

APLICAÇÃO DO PROGRAMA ENERGYPLUS COMO FERRAMENTA DO PROJECTO DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

PATRÍCIA MANUELA ALMEIDA SILVA

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

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

MARÇO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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.

À minha Família e ao João,
Pelo Amor e
Apoio em todos os momentos.

*Acredito profundamente na sorte
e acho que quanto mais trabalho mais a tenho.*

Thomas Jefferson

AGRADECIMENTOS

Um ser humano verdadeiramente feliz é aquele que tem a sorte de estar sempre rodeado pelas pessoas certas. Esta tese, embora sendo um trabalho individual, nunca seria possível sem a ajuda de algumas pessoas, a quem eu agradeço profundamente.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Nuno Manuel Monteiro Ramos, por toda a sua atenção e ajuda no desenvolvimento do presente trabalho. A proposta do tema, o auxílio na interpretação do manual do programa em estudo, as respostas imediatas a todas as minhas dúvidas e, ainda, todo o seu apoio na parte escrita são apenas alguns dos aspectos que possibilitaram que esta tese chegasse a bom porto.

Agradeço ao Laboratório de Física das Construções (LFC), da Faculdade de Engenharia e Universidade do Porto (FEUP), pelo empréstimo dos equipamentos de medição utilizados, imprescindíveis à realização do presente trabalho.

À Eng.^a Joana Pinto e ao Eng.^o Albino por todo o apoio nas visitas à obra e pelos esclarecimentos e informações disponibilizados.

A todos os responsáveis e encarregados de obra que me receberam muitíssimo bem, proporcionando, sempre, condições para a recolha das medições e, ainda, esclarecendo as soluções adoptadas em obra.

Aos meus Pais, e pedindo desculpa pelo sentimentalismo, pelo Amor que lhes tenho. São a fonte da minha força e motivação e por isso, Obrigado.

Aos meus irmãos pelo carinho e preocupação.

À Kátia, pela ajuda nas pesquisas, pela companhia nas visitas à obra, pelo apoio na compreensão do programa e, principalmente, pela cooperação nesta jornada.

A todos os meus amigos que me apoiaram em momentos menos bons, dando-me sempre aquela palavra de força e de motivação. Agradeço à Fátima, em especial, pela amizade e pela leitura atenta do texto.

E, finalmente, ao João pela aquela palavra de motivação, que tantas vezes me impulsionou para tentar chegar sempre mais além, pela ajuda na leitura do texto e por me inspirar a lutar por um futuro melhor. És a estabilidade do meu espírito e a profundidade do meu ser.

Obrigado a todos.

RESUMO

Numa era cada vez mais caracterizada pela preocupação com o meio ambiente, a utilização racional dos recursos energéticos, é uma das principais medidas para que se possa garantir um futuro sustentável às gerações vindouras.

Assim, e sabendo que os edifícios de habitação correspondem a uma elevada parcela nos consumos energéticos de uma cidade, surgem as ferramentas de simulação dinâmica do comportamento térmico.

O presente trabalho tem como principal objectivo a avaliação do programa EnergyPlus, como ferramenta do projecto de comportamento térmico de edifícios de habitação.

A primeira fase do presente trabalho resume-se à pesquisa, observação e captação fotográfica da habitação em estudo. Nesta habitação encontram-se instalados sistemas de climatização, para aquecimento e arrefecimento, que possuem a característica de funcionar, conjuntamente, com sondas geotérmicas. Estas sondas geotérmicas recolhem o calor da terra, que ao ser recebido por uma bomba de calor, é transformado em energia.

Como o objectivo é avaliar o EnergyPlus, foi necessário criar-se uma base de comparação que permitisse validar os resultados da simulação. Assim sendo, instalaram-se na habitação sensores de medição “*in situ*” de temperatura e humidade relativa, durante aproximadamente 79 dias.

Para além da comparação dos resultados da simulação com as medições recolhidas pelos sensores, optou-se por fazer uma análise comparativa com os resultados obtidos pelo método de cálculo preconizado pelo RCCTE.

Observou-se que, relativamente aos sensores, o EnergyPlus demonstra diferenças na severidade do clima na estação de aquecimento, o que conduz a diferenças de temperaturas, interiores e exteriores, substanciais.

O resultado da simulação, no que diz respeito às necessidades nominais de energia útil de aquecimento e arrefecimento, quando comparado com os do RCCTE, conclui-se que são de grandezas semelhantes.

O presente trabalho permitiu assim, analisar o funcionamento do EnergyPlus e explorar algumas das suas potencialidades. O resultado desta experimentação, quando comparado com os dos sensores e do RCCTE, permitem concluir, que o EnergyPlus é uma ferramenta de cálculo muito completa e que os seus resultados são credíveis.

PALAVRAS-CHAVE: EnergyPlus, Simulação Dinâmica, Medições “*In situ*”, RCCTE, Climatização.

ABSTRACT

In an era increasingly characterized by concern for the environment, rational use of energy resources is a key measure for which they can ensure a sustainable future for upcoming generations.

Therefore, knowing that the residential buildings represented a major share in energy consumption of a city, tools for dynamic simulation of thermal behaviour arise.

The main objective of the present thesis is the evaluation of the program EnergyPlus as a tool for the project of thermal performance of residential buildings. The first phase of this work comes down to research, observation and photographic capture of the house in study. In this habitation are installed HVAC systems for heating and cooling, which have the feature to work jointly with geothermal probes. These probes collect heat from the soil, which when received by a heat pump, is turned into energy.

Since the objective is to evaluate the EnergyPlus, it was necessary to create a basis for comparison that would validate the simulation results. Therefore, it was installed, in the house, sensors to collect measurements “*in situ*”, such as temperature and relative humidity, for approximately 79 days.

In addition to comparing the simulation results with measurements collected by the sensors, it was decided to do a comparative analysis with the results obtained by the method recommended by RCCTE.

Comparing the results of EnergyPlus with the ones obtained by the sensors, it was observed that they show differences in the severity of climate on the heating season, which leads to substantial, interior and exterior, temperature differences.

The result of simulation, given to the nominal needs of energy for heating and cooling, when compared with the ones obtained by RCCTE, it is possible to conclude that the numbers are in the same range of greatness.

As a main conclusion, this work has allowed to analyze the operation of EnergyPlus and explore some of its potential. The result of this trial, compared to the sensors and RCCTE, support the conclusion that the EnergyPlus is a very complete calculation tool and its results are credible.

KEYWORDS: EnergyPlus, Dynamic Simulation, Measurements “*in situ*”, RCCTE, Acclimatization.

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. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO	3
2.1. IMPLANTAÇÃO DO EDIFÍCIO	3
2.2. ARQUITECTURA	4
2.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	15
2.3.1. COBERTURA	15
2.3.2. PAREDES EXTERIORES	16
2.3.2.1. Rés-do-Chão	16
2.3.2.2. Piso 1	20
2.3.3. PAREDES INTERIORES E TECTOS	21
2.3.4. PAVIMENTOS	22
2.4. VENTILAÇÃO	25
2.5. DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO	26
2.5.1. BOMBA DE CALOR SOLO/ÁGUA, SONDA GEOTÉRMICA E ACUMULADOR DE AQS	26
2.5.2. CIRCUITO DE AQUECIMENTO	32
2.5.2.1. Descrição do dimensionamento do circuito de aquecimento	32
2.5.2.2. Descrição do processo construtivo utilizado	35
2.6. PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA	39
2.6.1. COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA – “U”	39
2.6.2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	39
2.6.2.1. Cobertura	39
2.6.2.2. Paredes do Rés-do-Chão	40
2.6.2.3. Paredes do 1º Andar	41

2.6.2.4. Paredes Interiores	41
2.6.2.5. Pavimentos	42
2.6.2.6. Envidraçados, Caixilharias e Dispositivos de Sombreamento	43

