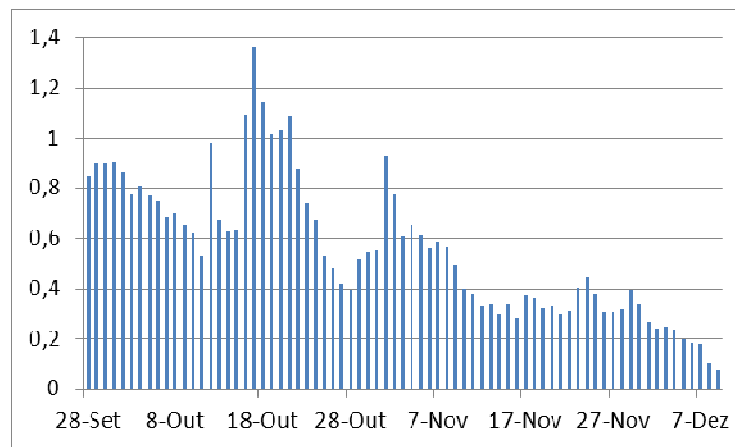


Fig. 50 – Diferença entre o EnergyPlus e o Simulado no piso 1 (°C)

Da simulação resultou uma diminuição de pouco mais de meio grau na temperatura média do piso 1.

Uma curiosidade que se observa na fig. 51 é que os valores extremos diferenciaram praticamente o mesmo, mas os valores do P_{90} afastaram-se da simulação base quase o triplo que os valores do P_{10} . Isto significa que para os valores superiores a 90 % dos resultados a redução da temperatura foi três vezes maior que para os valores correspondentes a 10 % dos valores mais baixos dos resultados. É uma situação em que a análise da média e dos valores de mínimo e máximo não é suficiente para perceber se a simulação tem o mesmo efeito nos dias de maior calor e nos dias em que a temperatura é mais baixa.

Através da fig. 51, pode-se afirmar que consegue-se reduzir mais a temperatura no piso 1, nas alturas em que a mesma se encontra entre os 20 e os 28 °C.

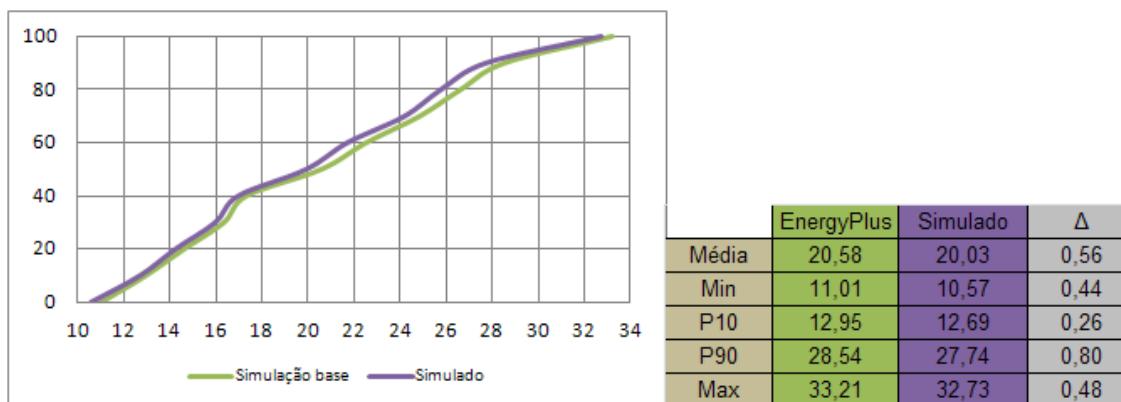


Fig. 51 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente

No quarto, a redução da temperatura foi menor do que a do piso 1. Todavia, conseguiu-se melhores resultados para o primeiro período da simulação. A partir do mês de Novembro, a temperatura obtida na simulação foi sempre substancialmente mais baixa que a registada pelo sensor.

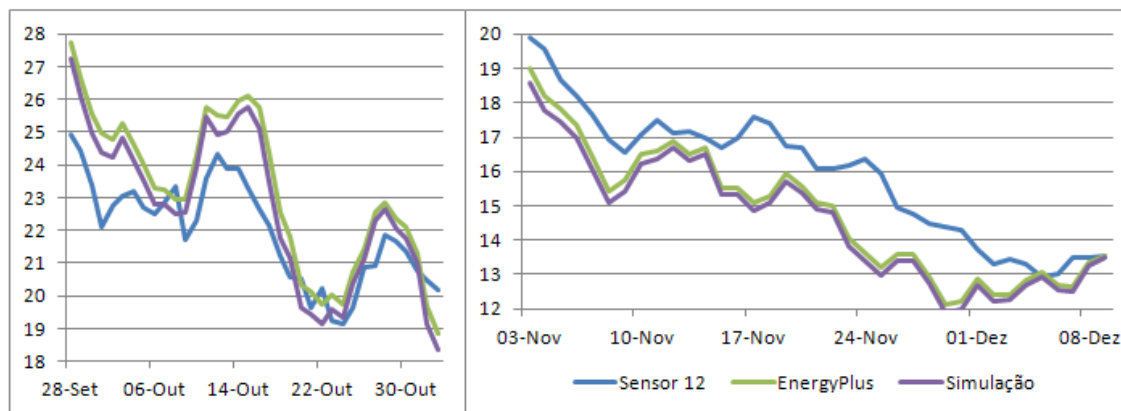


Fig. 52 – Temperatura (°C) no quarto

A maior redução de temperatura foi de 0,89 °C no dia 17 de Outubro.

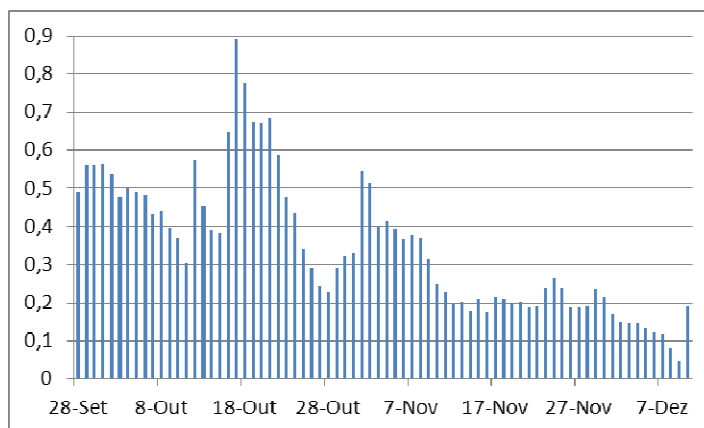


Fig. 53 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)

A fig. 54 mostra que também neste caso a simulação mantém a tendência de ser mais eficiente para os valores mais elevados de temperatura.

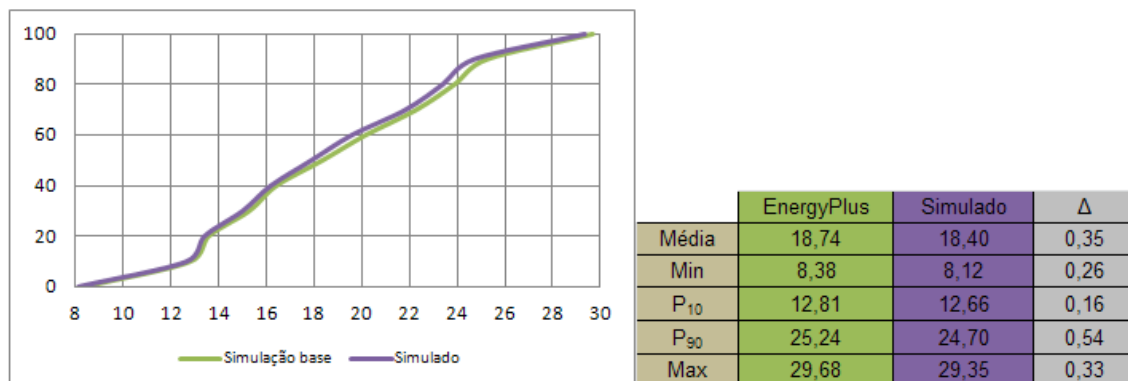


Fig. 54 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente

4.2.3 REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE NORDESTE – PISO 0

A parede nordeste é revestida a tijolo cerâmico maciço ao nível do R/C. Foi feita uma simulação aplicando à parede o mesmo decremento de resistência térmica que se aplicou anteriormente. O resultado da simulação revelou-se pouco significativo. A fig. 55 mostra como evoluiu a temperatura no piso 0.

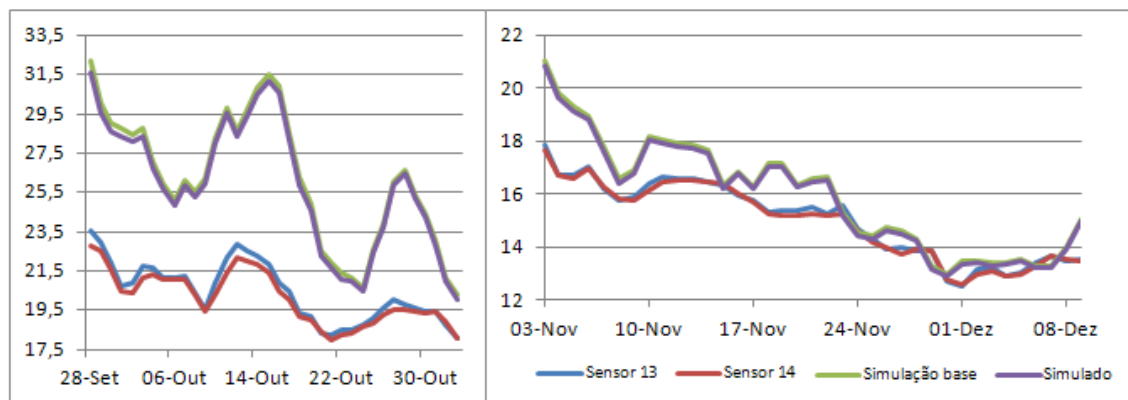


Fig. 55 – Temperatura (°C) no piso 0

O afastamento da simulação em relação à simulação base diminuiu ao longo do período de simulação. A maior diferença foi de 0,55 °C no dia 28 de Setembro e a diferença média 0,2 °C.

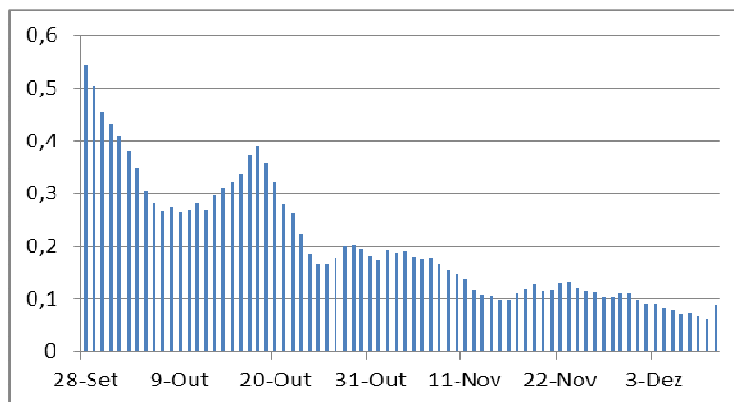


Fig. 56 – Diferença entre o EnergyPlus e o Simulado no piso 0 (°C)

No piso 1, o resultado da simulação foi ainda menos relevante. O afastamento à simulação base apenas é perceptível para os primeiros dias de simulação.

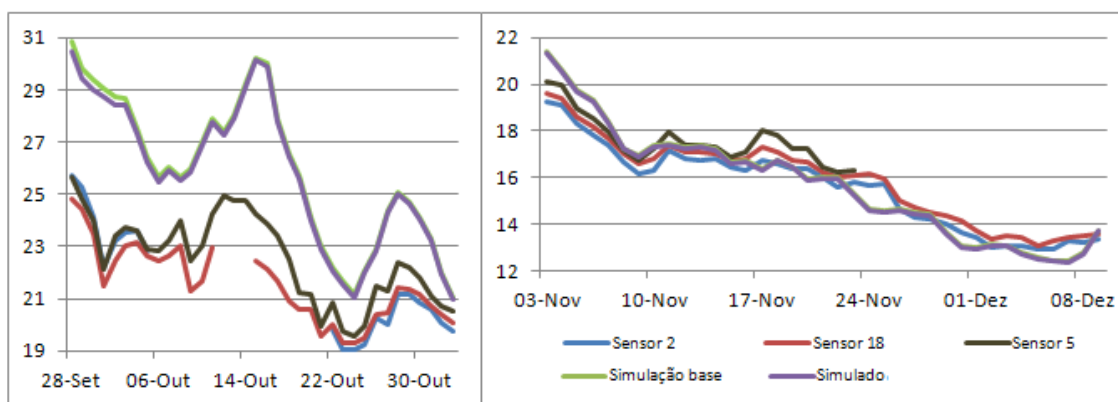


Fig. 57 – Temperatura (°C) no piso 1

As diferenças entre simulações são muito pequenas e seguem uma função do tipo exponencial decrescente. Esta solução apenas diminuiu a temperatura média do piso 1 em 0,1 °C.

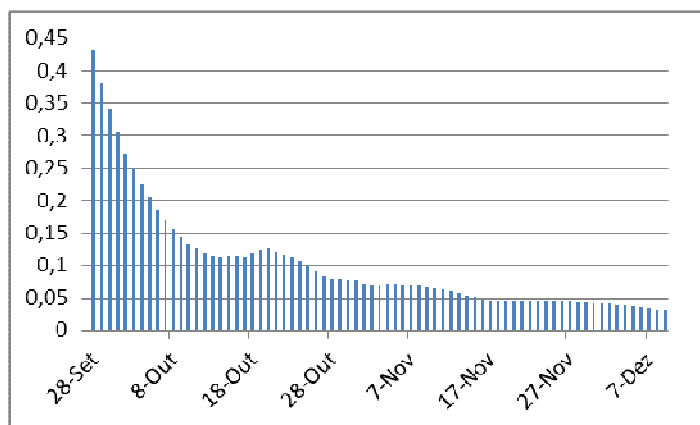


Fig. 58 – Diferença entre o EnergyPlus e o Simulado no quarto (°C)

No quarto, a sobreposição das curvas revela a impotência desta solução na aproximação dos resultados da simulação aos do sensor. A diminuição máxima foi de apenas 0,25 °C, para o primeiro dia.