3. ENERGYPLUS – SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

3.1. INTRODUÇÃO AO ENERGYPLUS

3.2. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

3.3. FICHEIRO DE DADOS CLIMÁTICOS (“WEATHER FILE”)

3.4. IDF EDITOR

3.4.1. GRUPO “SIMULATION PARAMETERS”

3.4.1.1. Versão

3.4.1.2. Campo “Simulation Control”

3.4.1.3. Campo “Building”

3.4.1.4. Campo “Timestep”

3.4.2. GRUPO “LOCATION AND CLIMATE”

3.4.2.1. Campo “Run Period”

3.4.3. GRUPO “SCHEDULES”

3.4.3.1. Campo “Schedules: Type Limits”

3.4.3.2. Campo “Schedules: Compact”

3.4.4. GRUPO “SURFACE CONSTRUCTION ELEMENTS”

3.4.4.1. Campo “Material”

3.4.4.2. Campo “Material: No Mass”

3.4.4.3. Campo “Material: Air Gap”

3.4.4.4. Campo “Window Material: Simple Glazing System”

3.4.4.5. Campo “Window Material: Blind”

3.4.4.6. Campo “Construction”

3.4.4.7. Campo “Construction: Internal Source”

3.4.5. GRUPO “THERMAL ZONES AND SURFACES”

3.4.5.1. Campo “Global Geometry Rules”

3.4.5.2. Campo “Zone”

3.4.5.3. Campo “Building Surface: Detailed”

3.4.5.4. Campo “Fenestration Surface: Detailed”

3.4.5.5. Campo “Window Property: Shading Control”

3.4.6. GRUPO “INTERNAL GAINS”	61
3.4.7. GRUPO “ZONE AIRFLOW”	61
3.4.7.1. Campo “Zone Ventilation”	61
3.4.8. GRUPO “ZONE HVAC CONTROLS AND THERMOSTATS”	62
3.4.8.1. Campo “Zone Control: Thermostat”	62
3.4.9. GRUPO “ZONE HVAC RADIATIVE/ CONVECTIVE UNITS”	62
3.4.9.1. Campo “Zone HVAC: Low Temperature Radiant: Constant Flow”	61
3.4.10. GRUPO “NODE BRANCH MANAGEMENT”	62
3.4.11. GRUPO “PUMPS”	63
3.4.11.1. Campo “Pump: Variable Speed”	63
3.4.12. GRUPO “PLANT HEATING AND COOLING EQUIPMENT”	63
3.4.12.1. Campo “Chiller: Electric”	63
3.4.13. GRUPO “PLANT – CONDENSER CONTROL”	64
3.4.14. GRUPO “SETPOINT MANAGERS”	64
3.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	64

4. RCCTE – SIMULAÇÃO ENERGÉTICA	71
4.1. ENQUADRAMENTO	71
4.2. DADOS CLIMÁTICOS	71
4.2.1. ZONA CLIMÁTICA.....	71
4.2.2. GRAUS - DIAS DE AQUECIMENTO	71
4.2.3. DURAÇÃO DA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	72
4.2.4. ENERGIA SOLAR INCIDENTE NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO.....	72
4.2.5. INTENSIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR PARA A ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO	72
4.2.6. TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DO AR PARA A ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO	72
4.3. REQUISITOS ENERGÉTICOS – EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES	72
4.3.1. NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA AQUECIMENTO - Ni	72
4.3.1.1. Factor de Forma (FF)	72
4.3.1.2. Quantificação de Ni	72
4.3.2. NECESSIDADES NOMINAIS ANUAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA ARREFECIMENTO - NV.....	73
4.3.3. LIMITAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ENERGIA PARA PREPARAÇÃO DAS AQS - NA	73
4.3.4. LIMITAÇÃO DAS NECESSIDADES NOMINAIS GLOBAIS DE ENERGIA PRIMÁRIA - NT.....	73
4.4. QUANTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS	73

4.4.1. COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA - U	73
4.4.1.1. Cobertura.....	73
4.4.1.2. Paredes do Rés-do-Chão.....	74
4.4.1.3. Paredes do 1º Andar	75
4.4.1.4. Pavimentos	76
4.4.1.5. Vãos Envidraçados.....	77
4.5. COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR - Ψ	77
4.5.1. ELEMENTOS EM CONTACTO COM O TERRENO	77
4.5.2. PONTES TÉRMICAS LINEARES	78
4.6. COEFICIENTES τ	78
4.7. FACTOR SOLAR	79
4.8. PERDAS POR VENTILAÇÃO	79
4.9. GANHOS SOLARES	79
4.9.1. ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	79
4.9.2. ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO	79
4.10. COLECTORES SOLARES	79
4.11. QUANTIFICAÇÃO DOS REQUISITOS ENERGÉTICOS	79
 5. MEDIÇÕES “IN SITU”	81
5.1. ENQUADRAMENTO	81
5.2. EQUIPAMENTOS	81
5.2.1. PLANEAMENTO	82
5.2.2. CONFIGURAÇÃO	82
5.2.3. COLOCAÇÃO	82
5.2.4. RECOLHA	86
5.2.5. TRATAMENTOS DE DADOS	87
5.3. REGISTOS CLIMÁTICOS DOS SENSORES	87
 6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	93
6.1. ENQUADRAMENTO	93
6.2. ENERGYPLUS VS RCCTE	93
6.2.1. GRAUS - DIAS	93
6.2.2. NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL DE AQUECIMENTO E DE ARREFECIMENTO	94

6.3. ENERGYPLUS VS MEDIÇÕES “IN SITU”	95
6.3.1. GRAUS - DIAS	96
6.3.2. TEMPERATURAS INTERIORES E EXTERIORES	96
6.3.3. HUMIDADES RELATIVAS INTERIORES E EXTERIORES	99
 7. CONCLUSÕES	105
7.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS.....	105
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	109
 BIBLIOGRAFIA	111
ANEXOS	113
A1 – FOLHAS DE CÁLCULO UTILIZANDO O RCCTE.....	

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Localização geográfica do caso em estudo [6].....	3
Fig. 2 – Enquadramento da habitação em estudo	4
Fig. 3 – Habitação H5.....	4
Fig. 4 – Vistas de fachadas da habitação	5
Fig. 5 – Fachada Sudoeste	5
Fig. 6 – Fachada Sudoeste	6
Fig. 7 – Fachada orientada a Sudeste	6
Fig. 8– Acesso ao jardim.....	7
Fig. 9– Fachada Nordeste.....	7
Fig. 10 – Fachada Nordeste.....	8
Fig. 11– Abertura ao nível do rés-do-chão.....	8
Fig. 12– Fachada Noroeste.....	9
Fig. 13 – Cave	10
Fig. 14 – Rés-do-Chão	11
Fig. 15 – 1º Andar.....	12
Fig. 16 – Corredor no 1º piso	12
Fig. 17 – Cobertura	13
Fig. 18 - Clarabóias	14
Fig. 19 – Clarabóias – Pormenor Construtivo	14
Fig. 20 – Constituição da cobertura	15
Fig. 21 – Corte construtivo da parede Noroeste	16
Fig. 22– Revestimento exterior e interior da fachada Noroeste, ao nível do rés-do-chão.....	16
Fig. 23 – Fachada Sudoeste ao nível do rés-do-chão	17
Fig. 24 – Corte Construtivo da fachada Sudeste ao nível do rés-do-chão	17
Fig. 25 – Corte construtivo da fachada Sudeste	18
Fig. 26 – Fachada Nordeste (Exterior e Interior).....	18
Fig. 27– Intercepção entre a fachada Nordeste e a Noroeste	19
Fig. 28 – Envidraçado na sala.....	19
Fig. 29 – Corte construtivo das fachadas do 1º piso.....	20
Fig. 30 – Corte construtivo da fachada Sudeste no 1º piso	20
Fig. 31 – Corte construtivo das paredes interiores	21