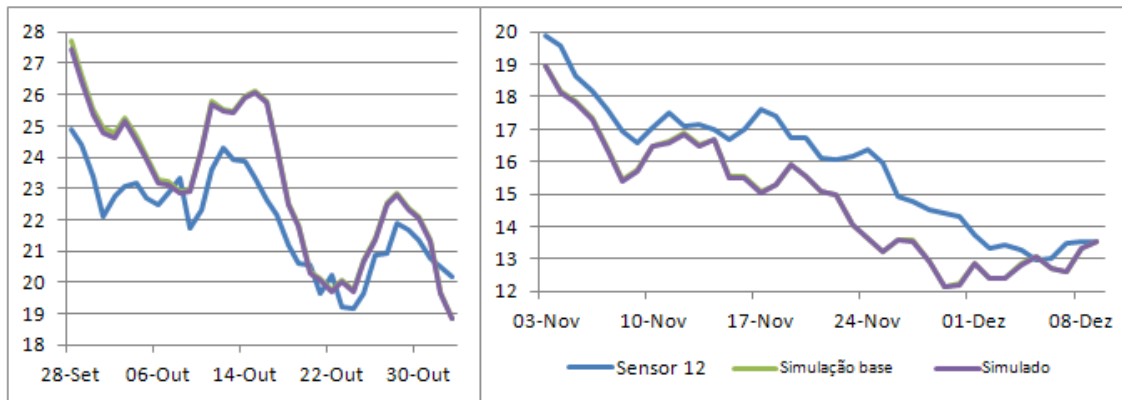


Fig. 59 – Temperatura (°C) no quarto

4.2.4 REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE NORDESTE – PISO 1

A resistência térmica da parede nordeste foi reduzida para metade, mas apenas ao nível do piso 1.

No piso 0, contrariamente ao expectável, a alteração na parede ao nível do piso 1 produziu sensivelmente o mesmo efeito que quando incutida à parede do piso 0.

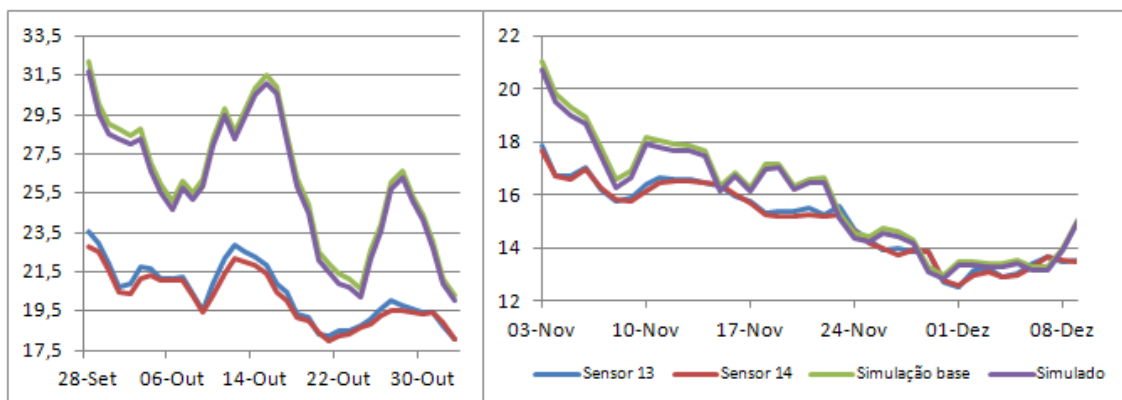


Fig. 60 – Temperatura (°C) no piso 0

Como sucedido anteriormente, a diferença entre as simulações foi maior para os primeiros dois meses. No entanto, não se conseguiu diminuir a temperatura em mais que meio grau centígrado e a temperatura média diária apenas diminuiu 0,28 °C.

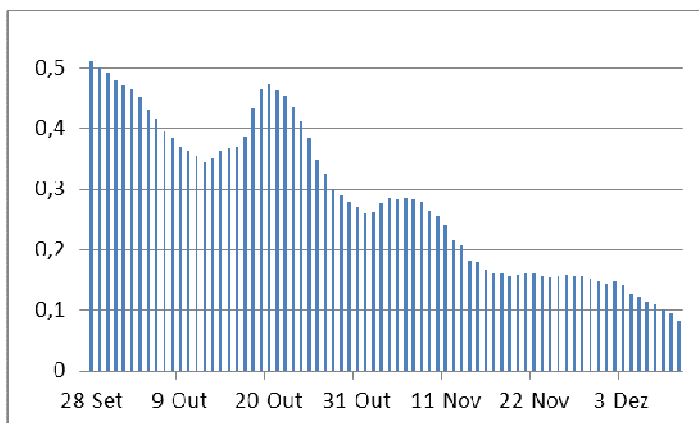


Fig. 61 – Diferença entre o EnergyPlus e o Simulado no piso 0 (°C)

No piso 1 os resultados da simulação são bem mais expressivos. Pode-se observar na fig. 62 como a curva a roxo se aproxima das medições dos sensores para a primeira parte do gráfico. Para a segunda metade, este afastamento é prejudicial, uma vez que a simulação base já se encontrava coincidente e inferior às medições para alguns períodos.

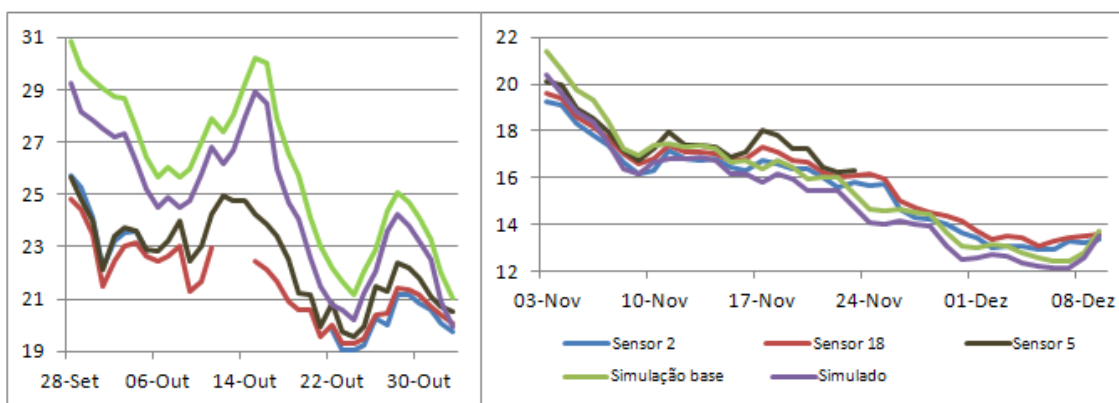


Fig. 62 – Temperatura (°C) no piso 1

Com uma distribuição de diferenças do tipo que já foi verificado anteriormente para outros casos, o maior decréscimo de temperatura foi de 1,91 °C no dia 17 de Outubro.

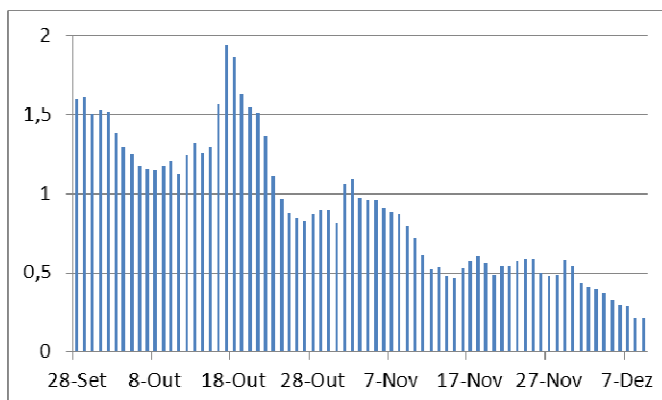


Fig. 63 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C)

A redução média de temperatura foi de 0,9 °C. As alterações verificadas no piso 1 foram expressivas para todos os valores, sendo maiores quando a temperatura rodou os 26 °C.

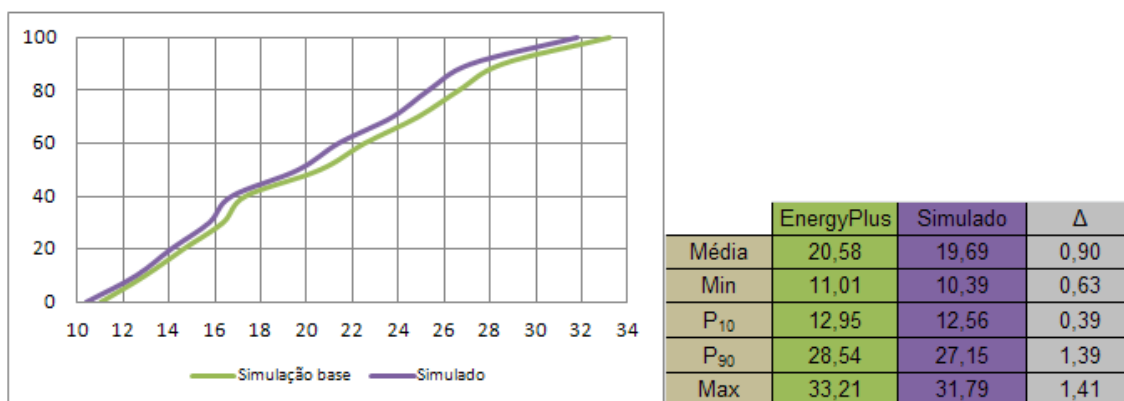


Fig. 64 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente

Na fig. 65 é visível o efeito da simulação na temperatura interior do quarto. Como noutras simulações apresentadas anteriormente para esta zona térmica, a simulação é favorável no primeiro período de simulação e desfavorável no segundo.

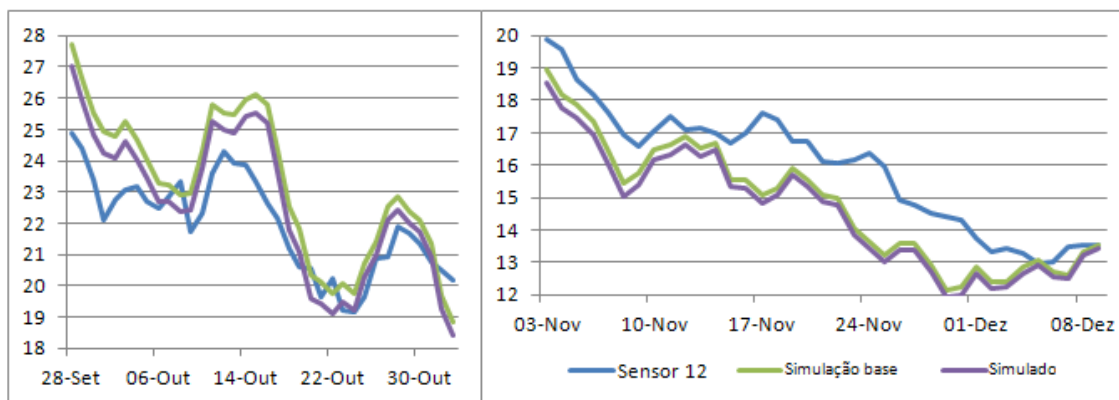


Fig. 65 – Temperatura (°C) no quarto

Como se observa na fig. 66, em Novembro e Dezembro as alterações são menores. O maior decréscimo de temperatura voltou a acontecer para o dia 17 de Outubro e foi de 0,78 °C.

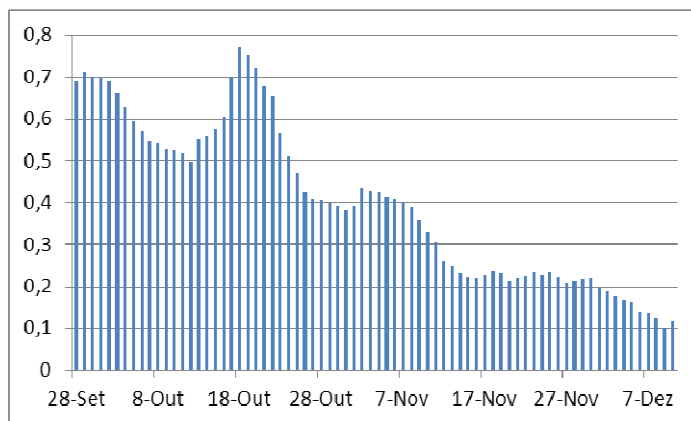


Fig. 66 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)

Pela fig. 67, pode-se referir que a redução de resistência na parede nordeste do primeiro piso não faz variar muito a temperatura do quarto.

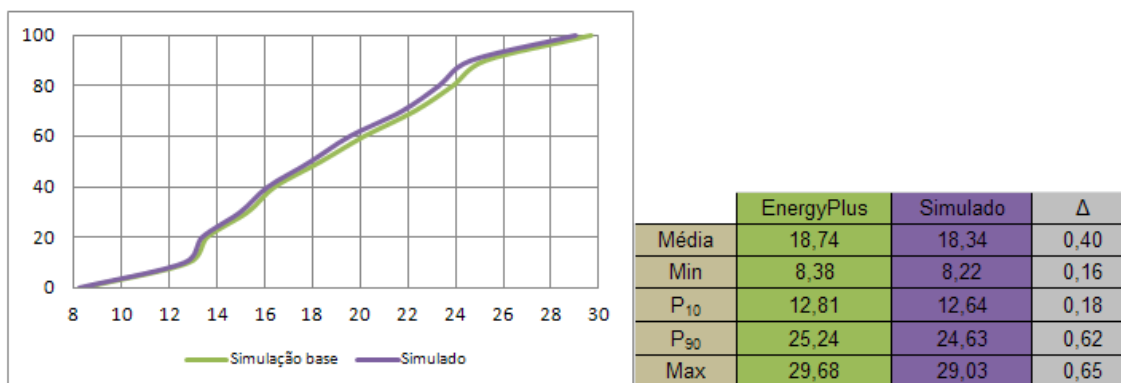


Fig. 67 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente

4.2.5 REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA COBERTURA

A cobertura do edifício estudado apresenta uma área de clarabóias considerável. Assim, a redução para metade da resistência térmica global da cobertura deveria ser implementada para o conjunto opaco mais a parte envidraçada.

A condutibilidade térmica do vidro das clarabóias é de $5,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Deveria aumentar para o dobro, de modo a reduzir para metade a resistência térmica. O programa EnergyPlus limita o valor da condutibilidade térmica dos envidraçados a $7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, pelo que não foi possível aumentar mais que este valor. Assim sendo, a resistência da parte opaca foi reduzida para metade, mas a resistência da parte envidraçada apenas foi reduzida em cerca de 25%. Todavia, a parte opaca é a constituição principal da cobertura.

O resultado da simulação para os pisos 0 e 1, mostraram que quase não houve alteração de temperatura. A diferença máxima entre simulações para ambos os pisos não atingiu $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pela fig. 68, observa-se que a simulação consegue-se diferenciar da curva da simulação base nalguns momentos e noutros se sobrepõe a esta.

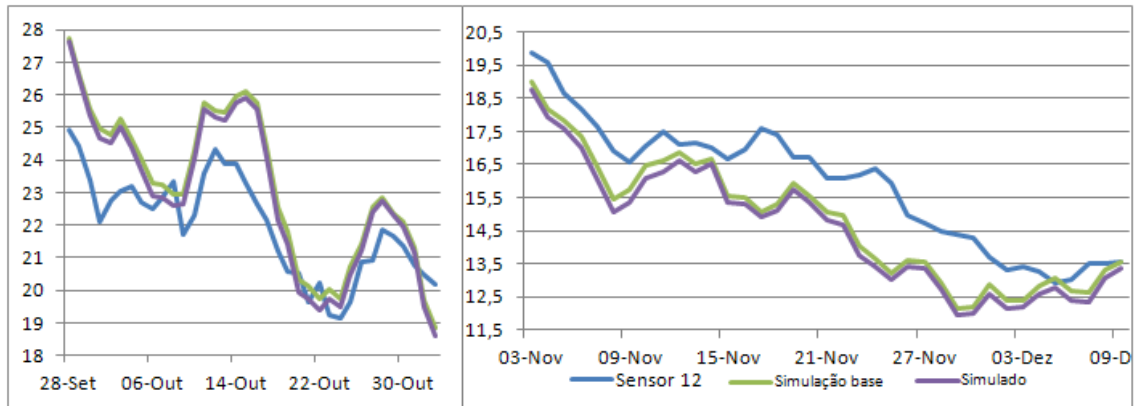


Fig. 68 – Temperatura (°C) no quarto

Embora as diferenças entre as simulações sejam inferiores a 0,4 °C, é curioso verificar a oscilação das diferenças. O valor da diferença máxima verificou-se quatro vezes, duas vezes em Outubro e outras duas em Novembro.

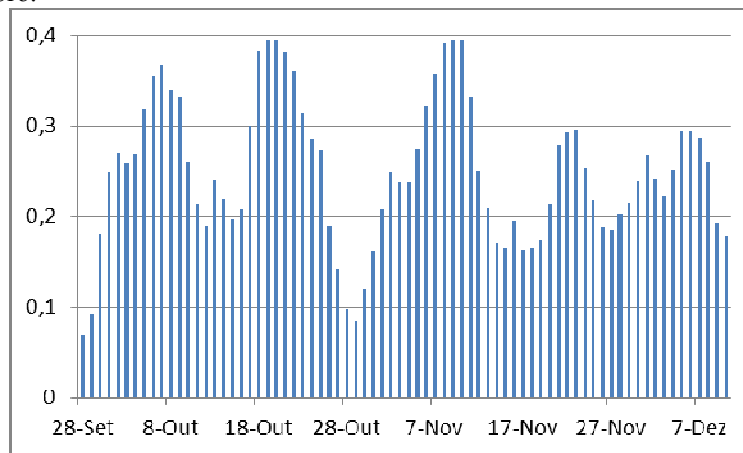


Fig. 69 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)

A redução da temperatura média foi de apenas 0,25 °C. Ao contrário das anteriores simulações, em que a redução de temperatura foi maior para as temperaturas mais altas, neste caso esta redução foi sensivelmente uniforme, como indica o afastamento constante da curva a roxo face à verde.

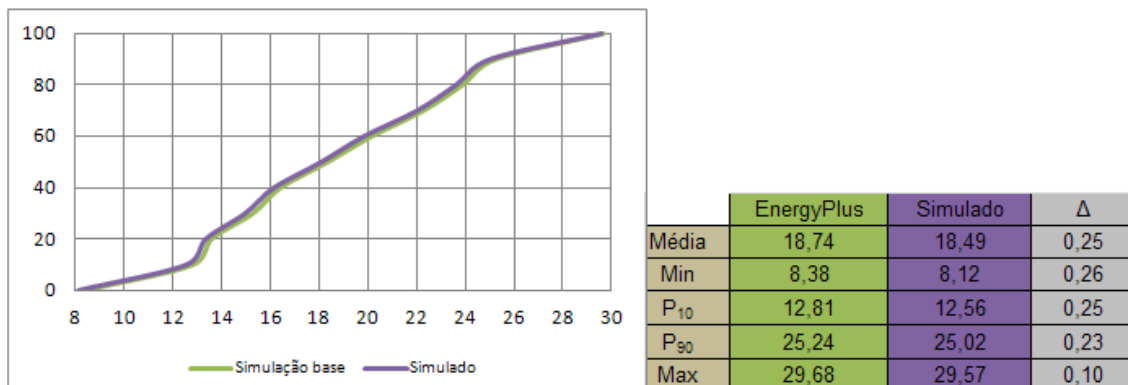


Fig. 70 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente

4.2.6 COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Em forma de síntese apresenta-se a seguir a redução de temperatura produzida em cada simulação para cada uma das zonas térmicas.

Quadro 16 – Resumo das alterações à resistência térmica

Piso	Parede	Redução	Zona térmica mais afectada	Maior diferença [°C]
Piso 0	Sudoeste	50%	Piso 0	3,20
Piso 1	Sudoeste	50%	Piso 1	1,36
Piso 0	Nordeste	50%	Piso 0	0,55
Piso 1	Nordeste	50%	Piso 1	1,91
Cobertura	-	50%	Quarto	0,40

Para o piso 0, a simulação que produziu maior efeito foi claramente a redução da resistência térmica da parede Sudoeste ao nível do piso 0. Em determinadas alturas do dia, esta redução chegou mesmo a ser superior a 4 °C. As restantes simulações tiveram pouca expressão nesta zona térmica, com diferenças inferiores a 0,8 °C.

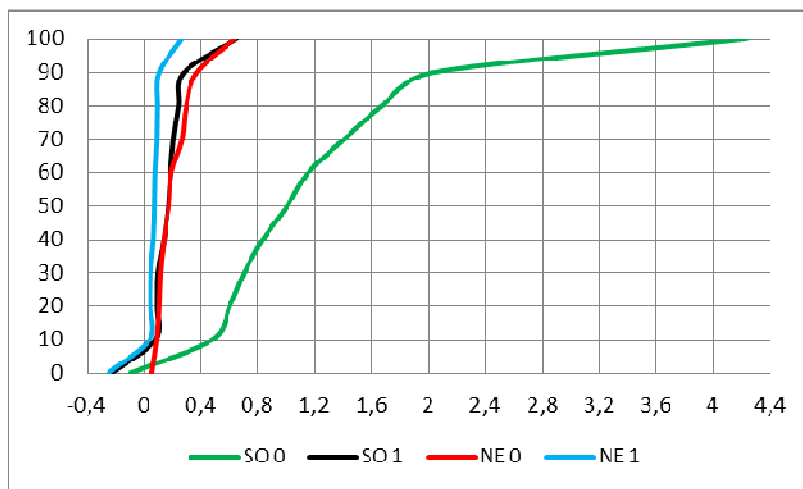


Fig. 71 – Comparação das diferenças entre simulações no piso 0 (°C)

Nenhuma simulação, em nenhum momento do período de simulação produziu um aumento de temperatura superior a 0,4 °C.

No piso 1, as simulações que envolveram a redução da resistência térmica da fachada sudoeste conseguiram produzir maior variação da temperatura. Surpreendentemente, a alteração de resistência na parede sudoeste ao nível do piso 0, revelou-se mais eficaz que a mesma alteração na parede nordeste ao nível do piso 1. A simulação que provocou maior alteração nos valores da temperatura foi a redução de resistência na parede sudoeste ao nível do primeiro piso. A temperatura variou de um decréscimo de 1,8 °C a um aumento de 0,2 °C.

As simulações que envolveram a fachada nordeste revelaram-se pouco eficazes, visto a redução de temperatura ter sido inferior 0,5 °C

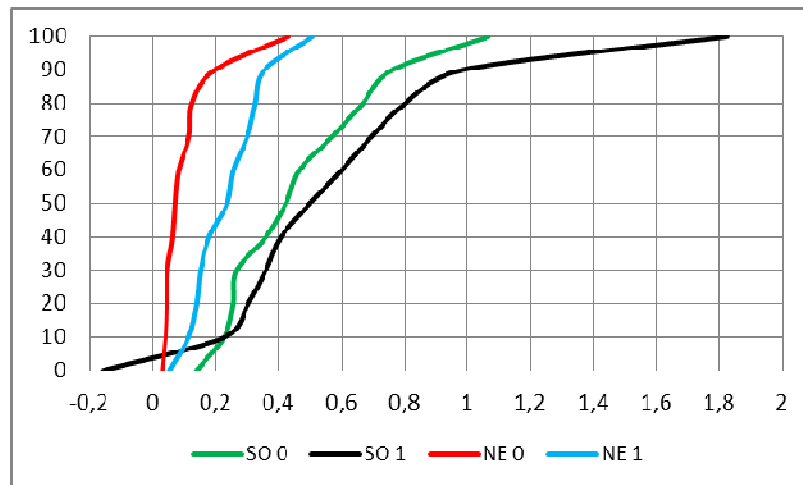


Fig. 72 – Comparação das diferenças entre simulações no piso 1 (°C)

O quarto foi a zona térmica onde menos se conseguiu fazer variar a temperatura. Como se observa na fig. 73, nenhuma das cinco simulações realizadas nesta área conseguiu reduzir a temperatura em mais de 1,2 °C ou aumentar em mais de 0,3 °C. Como no piso 1, a simulação que provocou diferenças maiores foi a que envolve a fachada sudoeste ao nível do piso 1. Também aqui, as alterações feitas na fachada nordeste, não produziram o efeito esperado, sendo estas simulações as menos expressivas.

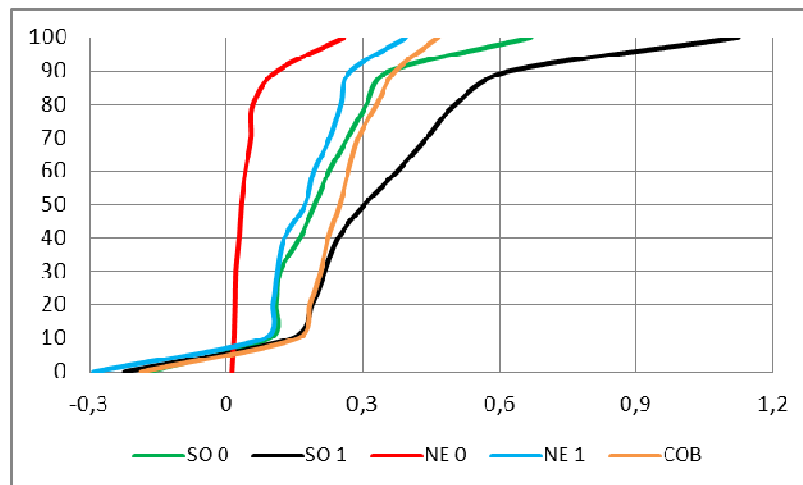


Fig. 73 – Comparação das diferenças entre simulações no quarto (°C)

4.3 FACTOR SOLAR ($g_{\perp}$)

Como o edifício só têm aberturas na fachada sudoeste, todas as simulações feitas serão referentes a alterações dessa propriedade naqueles envidraçados.

No piso 0, a fachada sudoeste é toda constituída por vãos envidraçados, e no piso 1 apresenta cinco janelas. Assim, é de esperar que o factor solar seja uma propriedade com expressão nos resultados.

4.3.1 $g_{\perp} = 0,5$ NOS PISOS 0 E 1

Os vidros tinham alguma sujidade normal no decorrer das obras. Este facto pode alterar o factor solar real do vidro. Esta simulação representa uma redução do factor solar dos envidraçados de 0,75 para 0,5, para atender a este aspecto.

No piso 0, observou-se uma melhoria clara dos resultados, embora os valores da temperatura a partir de finais de Novembro caíssem abaixo dos valores registados pelos sensores.

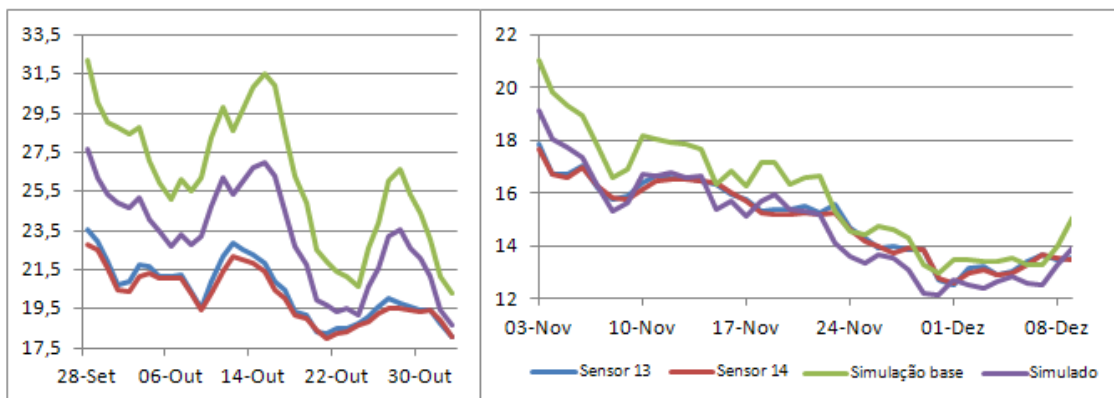


Fig. 74 – Temperatura (°C) no piso 0

Como consta da fig. 75, a redução da temperatura foi maior nos primeiros dois meses. O valor extremo da redução da temperatura diária média foi de 4,59 °C no dia 16 de Outubro.

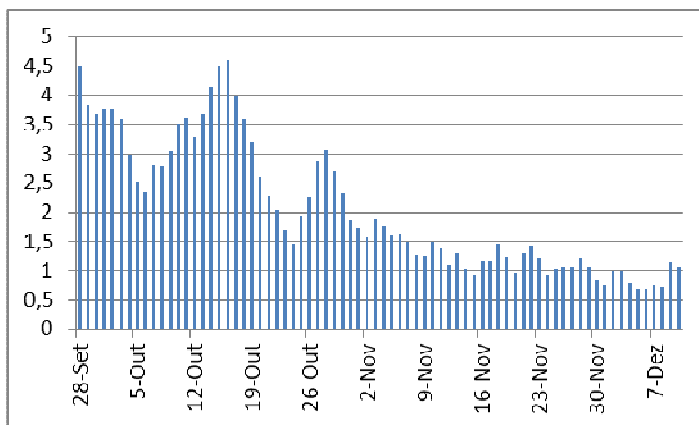


Fig. 75 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 0 (°C)

A alteração no factor solar dos envidraçados, produziu no piso 0 um decréscimo médio equivalente a 2 °C. Para os valores mais elevados de temperatura, a redução chegou aos 6 °C.