Fig. 32 – Parede Interior	21
Fig. 33 – Metodologia de uso dos diferentes pavimentos disponíveis	22
Fig. 34 – Pavimento sobre espaço não aquecido – Pavimento Húmido (VV)	22
Fig. 35 – Pavimento da cozinha	23
Fig. 36 – Pavimento sobre espaço não aquecido – Pavimento seco (VH)	23
Fig. 37 – Pavimento da sala	24
Fig. 38 – Pavimento sobre espaço aquecido – Pavimento seco (VH)	24
Fig. 39 – Pavimento piso 1	25
Fig. 40 – Abertura para grelhas de ventilação	26
Fig. 41 – Esquema de implementação de uma sonda geotérmica [7]	26
Fig. 42 – Bomba de calor	27
Fig. 43 – Termoacumulador de águas quentes sanitárias	28
Fig. 44 – Caixa de colector da sonda	28
Fig. 45 – Saída dos tubos da sonda que ligarão à bomba de calor	29
Fig. 46 – Corte transversal da sonda geotérmica	29
Fig. 47 – Esquema da transmissão de calor ate à bomba	30
Fig. 48 – Esquema de funcionamento da bomba de calor [11]	31
Fig. 49 – Colector do pavimento radiante	32
Fig. 50 – Disposição do pavimento radiante no Rés-do-Chão	35
Fig. 51 – Disposição do pavimento radiante do piso 1	36
Fig. 52 – Colocação do ripado para o pavimento seco	36
Fig. 53 – Colocação da tubagem em pavimento seco	37
Fig. 54 – Colocação das placas de alumínio no pavimento seco	37
Fig. 55 – Collectores do pavimento radiante	38
Fig. 56 – Pavimento da cozinha – Pavimento húmido	38
Fig. 57 – Interface de lançamento do programa	46
Fig. 58 – Campo “Simulation Control”	47
Fig. 59 – Campo “Building”	48
Fig. 60 – Campo “Run Period”	49
Fig. 61 – Campo “Schedules: Type Limits”	50
Fig. 62 – Campo “Schedules: Compact”	51
Fig. 63 – Campo “Material”	52
Fig. 64 – Campo “Material: No Mass”	53

Fig. 65 – Campo “Window Material: Simple Glazing System”	54
Fig. 66 – Campo “Construction”	55
Fig. 67 – Campo “Construction” – Envidraçados	55
Fig. 68 – Campo “Construction: Internal Source”	56
Fig. 69 – Comportamento térmico do sistema radiante implementado [7]	57
Fig. 70 – Sistema de coordenadas usado pelo EnergyPlus [22]	57
Fig. 71 – Campo “Building Surface: Detailed”	59
Fig. 72 – Campo “Fenestration Surface: Detailed”	60
Fig. 73 – Campo “Fenestration Surface: Detailed” – Envidraçados Piso 1	61
Fig. 74 – Campo “Pump: Variable Speed”	63
Fig. 75 – Grupo “Setpoint Manager: Scheduled”	64
Fig. 76 – Orientação Sudoeste (CAD)	65
Fig. 77 – Orientação Nordeste (CAD)	65
Fig. 78 – Orientação Noroeste (CAD)	66
Fig. 79 – Orientação Sudeste (CAD)	66
Fig. 80 - Temperaturas do ar interior com o sistema de climatização ligado	67
Fig. 81 – Temperaturas do ar interior com o sistema de climatização desligado	68
Fig. 82 - Funcionamento do sistema com Setpoints [28]	68
Fig. 83 – Sensor HOBO em uso no estudo (HOBO, 2008)	81
Fig. 84 – Sensor colocado no corredor do Piso 1	83
Fig. 85 – Sensor instalado no exterior	83
Fig. 86 – Posicionamento de sensores no Rés-do-Chão	84
Fig. 87 – Posicionamento de sensores no Piso 1	85
Fig. 88 – Recolha de dados no sensor que se encontrava na exterior	86
Fig. 89 – Registos do sensor 12 para o período de tempo de 2/11/09 até 23/11/09	87
Fig. 90 – Temperaturas Interiores na zona Piso 1	88
Fig. 91 – Humidade Relativa interior na zona Piso 1	88
Fig. 92 – Temperatura Interior na zona Quarto 5	89
Fig. 93 – Temperatura Interior na zona Piso 0	89
Fig. 94 – Temperatura Exterior	90
Fig. 95 – Humidade Relativa Exterior	90
Fig. 96 – Diferenças de temperatura, interior e exterior, registadas pelos sensores	95
Fig. 97 – Diferenças de temperaturas, interior e exterior, para o sistema passivo	96

Fig. 98 – Diferença de temperatura interior e exterior.....	97
Fig. 99 – Influência da radiação solar.....	97
Fig. 100 – Frequências acumuladas das diferenças de temperaturas interiores e exteriores.....	98
Fig. 101 – Humidades Relativas Interiores.....	99
Fig. 102 – Humidades Relativas Exteriores	99
Fig. 103 – Pressão de Vapor Interior.....	100
Fig. 104 – Pressão de Vapor Exterior	101
Fig. 105 – Diferença de pressões de vapor.....	101

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 1 – Área dos compartimentos da cave.....	10
Quadro 2 – Área dos compartimentos do Rés-do-Chão.....	11
Quadro 3 – Área dos compartimentos do 1º andar.....	13
Quadro 4 – Áreas das clarabóias.....	15
Quadro 5 – Legenda da Fig. 34	23
Quadro 6 – Legenda da Fig. 36	24
Quadro 7 – Legenda da Fig. 38	25
Quadro 8 – Legenda da Fig. 48	31
Quadro 9 – Dados do programa do pavimento para o 1º andar.....	33
Quadro 10 – Dados do programa do pavimento para o Rés-do-Chão	34
Quadro 11 – Resultados finais do dimensionamento do pavimento radiante	35
Quadro 12 – Características dos materiais constituintes da cobertura	39
Quadro 13 – Características dos materiais constituintes da parede Noroeste do rés-do-chão	40
Quadro 14 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do rés-do-chão.....	40
Quadro 15 – Características dos materiais constituintes da parede Nordeste do rés-do-chão	40
Quadro 16 – Características dos materiais constituintes das paredes Noroeste, Sudoeste e Nordeste do 1º Andar.....	41
Quadro 17 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do 1º Andar	41
Quadro 18 – Características dos materiais constituintes das paredes interiores.....	41
Quadro 19 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 0 ...	42
Quadro 20 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo húmido (VV).....	42
Quadro 21 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 1 ...	43
Quadro 22 – Vértices da parede Sudeste do Piso 0.....	58
Quadro 23 – Vértices da clarabóia 1	59
Quadro 24 – Intensidade da radiação solar para a estação de arrefecimento.....	72
Quadro 25 – Características dos materiais constituintes da cobertura	73
Quadro 26 – Características dos materiais constituintes da parede Noroeste do rés-do-chão	74
Quadro 27 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do rés-do-chão.....	74
Quadro 28 – Características dos materiais constituintes da parede Nordeste do rés-do-chão	75
Quadro 29 – Características dos materiais constituintes das paredes Noroeste, Sudoeste e Nordeste do 1º Andar.....	75
Quadro 30 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do 1º Andar	76

Quadro 31 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 0...	76
Quadro 32 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 1...	77
Quadro 33 – Envidraçados	77
Quadro 34 – Parede em contacto com o terreno	78
Quadro 35 – Coeficientes de transmissão térmica linear para pontes térmicas lineares	78
Quadro 36 – Coeficiente τ	78
Quadro 37 – Requisitos Energéticos	80
Quadro 38 – Valores de referência das necessidades nominais de aquecimento, arrefecimento, e preparação de AQS da habitação em estudo	80
Quadro 39 – Legenda dos sensores	86
Quadro 40 – Número de Graus – Dias obtidos	92
Quadro 41 – Quantidades de energia anuais	93
Quadro 42 – Necessidades Nominais de Energia Útil de Aquecimento (Nic)	93
Quadro 43 – Necessidades Nominais de Energia Útil de Arrefecimento (Nvc)	94
Quadro 44 – Número de Graus – Dias Obtidos	95

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CO₂ – Dióxido de Carbono

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

LFC – Laboratório de Física das Construções

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

T5 – Habitação com 5 quartos de dormir

R/ch – Rés-do-Chão

WC – Quarto de Banho

VV – Pavimento Radiante do Tipo Húmido, Não Reforçado

VH – Pavimento Radiante do Tipo Seco

AQS – Águas Quentes Sanitárias

COP – Coeficiente de Performance

PEad – Polietileno de Alta Densidade

TA - Termoacumulador

BC – Bomba de Calor

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

DWG – Drawing

Ti – Temperatura Interior do Ambiente (°C)

To - Temperatura do Pavimento (°C)

ΔT – Diferença de Temperatura (°C)

λ – Condutibilidade Térmica [W/m.K]

R – Resistência Térmica [m².K/W]

Cp – Calor Específico [J/kg.K]

e – Espessura [m]

ρ – Densidade [kg/m³]

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

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

TMY – Typical Meteorological Year

IDF – Ficheiro de Inputs do programa EnergyPlus

EPW – Ficheiro climático utilizado pelo EnergyPlus

EPS – Poliestireno Expandido Moldado

XPS – Poliestireno Expandido Extrudido

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar – Condicionado

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

CAD – Computer - Aided Design

GD – Graus – Dias de Aquecimento ($^{\circ}\text{C}.\text{dias}$)

N_{i_c} – Necessidades Nominais Anuais de Energia Útil para Aquecimento [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{ano})$].