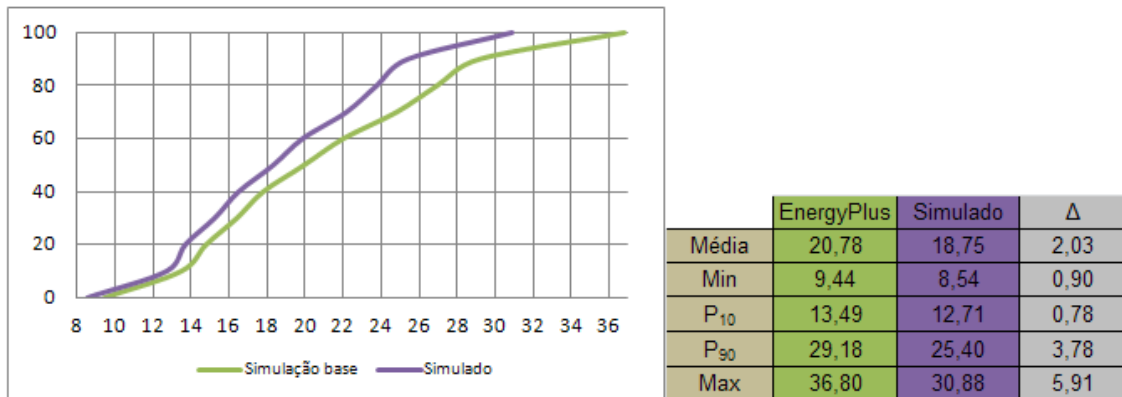


Fig. 76 – Temperatura (°C) no piso 0 por ordem crescente

No piso 1, a simulação está muito próxima dos valores dos sensores para a primeira metade, chegando mesmo a igualar os valores do sensor 5 em alguns pontos. Para os últimos dois meses de simulações, esta alteração afasta em demasia os resultados simulados.

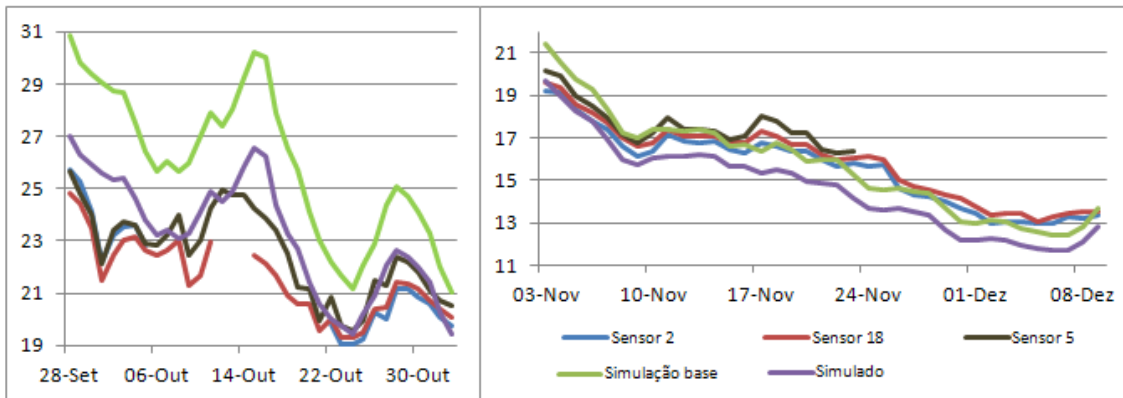


Fig. 77 – Temperatura (°C) no piso 1

A maior diferença diária de temperatura verifica-se para o primeiro dia de simulações e vale pouco menos de 4° C.

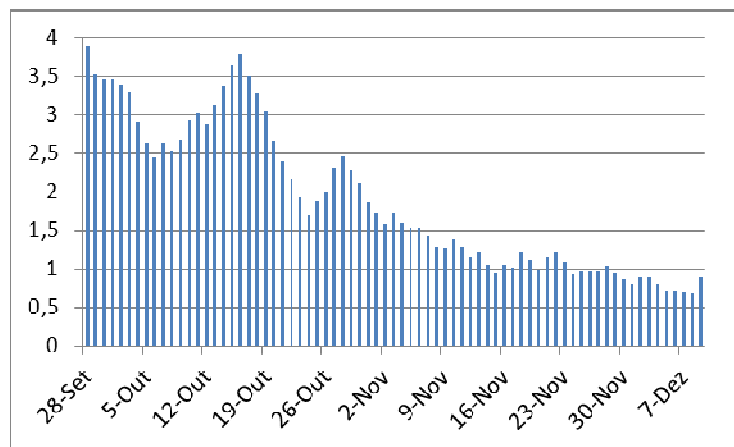


Fig. 78 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no piso 1 (°C)

A redução da temperatura média de 1,87 °C foi um pouco menor que a verificada para o piso 0. O afastamento à simulação base foi maior para as temperaturas mais altas e sucessivamente menor à medida que se registava o decréscimo de temperatura.

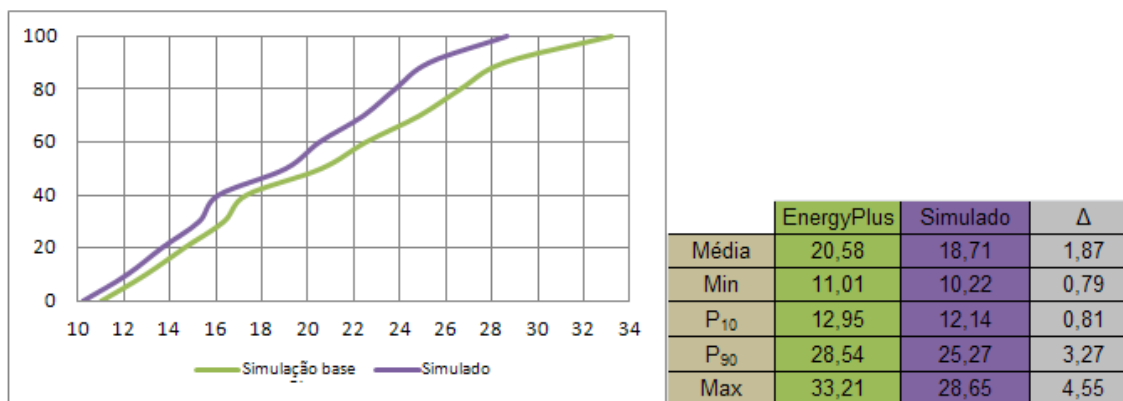


Fig. 79 – Temperatura (°C) no piso 1 por ordem crescente

Embora a variação de temperatura produzida no quarto tenha sido cerca de metade da verificada para as duas zonas térmicas anteriores, foi mais que suficiente para aproximar os resultados para a primeira metade do gráfico.

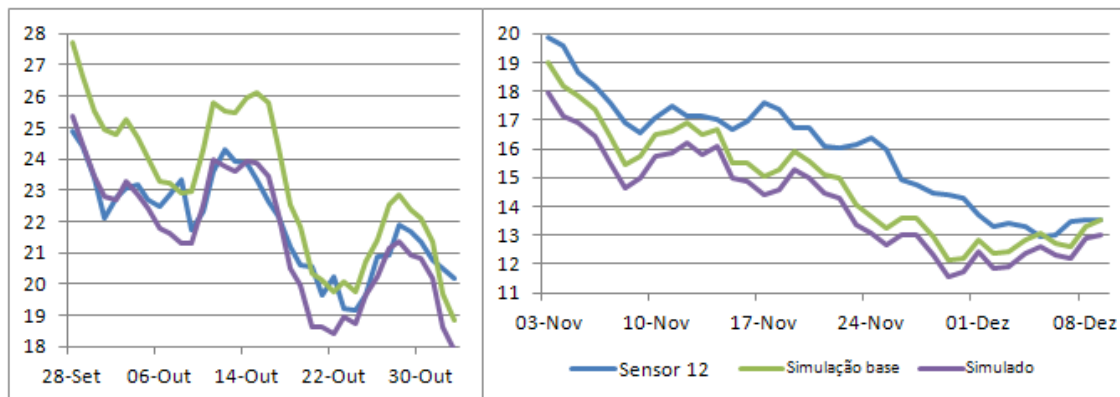


Fig. 80 – Temperatura (°C) no quarto

A maior diferença entre as curvas foi de 2,35 °C no dia 16 de Outubro.

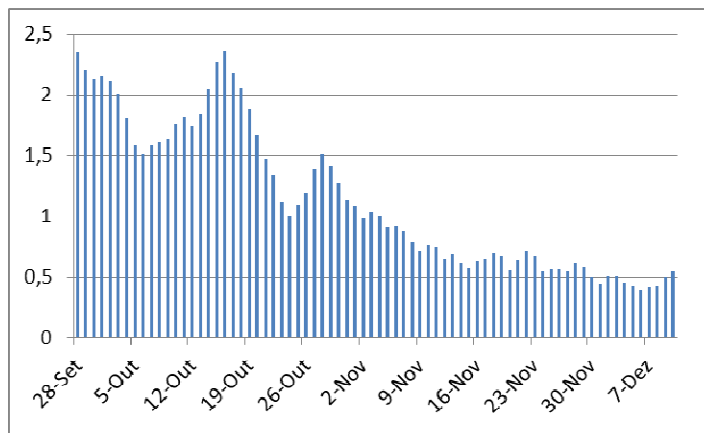


Fig. 81 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)

A diferença média das temperaturas foi de 1,13 °C. A simulação revelou ter maior efeito quanto mais elevada foi a temperatura.

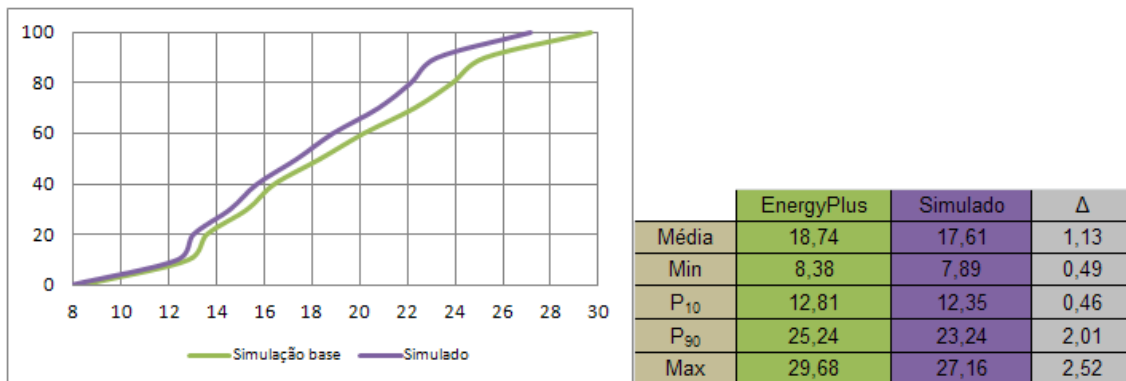


Fig. 82 – Temperatura (°C) no quarto por ordem crescente

4.3.2 $g_{\perp} = 0,5$ NO PISO 0 E $g_{\perp} = 0,75$ NO PISO 1

Os resultados da simulação 4.2.1 revelaram que a redução do factor solar dos envidraçados foi excessiva para as zonas térmicas piso 1 e quarto. De facto, a sujidade era mais evidente nos envidraçados do piso 0. Assim, realizou-se uma nova simulação em que se manteve o valor inicial do factor solar de 0,75 para os envidraçados do primeiro piso e reduziu-se para 0,5 o valor do factor solar dos envidraçados do piso 0.

No piso 0, a redução da temperatura foi ligeiramente inferior à verificada para a simulação anterior. Contudo, a presente simulação consegue uma melhor aproximação para a segunda metade do gráfico, a partir do dia 8 de Novembro.

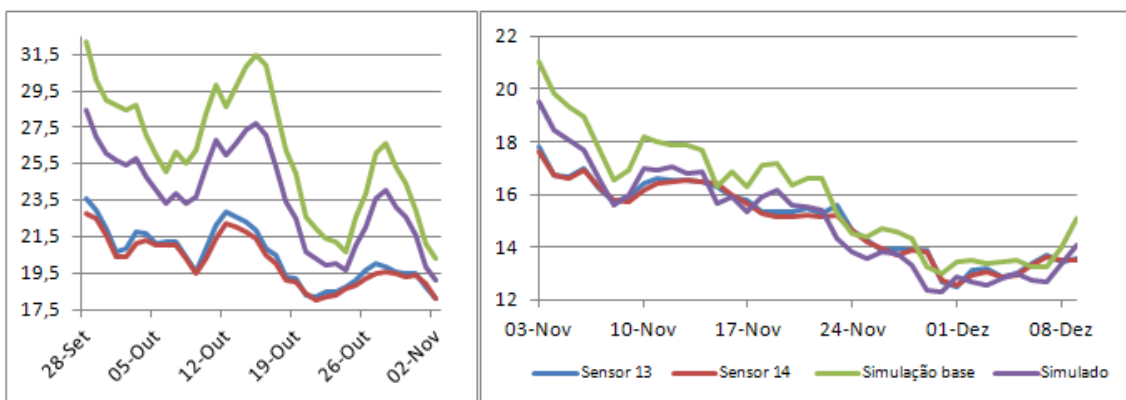


Fig. 83 – Temperatura (°C) no piso 0

Como está ilustrado na fig. 84, esta solução ajusta-se melhor aos valores da temperatura do piso 1, principalmente para os meses de Novembro e Dezembro. Contudo, a partir do dia 15 de Novembro, qualquer redução da temperatura em relação à simulação base, afasta os resultados dos valores registados.

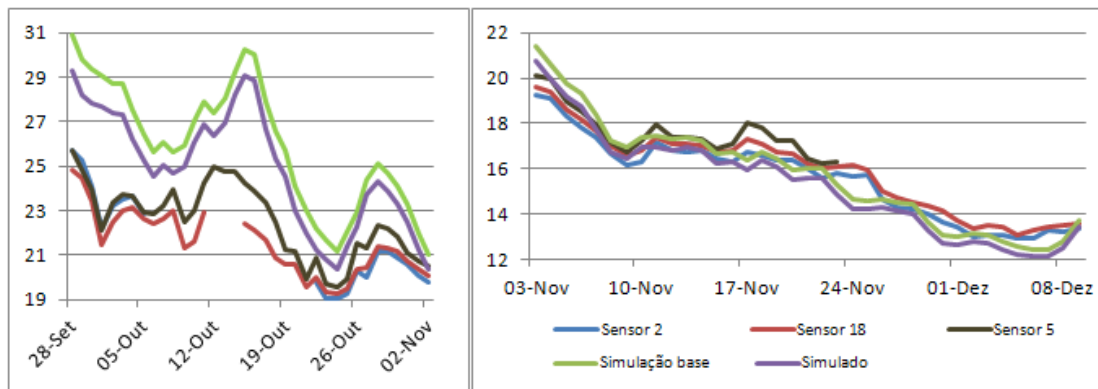


Fig. 84 – Temperatura (°C) no piso 1

As variações de temperatura foram cerca de 50 % mais baixas do que a simulação anterior para esta mesma zona térmica. O valor máximo verificou-se para o dia 28 de Setembro e correspondeu a uma redução da temperatura média diária de 1,6 °C.

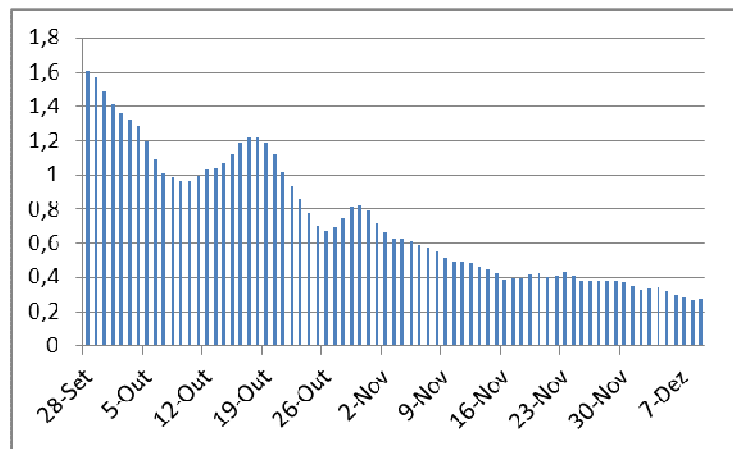


Fig. 85 – Diferença entre o EnergyPlus e o Simulado no piso 1 (°C)

A menor variação que se verificou no quarto permitiu uma melhoria dos resultados. Para a primeira parte, foi possível igualar os valores do sensor 12 em alguns pontos, sem diminuir demasiado a temperatura.

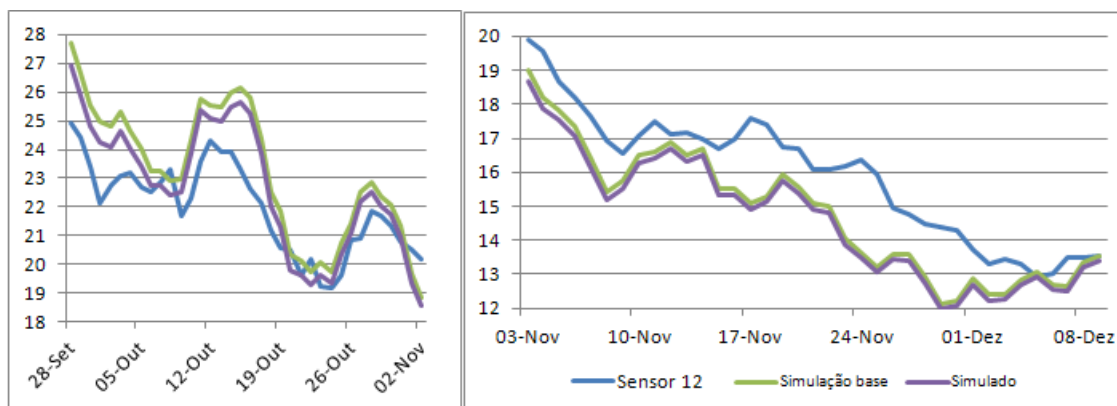


Fig. 86 – Temperatura (°C) no quarto

As variações de temperatura neste caso foram bastante menores quando comparadas com a fig. 86 que exibe os resultados da simulação 4.3.1.

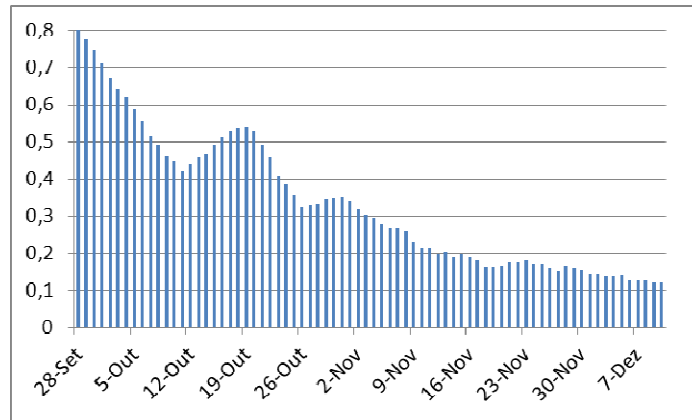


Fig. 87 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado no quarto (°C)

4.3.3 $g_{\perp} = 0,5$ NO PISO 0 E $g_{\perp} = 0,65$ NO PISO 1

Realizou-se uma terceira simulação, na tentativa de encontrar o equilíbrio entre a melhor aproximação da simulação para a primeira parte sem que seja demasiado prejudicial para a segunda metade. Os resultados desta simulação foram muito idênticos aos resultados da simulação 4.3.2.

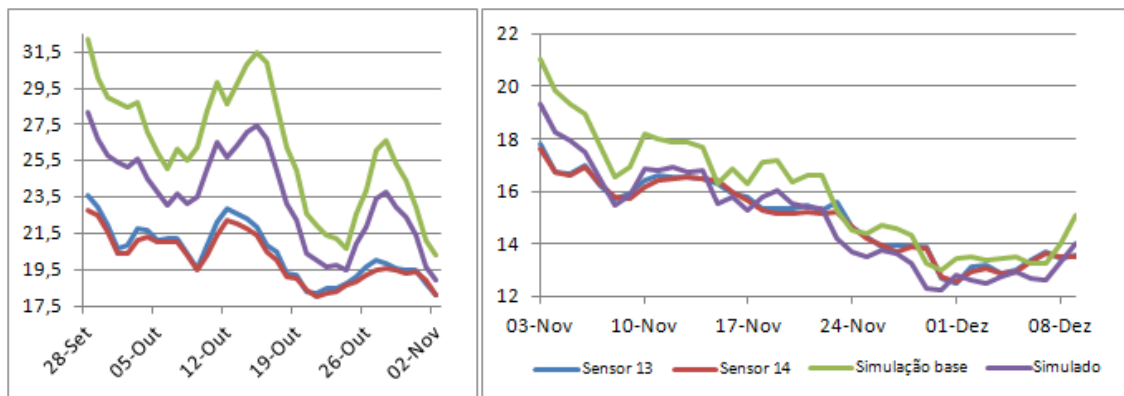


Fig. 88 – Temperatura (°C) no piso 0

A actual simulação revelou ser uma espécie de meio termo entre as duas simulações anteriores.

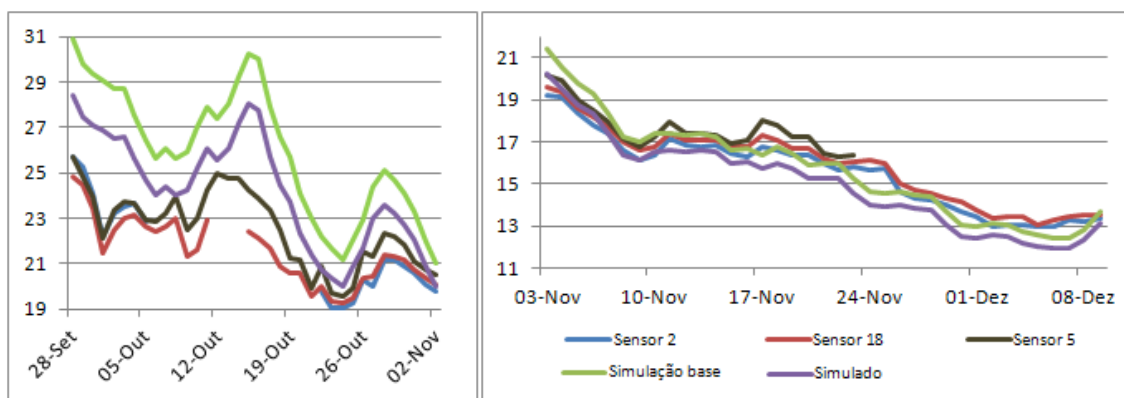


Fig. 89 – Temperatura (°C) no piso 1

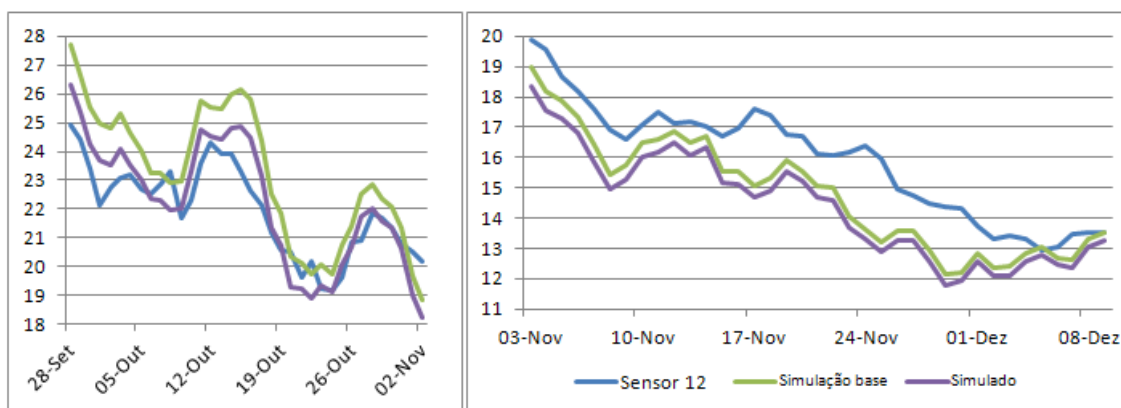


Fig. 90 – Temperatura (°C) no quarto

4.3.4 COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

O quadro 17 sintetiza os resultados das várias alterações ao factor solar dos envidraçados. Como se observa, as três simulações produziram variações bastante significativas de temperatura.

A zona térmica mais afectada nas três simulações foi o piso 0. Também porque foi piso que mais se reduziu o factor solar dos envidraçados, excepção da primeira simulação, em que a redução foi igual para os dois pisos.

Os valores adoptados para o factor solar nas diferentes simulações, tiveram como principal critério, recriar as condições o mais próximas possíveis da altura em que se fizeram as medições. Como os envidraçados do piso 0 apresentavam-se claramente com mais sujidade do que os do primeiro piso, em nenhuma simulação a redução do factor solar do piso 1 foi superior à do piso 0.

Quadro 17 – Resumo das alterações ao factor solar

Factor solar alterado Piso 0	Factor solar alterado Piso 1	Redução Piso 0	Redução Piso 1	Zona térmica mais afectada	Maior diferença [°C]
0,5	0,5	0,25	0,25	Piso 0	4,59
0,5	0,75	0,25	0	Piso 0	3,84
0,5	0,65	0,25	0,10	Piso 0	4,15

4.4 Outras propriedades

4.4.1 RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES

A rugosidade é um parâmetro que influencia o coeficiente de convecção exterior. Foi adoptado que todos os materiais teriam rugosidade 4 (*Rough*), numa escala crescente de 1 a 6.

De forma a perceber a máxima repercussão deste parâmetro nos resultados, efectuaram-se duas simulações extremas. Numa considerou-se o nível mínimo de rugosidade (*Very Smooth*) para todos os materiais opacos, e noutra o nível máximo (*Very Rough*).

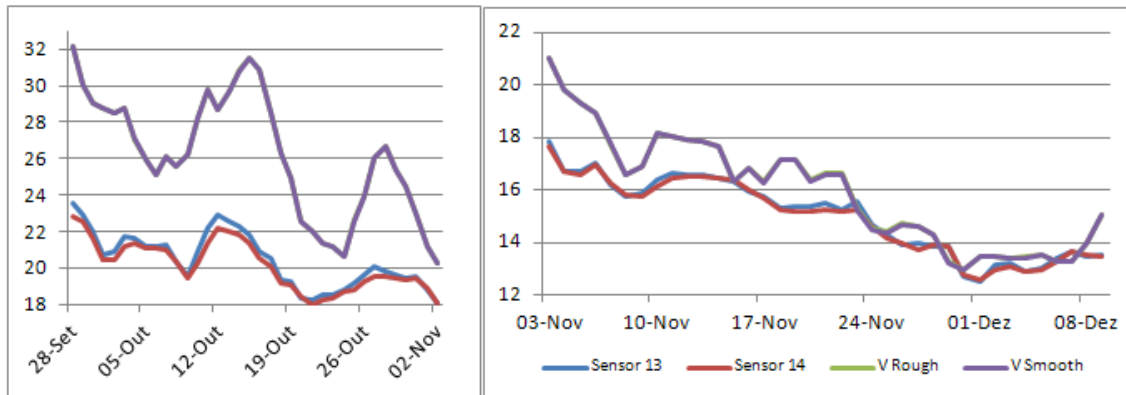


Fig. 91 – Temperatura no piso 0 (°C)

Na fig. 91 constata-se que não se consegue distinguir as duas curvas, porque estas se sobrepõem. Ou seja, quando se selecionou para todos os materiais a rugosidade *Very Rough*, *Rough* e *Very Smooth*, o resultado foi sempre o mesmo.

A fig. 92 mostra que pela primeira vez, a variação entre as curvas é claramente superior nos meses de Novembro e Dezembro. Contudo, constata-se também que as diferenças foram inferiores a 0,04 °C, o que equivale a dizer que a rugosidade dos materiais não teve qualquer influência nos resultados para o edifício em estudo.