N_{v_c} – Necessidades Nominais Anuais de Energia Útil para Arrefecimento [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{ano})$].

N_{a_c} – Necessidades Nominais de Energia Útil para Produção das AQS [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{ano})$].

N_{t_c} – Necessidades Nominais Globais de Energia Primária ($\text{kgep}/\text{m}^2.\text{ano}$)

FF – Factor de Forma

I_r – Intensidade da Radiação Solar [kWh/m^2]

R_{se} – Resistência Térmica Superficial Exterior ($\text{m}^2.\text{^{\circ}C}/\text{W}$)

R_{si} – Resistência Térmica Superficial Interior ($\text{m}^2.\text{^{\circ}C}/\text{W}$)

Ψ – Coeficiente de Transmissão Térmica Linear

A_i – Área do Elemento que Separa o Espaço Útil Interior do Espaço Não Útil

A_u – Área do Elemento que Separa o Espaço não Útil do Ambiente Exterior

RPH – Taxa de Renovação Horária [h^{-1}]

HR – Humidade Relativa [%]

T – Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

C_i – Quantidade Anual de Energia de Aquecimento (kWh)

C_v – Quantidade Anual de Energia de Arrefecimento (kWh)

P – Pressão de Vapor de Água (Pa)

P_s – Pressão de Saturação (Pa)

BES test – Building Energy Simulation test

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

DEC - Departamento de Engenharia Civil

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

No Porto, estão associados 58% dos usos de energia primária aos edifícios de habitação, sendo estes responsáveis pela maior fatia de emissões de CO₂ (55%) na cidade [1].

Questões deste tipo, relacionadas com ideais de sustentabilidade ambiental, aumentam a preocupação com a redução de consumo de energia.

O RCCTE [2] pretende assegurar que as exigências de conforto térmico, sejam elas de aquecimento ou de arrefecimento, de ventilação ou de necessidades de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem gastos excessivos de energia.

O impacto ambiental de uma edificação pode ser minimizado desde que exista projecto térmico, onde é elaborado um estudo sobre o futuro comportamento térmico da habitação, e de onde se obtêm conclusões que possibilitam garantir as condições de conforto pretendidas, com reduzidos gastos energéticos.

A preocupação com a optimização energética, tem levado ao aparecimento crescente de ferramentas de simulação do comportamento térmico de edifícios. Este tipo de ferramenta de simulação dinâmica permite prever temperaturas interiores (ar e superfícies), cargas térmicas, consumos de energia, níveis de iluminação, caudais de infiltração e ventilação natural, etc. Estas previsões, normalmente efectuadas para um ano típico de clima local, revelam-se muitas vezes fundamentais nas decisões de projecto, particularmente na fase inicial do trabalho.

É no âmbito da sustentabilidade energética que aparece o EnergyPlus.

O EnergyPlus é um programa de simulação térmica e energética de edificações, que possibilita desenvolver estudos no sentido da melhoria da eficiência energética de uma habitação existente, ou ainda, em fase de projecto. Este foi já, por diversas vezes, alvo de estudo e base de trabalho de muitas investigações desenvolvidas [3 a 5].

O presente trabalho, consiste no estudo do comportamento térmico de uma habitação unifamiliar existente, avaliando os consumos energéticos inerentes. Nesta habitação encontram-se instalados sistemas de climatização recentes, nomeadamente, sistemas de captação de energia geotérmica.

Para a validação da simulação energética do edifício em causa, obtida através do EnergyPlus, foram realizadas medições “*in situ*” e aplicado o modelo de cálculo do RCCTE. Assim, o objectivo é obterem-se no final dados fiáveis que caracterizem, devidamente, o comportamento térmico da habitação em estudo.

1.2. OBJECTIVOS

A presente dissertação tem como principal objectivo, a avaliação do programa EnergyPlus como ferramenta do projecto de comportamento térmico de edifícios de habitação. Para tal, elaborar-se-á o estudo do comportamento térmico e energético de uma habitação, em fase de conclusão, recorrendo à ferramenta de simulação referida.

Ainda no sentido de alcançar, de forma clara e objectiva, resultados credíveis, definiu-se o seguinte conjunto de propósitos parciais:

- Análise da constituição da habitação, alvo do estudo;
- Compilação de informação técnica e fotográfica das soluções implementadas no edifício;
- Realização de medições “*in situ*”, através de equipamentos fornecidos pelo LFC - FEUP;
- Análise e estudo dos sistemas de climatização presentes na habitação;
- Modelação do edifício utilizando o programa EnergyPlus;
- Análise da eficiência energética através do cumprimento do RCCTE;
- Comparação dos resultados obtidos através das medições “*in situ*” com os do EnergyPlus;
- Comparação dos resultados das necessidades nominais de energia útil de aquecimento e arrefecimento do RCCTE, com as obtidas pelo EnergyPlus.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação divide-se em 7 capítulos:

- No Capítulo 1 apresentam-se os objectivos da dissertação e o resumo do que consta em cada capítulo que a constitui;
- No Capítulo 2 é descrita, tecnologicamente, a habitação em estudo, onde são indicadas informações que vão desde a sua localização, tipologia e constituição, até aos sistemas de climatização integrados. São ainda indicados os parâmetros de caracterização energética dos vários materiais presentes nos elementos do edifício;
- No Capítulo 3 é descrita a simulação energética da habitação, através do EnergyPlus, referenciando o ficheiro climático em uso, os dados introduzidos, as opções tomadas e os resultados obtidos. Esta simulação energética corresponde ao estado activo da habitação, ou seja, corresponde ao comportamento térmico do edifício com os equipamentos de climatização ligados;
- O Capítulo 4 consiste na aplicação do modelo de cálculo do RCCTE à habitação em estudo. São calculadas as necessidades nominais de energia útil de aquecimento e arrefecimento, que possibilitarão analisar os resultados da simulação com o EnergyPlus;
- No Capítulo 5 descreve-se os equipamentos utilizados nas medições “*in situ*”. Estes equipamentos registaram, durante, aproximadamente, 79 dias, valores de temperaturas e humidades relativas no interior e exterior da habitação em estudo. No final do presente capítulo, as medições obtidas são apresentadas e devidamente analisadas, para, também, serem confrontadas com os resultados da simulação do EnergyPlus;
- No Capítulo 6 apresenta-se a discussão de todos os resultados e tiram-se as várias conclusões possíveis, comparando-os e analisando-os sob uma mesma perspectiva;
- No Capítulo 7 resumem-se as principais conclusões da presente dissertação e indicam-se alguns desenvolvimentos futuros.

2

DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

2.1. IMPLANTAÇÃO DO EDIFÍCIO

A moradia em estudo situa-se próximo da Avenida da Boavista, no concelho do Porto.



Fig. 1 – Localização geográfica do caso em estudo [6]

A habitação faz parte de um conjunto de doze habitações, de diferentes tipologias, sendo esta, por sua vez, uma T5 com 3 pisos, cave, r/ch e 1º andar, e jardim privativo. Para seu reconhecimento, esta será identificada como H5.

O acesso ao edifício é feito pela frente através da rua principal.

Na figura seguinte pode observar-se a posição da habitação em estudo, relativamente às restantes 12 que fazem parte do empreendimento.