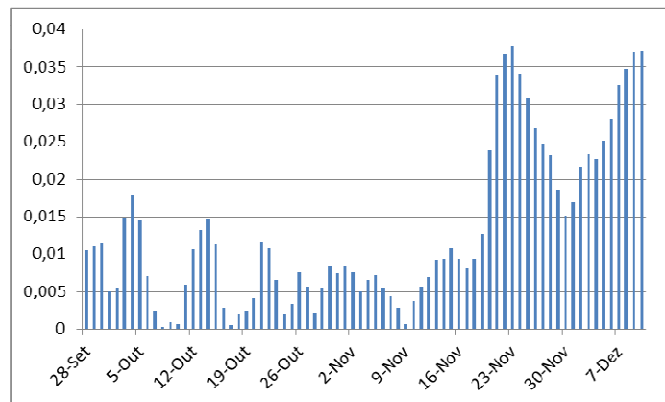


Fig. 92 – Diferença entre Very Rough e Very Smooth (°C) no piso 0

Como as curvas também se sobrepõem completamente para o piso 1, apenas se apresenta a fig. 91, onde constam a distribuição das diferenças entre as curvas. Embora sejam insignificantes por ser uma redução de temperatura quase imperceptível, esta redução apresenta valores muito superiores aos do piso 0.

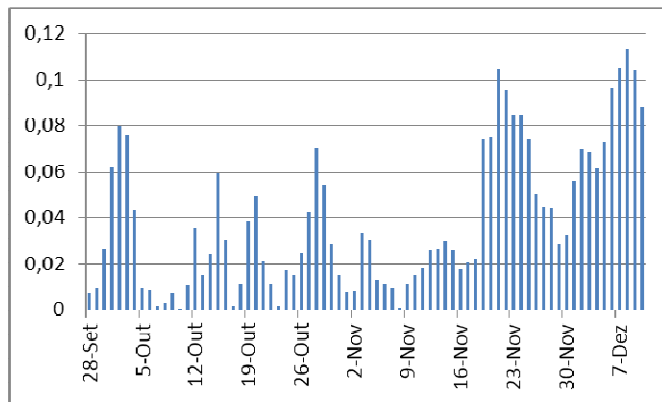


Fig. 93 – Diferença entre Very Rough e Very Smooth (°C) no piso 1

Para o quarto, a distribuição das diferenças tem o mesmo aspecto, e os seus valores encontram-se entre os que se observaram para os pisos 0 e 1.

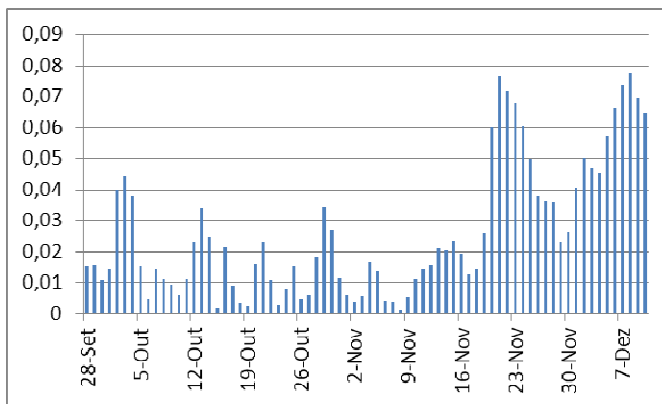


Fig. 94 – Diferença entre Very Rough e Very Smooth (°C) no quarto

4.4.2 CALOR ESPECÍFICO

Sendo o calor específico um parâmetro conhecido e cuja incerteza é reduzida, não seria razoável variá-lo em mais de 25%. Assim, efectuaram-se duas simulações referentes a esta propriedade. Segue-se os resultados para um incremento positivo de 25% no calor específico de todos os materiais.

Para a segunda metade do gráfico, verifica-se um afastamento da simulação face aos valores medidos.

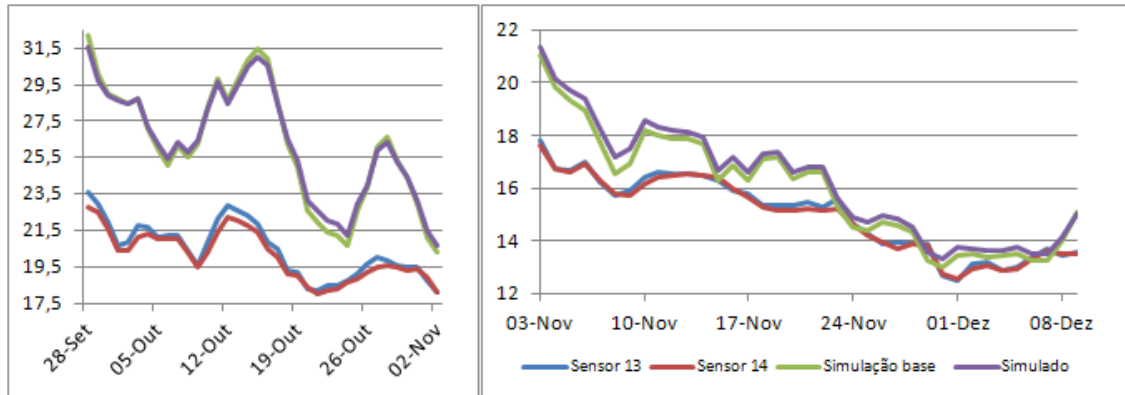


Fig. 95 – Temperatura no piso 0 (°C)

Observa-se que é grande a oscilação da distribuição do diferencial das duas curvas. Contudo, a diferença máxima foi inferior a 0,7 °C.

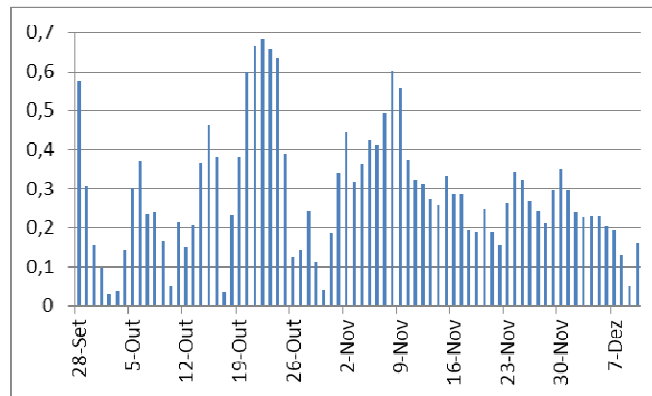


Fig. 96 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no piso 0

Para o piso 1, a simulação regista uma ligeira melhoria para a segunda parte do gráfico. Quanto à primeira houve momentos em que a alteração foi benéfica e outros em que se afastou dos valores medidos.

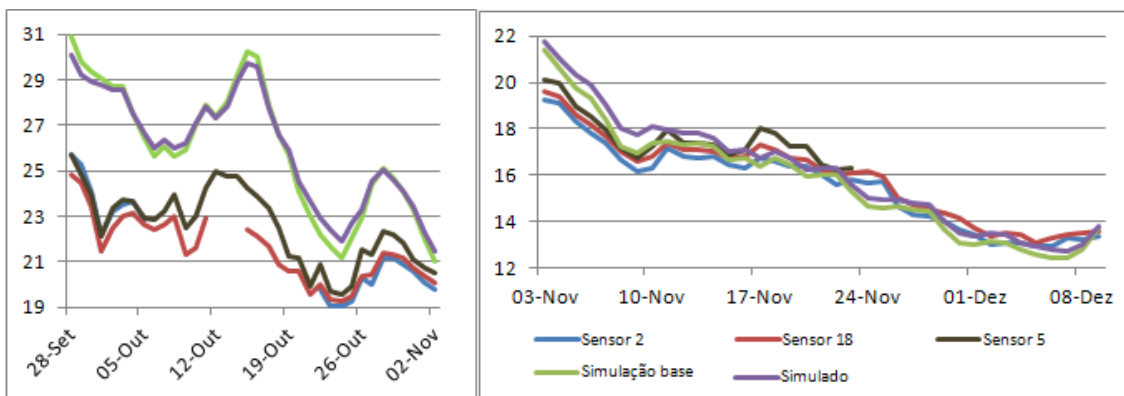


Fig. 97 – Temperatura no piso 1 (°C)

A diferença máxima para o piso 1, foi inferior a 0,8 °C e houve dias em que a temperatura média diária foi quase a mesma para as duas simulações.

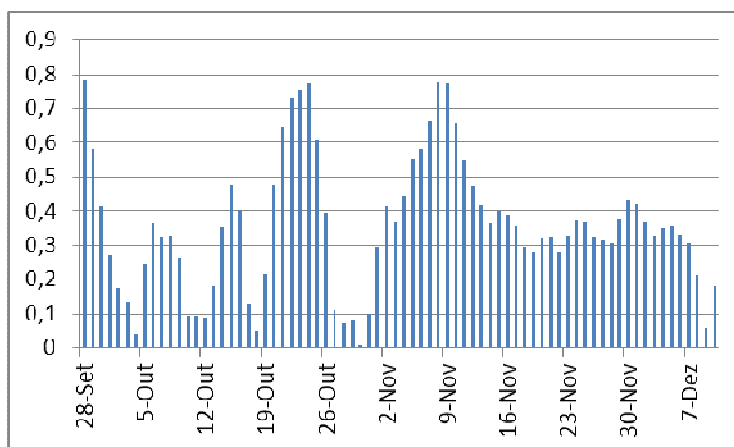


Fig. 98 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no piso 1

No quarto o efeito da simulação manteve o carácter moderado, como demonstram as figuras 99 e 100.

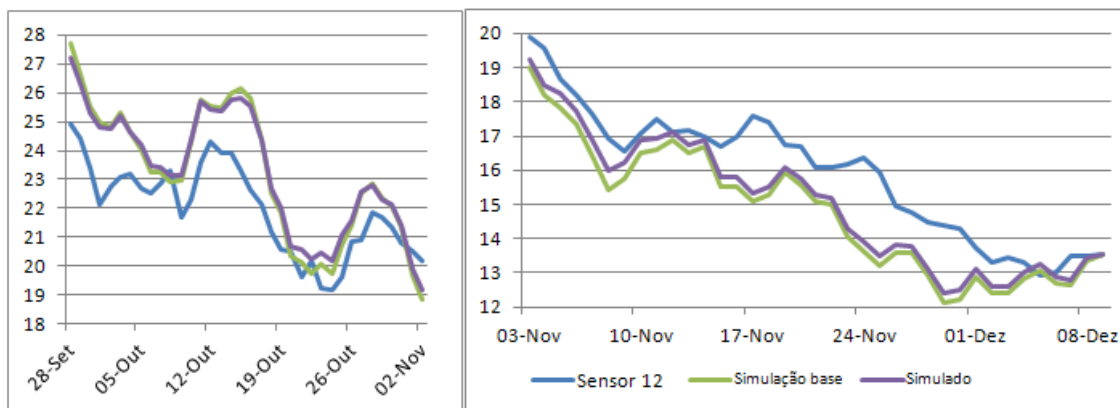


Fig. 99 – Temperatura no quarto (°C)

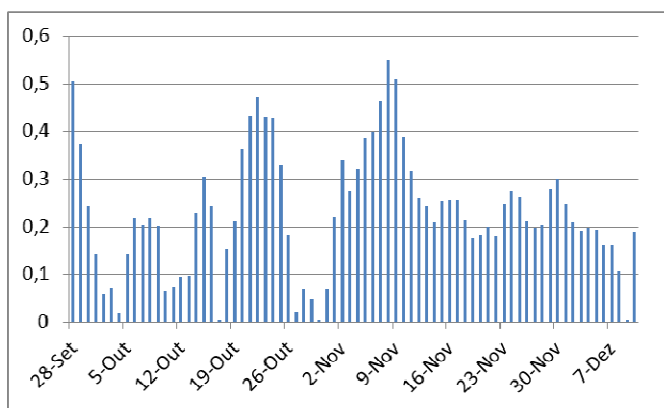


Fig. 100 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no quarto

Observe-se o que acontece quando a simulação é feita no sentido de reduzir este parâmetro em 25% do valor inicial, para todos os materiais.

Os resultados desta simulação são globalmente melhores que os da simulação anterior. Conseguiu-se aproximar um pouco mais os resultados na maioria do período de simulação.

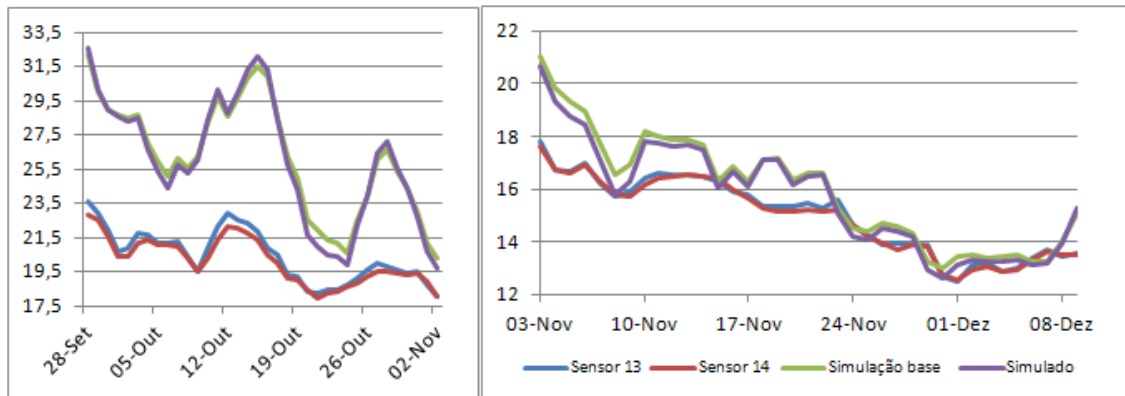


Fig. 101 – Temperatura no piso 0 (°C)

As diferenças entre as curvas foram ligeiramente superiores do que as registadas para a simulação anterior.

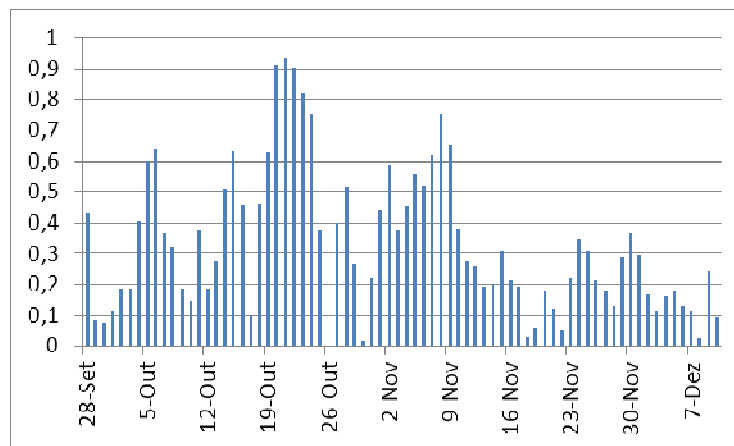


Fig. 102 – Diferença entre o EnergyPlus e o Simulado (°C) no piso 0

Ao nível do piso 1 a melhoria verifica-se apenas para a primeira metade do gráfico.

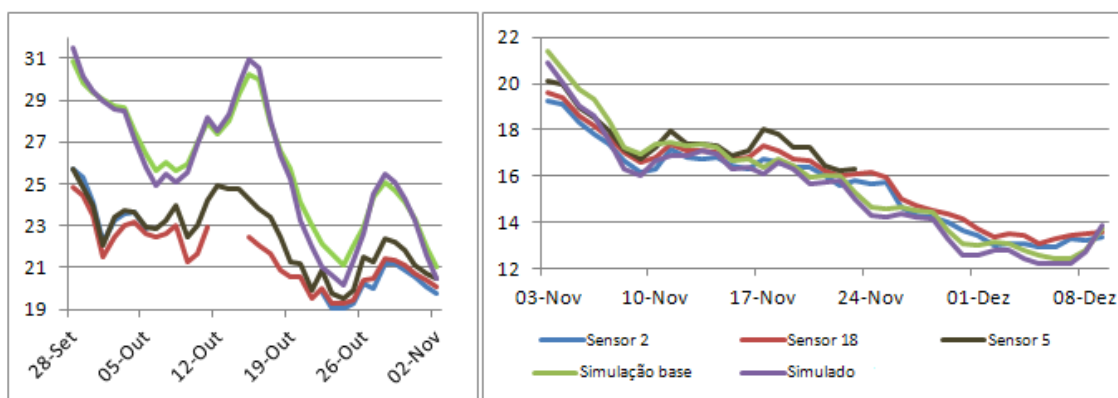


Fig. 103 – Temperatura no piso 1 (°C)

As diferenças máximas nesta zona térmica chegaram a ultrapassar 1°C.

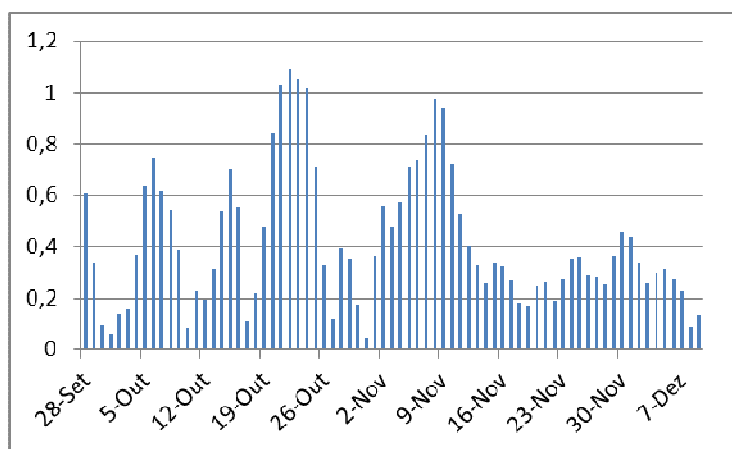


Fig. 104 – Diferença entre a Simulação base e o Simulado (°C) no piso 1

Para o quarto não houve melhoria significativa. A diferença entre as curvas voltou a apresentar muitas flutuações, mas o valor máximo não ultrapassou os 0,7°C.

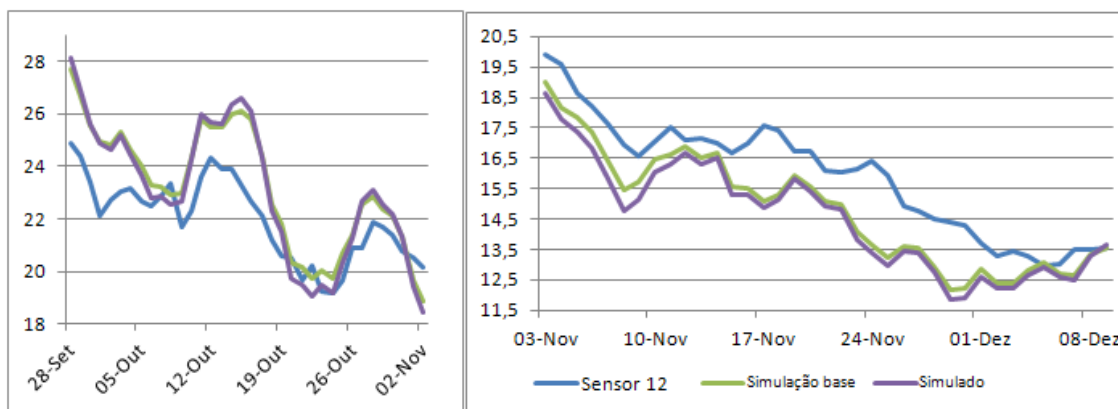


Fig. 105 – Temperatura no quarto (°C)

4.5 Simulação combinada

Este subcapítulo constitui uma tentativa deliberada de aproximar, o mais possível, os resultados simulados aos registos das medições “in situ”, através da melhor combinação de alterações às propriedades dos materiais.

De um modo muito geral, pode dizer-se que para a tal a temperatura no piso 0 teria que descer bastante para primeira metade da simulação e para os meses de Novembro e Dezembro bastaria um decréscimo mais ligeiro. Para o piso 1, também seria necessário uma forte diminuição da temperatura interior para os primeiros dois meses e para os dois últimos a simulação base já se pode considerar próxima das medições mesmo sem nenhuma alteração. Finalmente para o quarto, seria necessário uma diminuição moderada de temperatura para os primeiros dois meses de simulação e um aumento para os últimos.

Perante esta necessidade e segundo o analisado nos subcapítulos 4.2 a 4.4, não haveria forma de aproximar os resultados para todo o período de simulação alterando de um valor constante uma propriedade dos materiais para todo o período de simulação. Como uma alteração desse género produziria uma espécie de translação da curva da simulação base, não seria possível aproximar os resultados para todo o período de simulação, sem que esta alteração fosse variável ao longo do período de simulação.

É intuitivo que as propriedades intrínsecas aos materiais como a resistência térmica do material e a rugosidade das superfícies não poderiam variar significativamente ao longo do período de simulação.

Ainda que pouco, o calor específico dos materiais pode variar com a temperatura. Depois do analisado em 4.4, é perceptível que seria benéfica uma variação de +25% para o quarto. Todavia, seria pouco provável que a diferença de temperatura entre as zonas térmicas fosse tal que implicasse uma variação de 25% entre o valor do calor específico dos materiais nestas zonas. Ainda assim, esta alteração será combinada com uma alteração a nível de factor solar.

O factor solar dos envidraçados é a propriedade que, em termos realísticos e de coerência com as condições no local, poderia ter sofrido maior variação. Estando a moradia em fase de acabamentos durante o período de medições, é perfeitamente aceitável que, ao longo de quase 3 meses, o factor solar dos envidraçados tenha sido alterado, devido a factores como a sujidade. É ainda possível que com as chuvas, o pó nos vidros se tenha diluído ou que estes tivessem sido limpos durante o período de medições, com o aproximar da finalização da obra. Tais factos poderiam justificar que o valor factor solar dos envidraçados variasse de forma não constante.

Como tal, foi considerado uma alteração no valor do calor específico de todos os materiais de +25% para a zona térmica quarto. Considerou-se também, o factor solar de todos os envidraçados como sendo 0,5 para os primeiros dois meses de simulação, o que representa uma redução de 0,25 comparativamente ao factor solar original. Para os meses de Novembro e Dezembro, considerou-se que a sujidade dos envidraçados foi substancialmente reduzida pelo que o valor do factor solar dos envidraçados foi de 0,75.

Como se observa na fig. 106, a simulação combinada consegue uma melhor aproximação dos resultados comparativamente à simulação base. Para a primeira parte do gráfico, os valores de temperatura do simulado continuam a ser superiores aos dos sensores. Para a segunda parte da simulação, os valores encontram-se muito próximos salvo alguns afastamentos pontuais.

Uma redução mais severa do factor solar no piso 0, conduziria certamente a um afastamento de resultados nas restantes zonas térmicas. Estes resultados são por isso a melhor aproximação para o piso 0, sem prejuízo das restantes zonas térmicas.

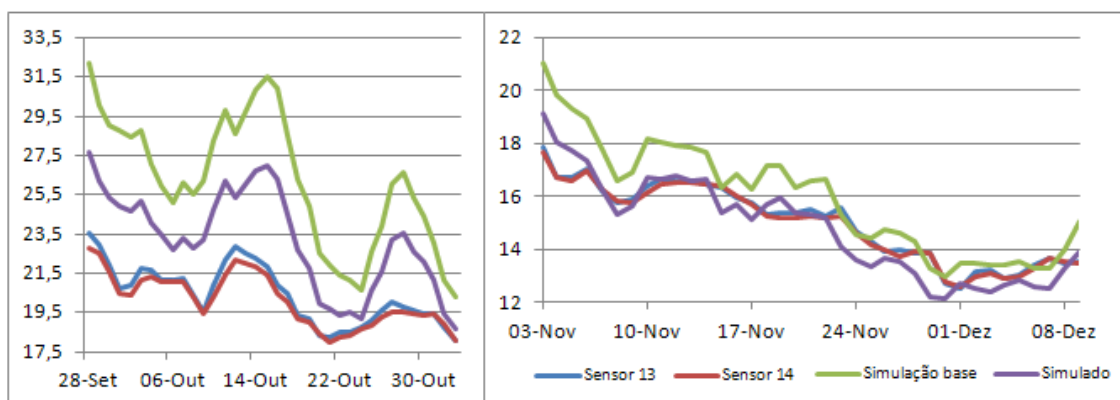


Fig. 106 – Simulação combinada (°C) para o piso 0

A fig. 107 mostra uma visão global da diferença entre os resultados da simulação combinada e a média dos valores das medições. Como se observa, as diferenças são significativamente menores a partir do mês de Novembro.

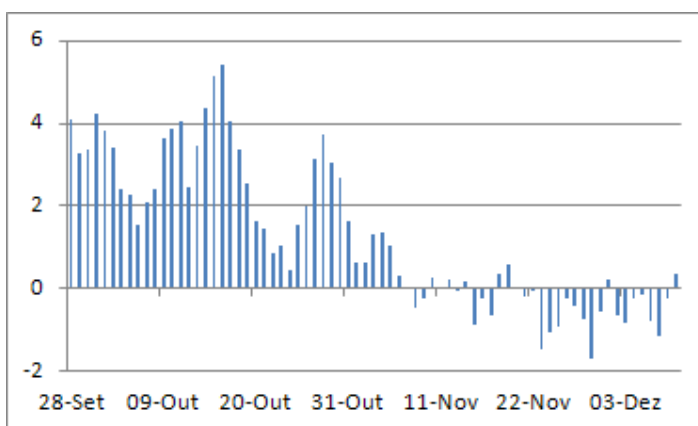


Fig. 107 – Diferença (°C) entre o simulado e a média dos sensores

Para a zona térmica piso 1, os resultados acusaram uma clara descida da temperatura, para os meses de Setembro e Outubro, que resultou numa boa aproximação de resultados. Para a segunda parte do gráfico a simulação base já se encontra muito próximo dos valores medidos pelo que não foi possível aproximar ainda mais os resultados.

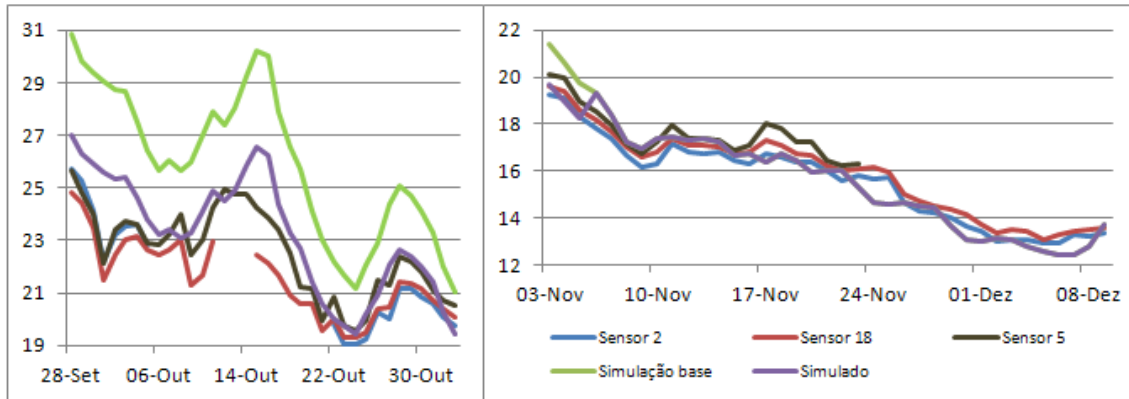


Fig. 108 – Simulação combinada (°C) para o piso 1

As diferenças entre os valores medidos e os da simulação combinada foram similares, à exceção de um pico de afastamento no dia 2 de Outubro, em que a temperatura média diária da simulação foi 3 graus e meio superior à registada para este mesmo dia.

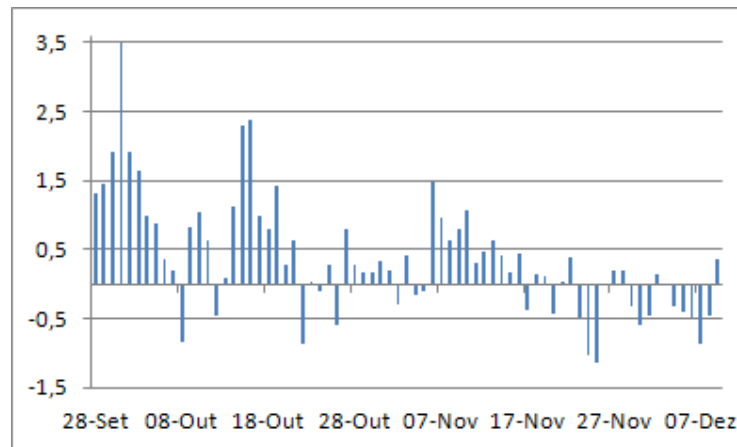


Fig. 109 – Diferença (°C) entre o simulado e a média dos sensores

No quarto e ao contrário das restantes zonas térmicas, a simulação combinada conseguiu aproximar melhor os resultados para a primeira parte do gráfico. Para a segunda metade do gráfico, a influência do aumento em 25% do valor do calor específicos em todos os materiais, ainda que benéfica para a aproximação, revelou pouca alteração.