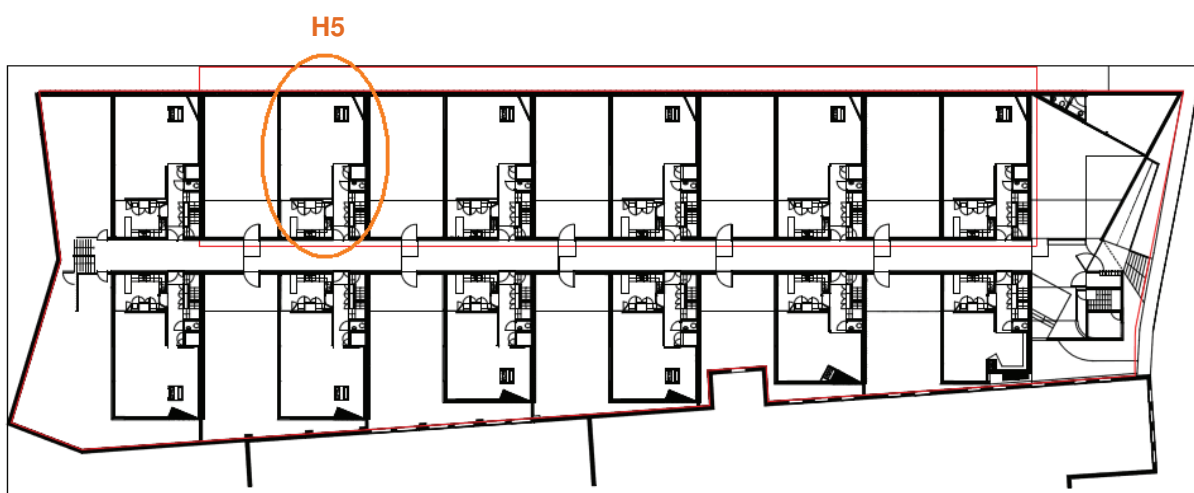


Fig. 2 – Enquadramento da habitação em estudo

2.2. ARQUITECTURA

A tipologia em questão é apresentada na figura seguinte.

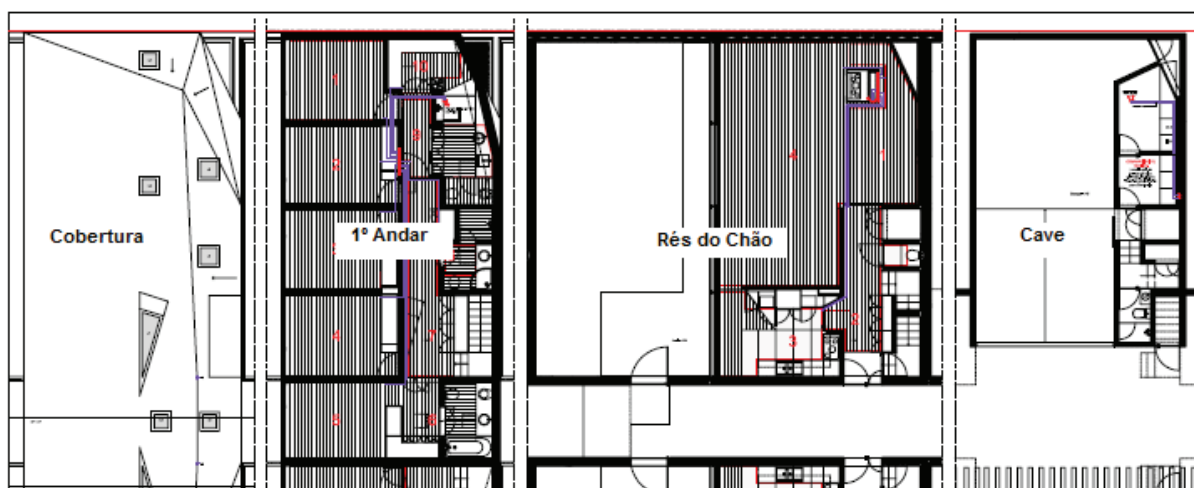


Fig. 3 – Habitação H5

O estudo assenta nas características dos elementos construtivos e no comportamento e funcionalidades dos sistemas de climatização, tendo por base dados climáticos da zona onde o edifício se encontra inserido.

Trata-se, então, de uma habitação do tipo T5 com três pisos. Na cave tem-se a garagem, a lavandaria, um compartimento técnico e um WC. No rés-do-chão encontra-se a cozinha, uma sala, um quarto de arrumos (tipo dispensa) e um quarto de banho de serviço. No 1º piso estão os cinco quartos, três WC e um quarto de vestir.

A fachada principal do edifício está orientada a Sudeste, a posterior a Noroeste e as laterais a Sudoeste e Nordeste, respectivamente.

Para melhor visualização e percepção da habitação serão apresentadas algumas fotos tiradas no decorrer das visitas à obra.



Fig. 4 – Vistas de fachadas da habitação

Na Fig. 4, a fachada que alberga maior área de envidraçados (à direita) trata-se, da fachada orientada a Sudoeste.

Os vidros da habitação são todos eles duplos excepto os das clarabóias. Quanto aos elementos de sombreamento, trata-se de estores exteriores laminados em madeira, ao nível do 1º piso. No rés-do-chão não existe nenhum tipo de elemento de sombreamento. Na figura seguinte pode observar-se o alçado da fachada, orientada a Sudoeste, que dá acesso ao jardim privativo da habitação.

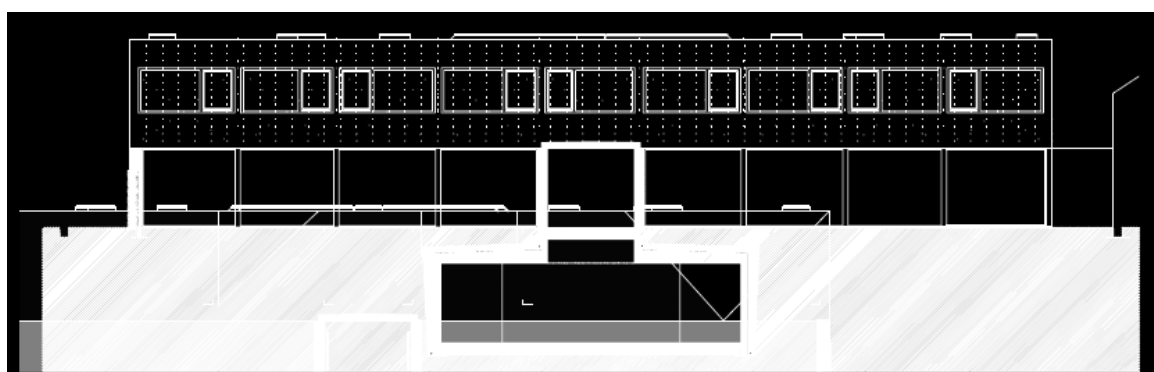


Fig. 5 – Fachada Sudoeste

Na Fig. 6, pode constatar-se, mais uma vez, que não existem elementos de sombreamento ao nível do rés-do-chão. Este pormenor será abordado na análise de resultados das temperaturas interiores da habitação, uma vez que uma área tão elevada de envidraçados, orientados a Sudoeste, é natural que conduza ganhos solares significativos.



Fig. 6 – Fachada Sudoeste

O acesso à habitação é feito por um corredor comum a todas as habitações, possibilitando, também, o acesso aos vários jardins privados das respectivas moradias.



Fig. 7 – Fachada orientada a Sudeste

Nas entradas de cada jardim existem umas aberturas cujo intuito é aumentarem a entrada de luz natural no corredor. Veja-se a seguinte figura.



Fig. 8– Acesso ao jardim

A fachada Nordeste é a fachada que se pode observar do jardim vizinho.



Fig. 9– Fachada Nordeste

É possível constatar que nesta fachada não existem envidraçados e, ainda, observar as formas no edifício, que ocorrem desde do nível do 1º piso até à cobertura.

Na figura seguinte podem observar-se essas saliências da fachada Nordeste.



Fig. 10 – Fachada Nordeste

Na Fig. 11, pode observar-se uma abertura, ao nível do rés-do-chão, criada com o propósito de aumentar a entrada de luz natural na sala e proporcionar a chegada de luz natural na cave.



Fig. 11– Abertura ao nível do rés-do-chão

A fachada Noroeste é uma fachada cega (sem envidraçados) e é revestida, até quase ao nível do 1º andar, por granito. Esta pode ser observada na figura seguinte.