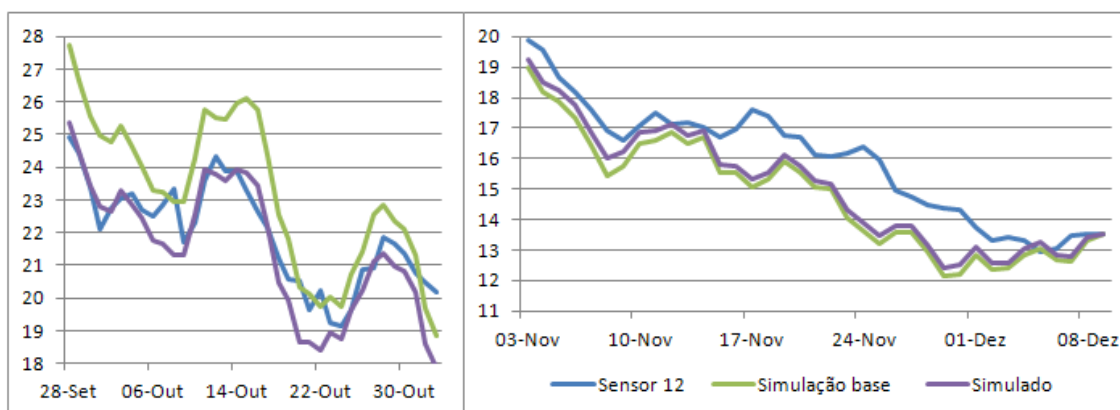


Fig. 110 – Simulação combinada (°C) para o quarto

É nesta zona térmica que a temperatura da simulação foi muitas vezes inferior à registada pelos sensor. A temperatura da simulação combinada em nenhum momento foi superior a 1°C comparativamente à registada, mas por algumas vezes foi inferior a 2°C.

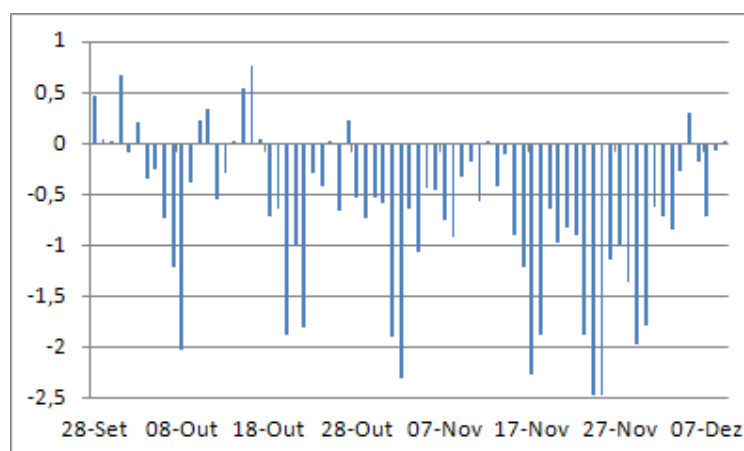


Fig. 111 – Diferença (°C) entre o simulado e o sensor 12

O quadro 18 resume os resultados da simulação combinada.

Quadro 18 – Simulação combinada

Zona térmica	Variação do calor específico	Valor do factor solar	Variação do factor solar	Maior diferença [°C]
Piso 0	-	0,5	0,25	5,43
Piso 1	-	0,5	0,25	3,49
Quarto	+25%	0,5	0,25	-2,47

A análise de sensibilidade às propriedades dos materiais revelou que apenas com a influência destas não é possível uma completa compatibilização de resultados.

5

Conclusões

5.1 Conclusões Principais

Os objectivos parciais estabelecidos no início deste trabalho foram sucessivamente alcançados, pelo que se pode considerar que a análise da influência das propriedades dos materiais na modelação do comportamento higrotérmico de edifícios por comparação com medições “in situ” foi bem sucedida.

A modelação do comportamento térmico com o programa EnergyPlus permitiu sintetizar as seguintes ideias chave:

- A introdução ao manual e a realização dos tutoriais de iniciação foram essenciais para o conhecimento das potencialidades e âmbito de acção do programa, bem como para a sua caracterização.
- O fundamento teórico do programa é extremamente complexo e a sua total compreensão requer conhecimentos multidisciplinares, principalmente nos domínios da térmica, matemática e programação.
- As equações do balanço de calor, dos processos de condução térmica e dos fenómenos de ganhos solares são as leis matemáticas que sustentam os resultados que se obtêm, quando se alteram as propriedades dos materiais.
- A resistência térmica dos materiais (R), intervêm no método de cálculo simplificado das Funções Transferência de Condução que relaciona os fluxos de calor por condução com as temperaturas nas faces interior e exterior do material.
- O factor solar dos vidros ($g_{\perp}$), tem influência na transmissão e reflexão solar do vidro, que por sua vez, influencia as resistências térmicas superficiais interior e exterior do vidro.
- O calor específico dos materiais (C_p), é uma propriedade que se encontra presente nas equações dos processos de condução térmica.
- Os três métodos, distinguidos pela IEA (*International Energy Agency*), para a validação de um programa de simulação térmica são o método analítico, o método empírico e o teste comparativo.
- O BESTEST é o método comparativo usado pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) na ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 como método padrão de testes para a avaliação de programas de análise de simulação energética, nos Estados Unidos.
- O caso 195 do BESTEST é um teste de condução contínua para construções leves, e foi tratado nesta dissertação ser um modelo que atribui ênfase às propriedades dos materiais.

Os resultados do caso 195 do BESTEST revelaram que:

- Os resultados obtidos estiveram muito próximos dos tabelados na literatura. Registaram-se contudo, ligeiras diferenças, mais notórias para o período de arrefecimento
- As diferenças de resultados verificadas para o período de arrefecimento poderão ter origem no ficheiro climático. O ficheiro climático utilizado foi descarregado da base de dados online disponível no sítio do EnergyPlus [18] e não há certeza que este ficheiro corresponda ao ficheiro que foi utilizado pelas equipas de peritos do BESTEST e do EnergyPlus e que se encontra no CD que acompanha a norma ANSI/ASHRAE Standard 140-2007.
- A diferença nos resultados do BESTEST pode também residir no cálculo da temperatura da superfície do solo, que na falta de informação foi mantido o valor predefinido de 18°C, mas que poderia ter sido calculada pela funcionalidade *slab* que confere resultados mais rigorosos.
- Apesar de algumas ligeiras diferenças, os valores obtidos na realização do caso 195 do BESTEST foram suficientemente próximos dos alcançados pelas equipas de peritos do BESTEST e do EnergyPlus, o que significa que a utilização do programa foi correcta.
- A realização do caso 195 do BESTEST não dispensa a leitura da norma ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 para esclarecimento de toda a informação essencial que, eventualmente, poderia explicar as diferenças nos resultados, embora no caso desta dissertação não fosse possível adquiri-la devido ao seu elevado custo.

O estudo de sensibilidade às propriedades dos materiais permitiu a constatar o seguinte:

- As propriedades dos materiais consideradas como tendo maior relevância no estudo foram a resistência térmica dos elementos da envolvente, o factor solar dos envidraçados, o calor específico e a rugosidade das superfícies.
- A redução para metade da resistência térmica global do elemento, teve maior impacto nos resultados quando aplicada à parede Sudoeste ao nível do piso 0. Todas as alterações efectuadas revelaram que a zona térmica mais afectada foi aquela onde se reduziu a resistência térmica global da parede
- A redução da resistência térmica conseguiu baixar mais a temperatura em Setembro e Outubro, onde a influência do sol foi mais notória. A maior redução diária de temperatura alcançada através da redução do valor desta propriedade foi de 3,2 °C.
- O valor de 0,5 para o factor solar dos envidraçados da fachada Sudoeste ao nível do piso 0, permite a obtenção de melhores resultados, em termos de coerência com as medições. Possivelmente, e dado que a moradia se encontrava ainda em fase de acabamentos quando se procedeu às medições, os vidros do piso 0 estariam sujos. Essa sujidade reduziu o factor solar real do envidraçado, que permitiu obter menores ganhos solares.
- O factor solar dos envidraçados possui uma grande capacidade de alterar os resultados da temperatura interior da habitação. Com uma redução de 0,25 tem todos os envidraçados, conseguiu-se uma aproximação de resultados, que em alguns dias se traduziu numa redução de temperatura de 4,5 °C.
- O calor específico dos materiais teve uma influência pouco expressiva nos resultados. Quando se fez variar esta propriedade em 25%, as alterações à temperatura média diária não foram além de 1°C.

- No caso em estudo, a rugosidade das superfícies dos materiais revelou não ter qualquer influência prática nos resultados, uma vez que a diferença obtida nos resultados quando se adoptou a rugosidade mínima e quando se adoptou a máxima foi imperceptível.

Da tentativa de aproximar os resultados simulados no EnergyPlus com os medidos “in situ”, através de uma conjugação de alterações às propriedades dos materiais resultou que:

- Porque as três zonas térmicas têm afastamentos de resultados diferentes, e porque para a mesma zona o afastamento não é o mesmo durante o período de simulação, não é possível melhorar globalmente os resultados para as três zonas térmicas em simultâneo sem impor que a alteração à propriedade actue de forma diferenciada no tempo.
- A simulação combinada que melhor aproximou os resultados, resultou da aplicação de um valor de 0,5 para todos os envidraçados da fachada sudoeste, mas que apenas actuou nos meses de Setembro e Outubro, e um aumento de 25% no valor do calor específico de todos os materiais que constituem a zona térmica quarto, mas que também só se fez actuar nos meses de Novembro e Dezembro.

A explicação para que tal alteração ao factor solar tivesse de facto ocorrido dessa forma, seria possível caso as chuvas dos meses de Novembro e Dezembro tivessem sido capazes reduzir a sujidade dos envidraçados, aumentando novamente o factor solar para o seu valor original de 0,75.

O calor específico pode variar um pouco com a temperatura. Ainda que seja pouco provável que a diferença de temperatura entre as zonas térmicas fosse tal que implicasse uma variação de 25% entre o valor do calor específico dos materiais apenas no quarto, esta hipótese foi considerada na simulação combinada, por produzir um efeito benéfico naquela zona térmica.

- Os resultados da simulação combinada revelaram que para o piso 0, os valores simulados foram superiores aos medidos em mais de 4 °C para os primeiros dois meses de medições no local. Em Novembro e Dezembro, os resultados foram substancialmente mais próximos, com a temperatura simulada a ser inferior à medida em menos de 2°C. Para o piso 1, os resultados foram melhores do que os do piso 0. As médias de temperatura diária da simulação e das medições oscilaram entre si, e o maior afastamento da simulação combinada para esta zona térmica foi de 3,5 °C no dia 2 de Outubro. A zona térmica quarto obteve bons resultados, com a temperatura diária média da simulação a ser muitas vezes inferior à registada pelo sensor naquela fracção da habitação.

Como conclusão final, há a reter que as propriedades dos materiais analisadas neste trabalho, não foram influentes o suficiente para serem capazes de provocar uma completa compatibilização entre os resultados medidos e simulados. Confirmou-se o que já havia sido defendido pela Eng.^a Katia Gomes na sua dissertação [19], que os resultados foram suficientemente próximos que validam a modelação da moradia em estudo com o programa EnergyPlus.

5.2 Desenvolvimentos futuros

A presente dissertação é, ela própria, uma continuação de duas dissertações anteriores. No entanto, após a conclusão deste trabalho, constatou-se que há ainda alguns pormenores que poderão ser futuramente explorados para que consiga atingir melhores resultados. As principais directivas que um trabalho futuro poderia seguir seriam:

- Realizar novas medições na habitação e alargar o período da mesma para um ano. Desta forma, poderia-se obter uma visão mais ampla e completa do desempenho térmico do edifício.
- Recorrer a outro programa para simular o mesmo caso em estudo e comparar com os resultados obtidos anteriormente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ADENE: <http://www.adene.pt/ADENE/Canais/SubPortais/SCE/Apresentacao/Enquadramentoobjectivos/Enquadramento+e+objectivos.htm>. Março 2010.
- [2] University of Illinois., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. *Getting Started with EnergyPlus*. In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 1 a 3, 2009.
- [3] U.S. Department of Energy: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Março 2010.
- [4] University of Illinois., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. *Input/Output Reference*. In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 1946 a 1948, 2009.
- [5] U.S. Department of Energy: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm. Março 2010.
- [6] U.S. Department of Energy: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/reg_form.cfm. Março 2010
- [7] U.S. Department of Energy: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/schedule.cfm>. Março 2010
- [8] University of Illinois., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. *Engineering Reference*. In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp.1 a 823, 2009.
- [9] Crawley, Drury B; Pedersen, Curtis O; Strand, Richard K. *Modularization and Simulation Techniques for Heat Balance based Energy and Load Calculation Programs: The experience of the ASHRAE Toolkit and EnergyPlus*, Seventh International IBPSA Conference, 13 a 15 de Agosto 2001, Rio de Janeiro, pp 43 a 50.
- [10] Pedersen, C.O., D.E. Fisher, R.J. Liesen. 1997. *Development of a Heat Balance Procedure for Calculating Cooling Loads*, ASHRAE Transactions, Vol. 103, Pt. 2, pp. 459 a 468.
- [11] Dongyi Xiao, *Inter-model, Analytical, and Experimental Validation of a Heat Balance based Residential Cooling Load Calculation*. Dissertação de Doutorado, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University, 2006.
- [12] Wisegeek: <http://www.wisegeek.com/what-is-thermal-resistance.htm>. Abril 2010.
- [13] RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 80, 4 de Abril de 2006.
- [14] Wikilingue: http://pt.wikilingue.com/es/Calor_espec%C3%ADfico. Abril 2010.
- [15] JUDKOFF, R.; NEYMARK. *Internacional Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*. pp. 21 a 28, 1995.
- [16] EnergyPlus Development Team, *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007*, 2009.
- [17] ASHRAE: https://eweb.ashrae.org/eweb/DynamicPage.aspx?Site=ASHRAE&WebKey=69c74d61-facd-4ca4-ad83-8063ea2de20a&listwhere=%28prd_etab_ext%20LIKE%20%27%25BPM140%25%27%29. Abril 2010.

[18] EnergyPlus:

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=4_north_and_central_america_wmo_region_4/country=1_usa/cname=USA. Abril 2010.

[19] Gomes, Katia. *Validação da Modelação de um Edifício de Habitação com o Programa EnergyPlus por Comparação com Medições “ In Situ”*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010.

[20] Silva, Patricia. *Aplicação do Programa EnergyPlus como Ferramenta do Projecto Térmico de Edifícios de Habitação*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010.