Fig. 12– Fachada Noroeste

De seguida, apresentam-se alguns desenhos que permitem visualizar a orientação de cada um dos alçados e figuras, anteriormente apresentados, assim como simplificar a visão global de todo o edifício.

Na cave, como já mencionado, existe a garagem, a lavandaria (onde está prevista a colocação das máquinas de lavar e secar roupa), um compartimento técnico (onde ficará localizada a bomba de calor, o termoacumulador e o restante equipamento de geotermia) e um WC. Isto pode ser visualizado na figura seguinte.

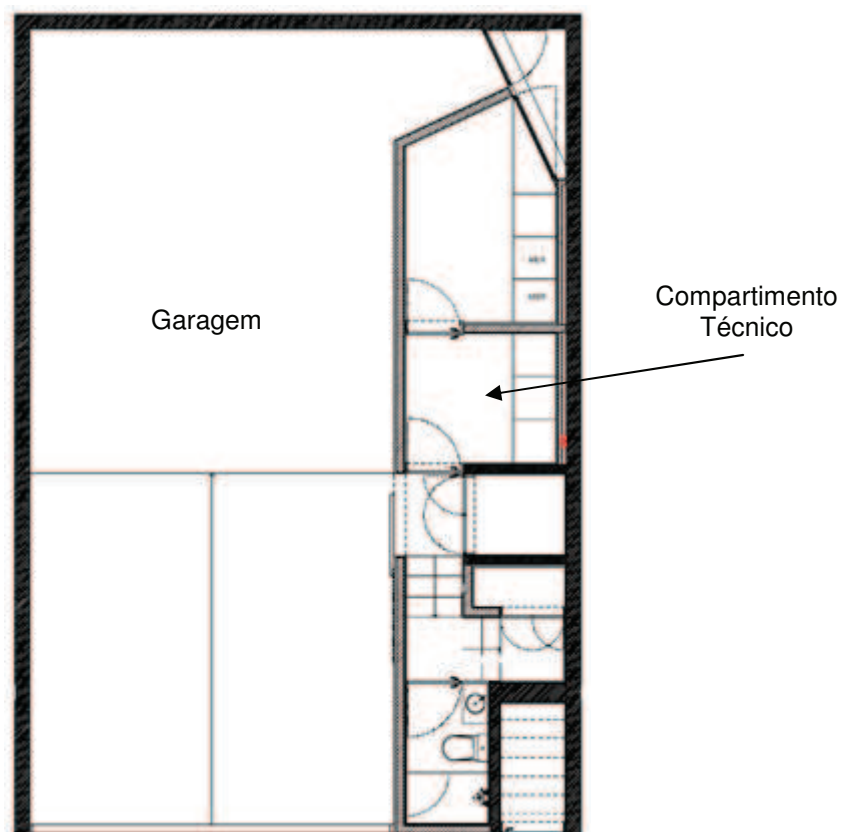


Fig. 13 – Cave

No Quadro 1 apresentam-se as áreas de cada compartimento que compõe este piso.

Quadro 1 – Área dos compartimentos da cave

Descrição	Área (m ²)
Garagem	46,6
Lavandaria	4,5
Compartimento Técnico	3,1
WC	1,8

No rés-do-chão encontra-se a cozinha, a sala, uma dispensa, um quarto de banho de serviço, um vestíbulo e um pátio de entrada.

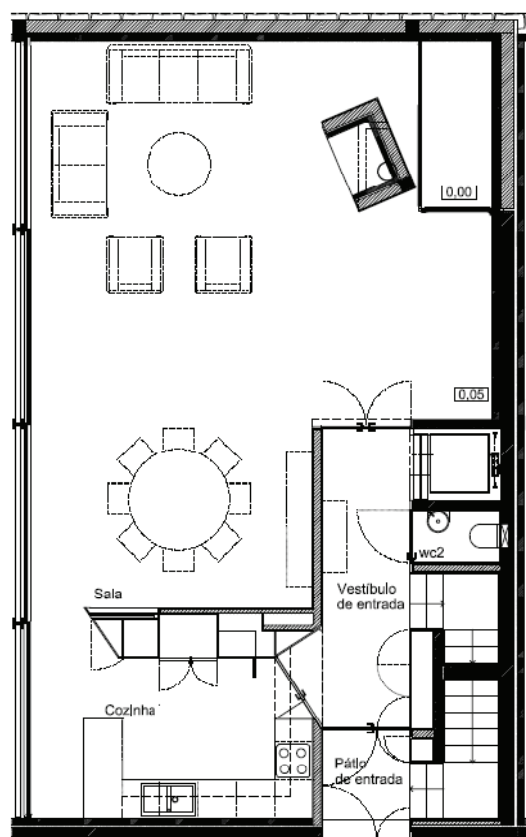


Fig. 14 – Rés-do-Chão

As áreas de cada compartimento constituinte do rés-do-chão podem ser observadas no quadro seguinte.

Quadro 2 – Área dos compartimentos do Rés-do-Chão

Descrição	Área (m ²)
Cozinha	14,4
Sala	54,3
WC	1,2
Pátio de entrada	2,5
Vestíbulo de entrada	7,0
Dispensa	1,5

No primeiro andar encontram-se os cinco quartos, três WC e um quarto de vestir.

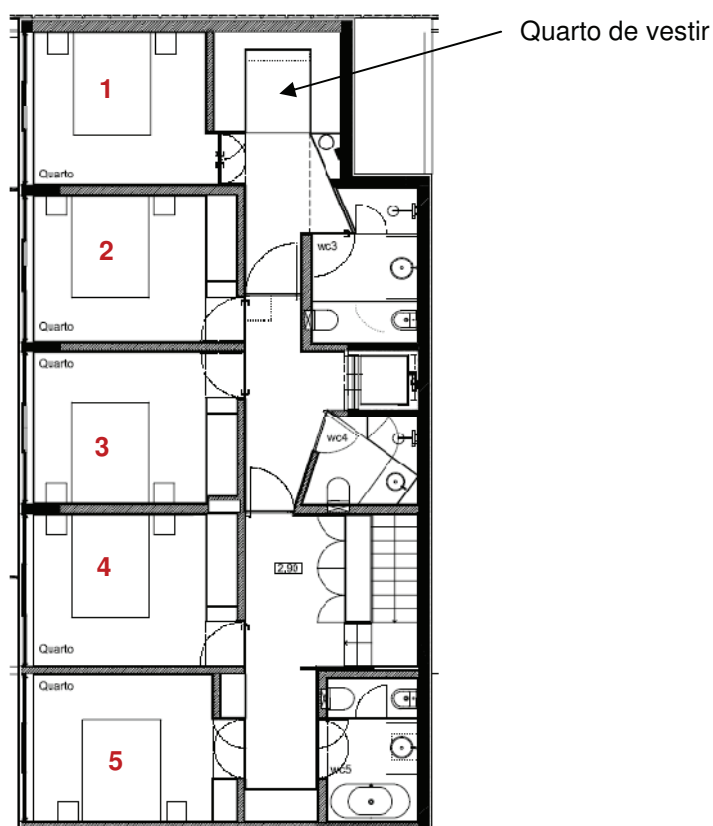


Fig. 15 – 1º Andar

Na Fig. 16, pode observar-se o corredor, do piso 1, que permite a ligação entre os vários quartos e os WC.



Fig. 16 – Corredor no 1º piso

As áreas de cada divisão que compõe o 1º andar são indicadas no quadro seguinte.

Quadro 3 – Área dos compartimentos do 1º andar

Descrição	Área (m ²)
Quarto 1	11,0
Quarto 2	11,5
Quarto 3	11,8
Quarto 4	12,1
Quarto 5	15,6
WC3	11,2
WC4	4,7
WC5	5,1
Corredor 1	7,5
Corredor 2	3,5
Corredor 3	4,5

A cobertura é plana, sem acesso directo e possui sete clarabóias horizontais. Esta pode ser observada na figura seguinte.

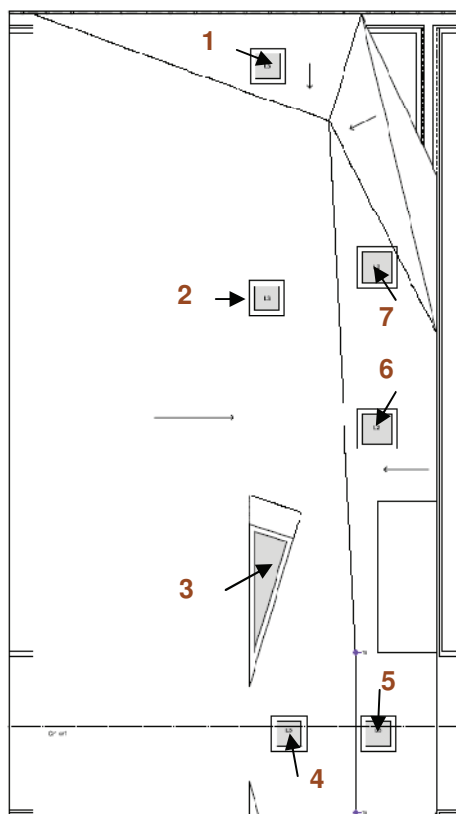


Fig. 17 – Cobertura

Através da observação da Fig. 17, conclui-se que as clarabóias têm forma rectangular, exceptuando uma, geometricamente, triangular.

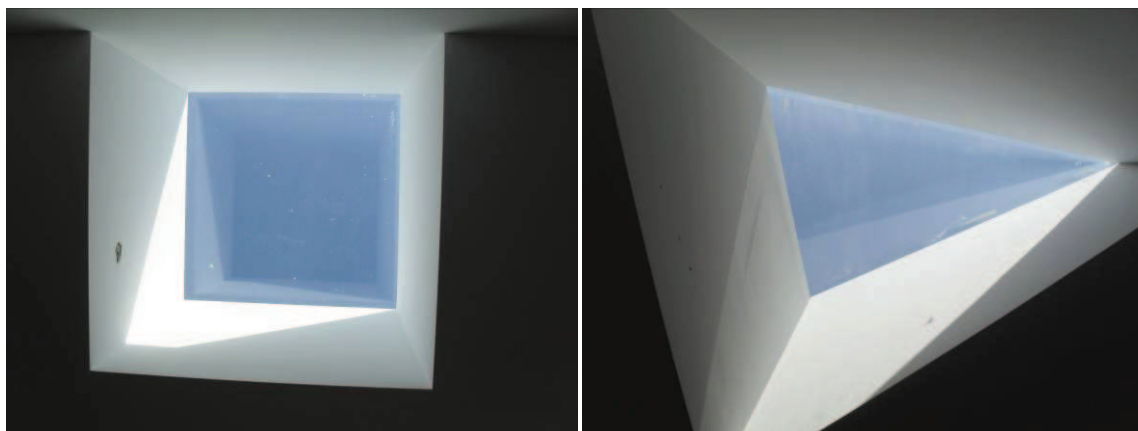


Fig. 18 - Clarabóias

Na figura seguinte pode observar-se parte de um pormenor construtivo, onde se observa a implementação das clarabóias e o desnível entre estas e a própria cobertura.

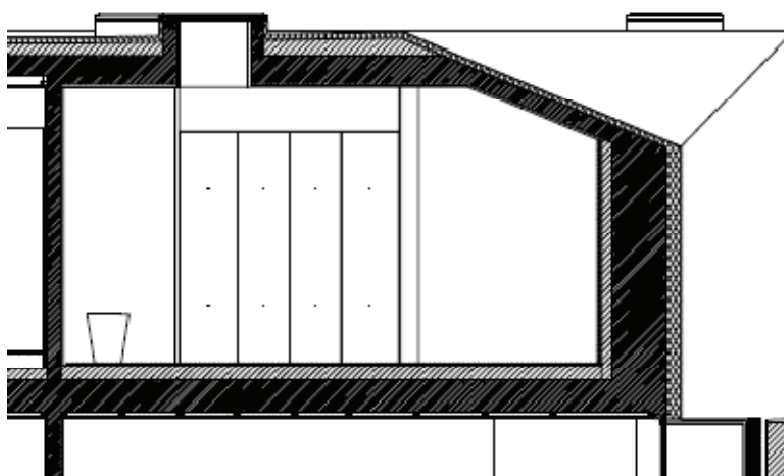


Fig. 19 – Clarabóias – Pormenor Construtivo

A área de cada clarabóia pode ser observada no quadro seguinte.

Quadro 4 – Áreas das clarabóias

Descrição	Área (m ²)
Clarabóia 1	0,25
Clarabóia 2	0,25
Clarabóia 3	0,84
Clarabóia 4	0,25
Clarabóia 5	0,36
Clarabóia 6	0,36
Clarabóia 7	0,25

2.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

O objectivo do presente subcapítulo é permitir uma primeira abordagem à constituição dos diversos elementos construtivos.

2.3.1. COBERTURA

Como já mencionado, anteriormente, trata-se de uma cobertura plana e não acessível. Esta possui uma camada de reboco de 2 cm, seguida de uma laje maciça de betão armado de 26 cm. A impossibilidade da passagem de água é desempenhada pela tela de impermeabilização. Segue-se uma camada de regularização de 10 cm em betão leve. O isolamento térmico é constituído por poliestireno extrudido, em placas com 8 cm de espessura. Isto é ilustrado na Fig. 20.

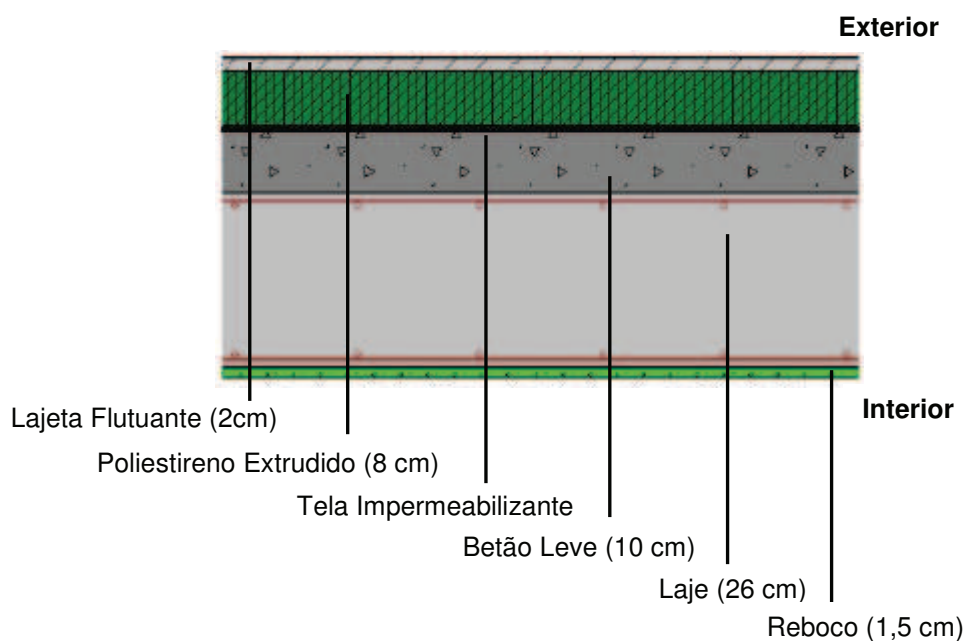


Fig. 20 – Constituição da cobertura

2.3.2. PAREDES EXTERIORES

2.3.2.1. Rés-do-Chão

A parede orientada a Noroeste faz fronteira com a propriedade vizinha, tratando-se de uma parede lateral do edifício. Esta tem diferentes constituições para o rés-do-chão e para o 1º piso.

Na Fig. 21, representa-se um corte construtivo da parede Noroeste para o rés-do-chão.

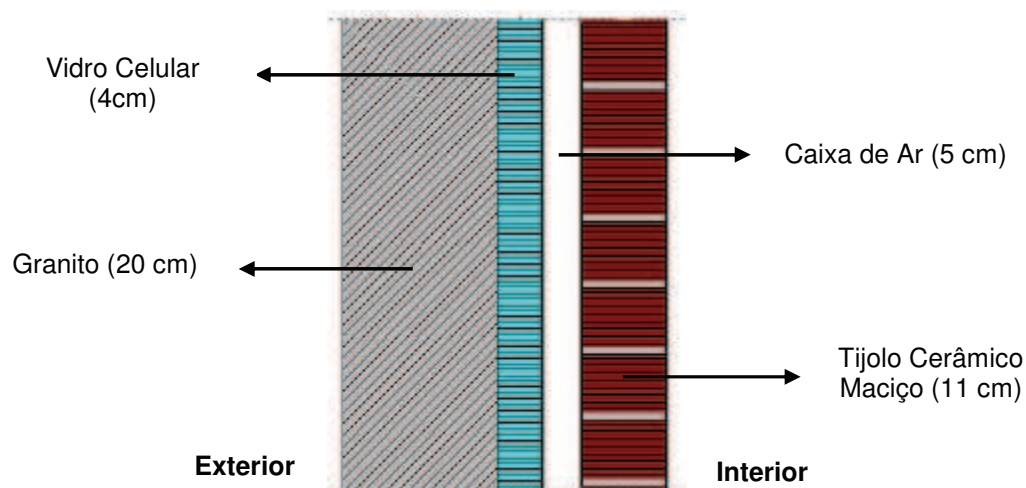


Fig. 21 – Corte construtivo da parede Noroeste

O revestimento interior e exterior da parede em estudo, pode ser observado na figura seguinte.



Fig. 22– Revestimento exterior e interior da fachada Noroeste, ao nível do rés-do-chão

A fachada, ao nível do rés-do-chão, orientada a Sudoeste é composta apenas por envidraçados.



Fig. 23 – Fachada Sudoeste ao nível do rés-do-chão

Os envidraçados tanto da sala como da cozinha são vidros duplos 4 mm + 6 mm e caixa-de-ar de 12 mm. Trata-se de envidraçados de grande dimensão e sem dispositivos de sombreamento. Entre os envidraçados existem pilares de aço, como pode ser observado na Fig. 23. Quanto à caixilharia esta é metálica com corte térmico.

Na fachada Sudeste é onde se encontra a entrada principal da habitação. A sua constituição é demonstrada na figura seguinte.

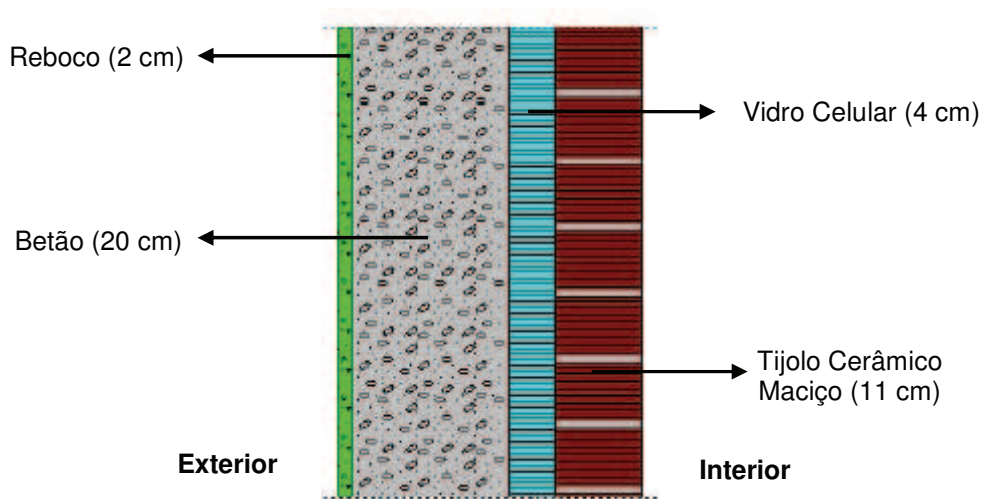


Fig. 24 – Corte Construtivo da fachada Sudeste ao nível do rés-do-chão

Relativamente à constituição da fachada Nordeste, esta tem diferentes constituições para o piso 0 e para o piso 1.

Para o piso 0 a sua constituição é a seguinte:

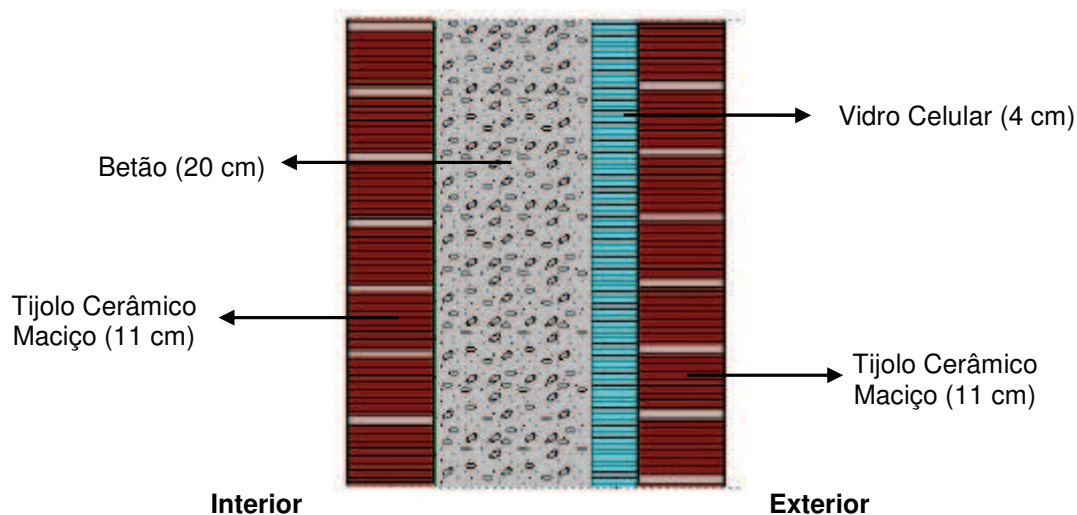


Fig. 25 – Corte construtivo da fachada Sudeste

Pela figura seguinte pode observar-se o revestimento exterior e interior da fachada Nordeste, ao nível do rés-do-chão.



Fig. 26 – Fachada Nordeste (Exterior e Interior)

Há ainda que focar o canto de intercepção da fachada Nordeste e a Noroeste ao nível do rés-do-chão. Para melhor identificar qual o canto em questão observe-se a seguinte figura.

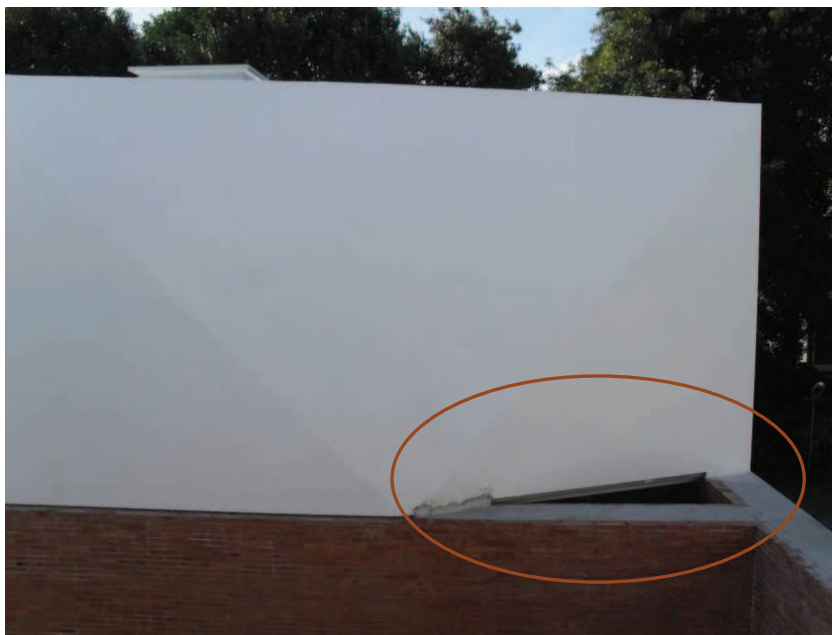


Fig. 27– Intercepção entre a fachada Nordeste e a Noroeste

Esta abertura, ao nível da sala do rés-do-chão, trata-se de um vidro duplo 4 mm+6 mm e caixa-de-ar de 12 mm (*vide* Fig. 28).



Fig. 28 – Envidraçado na sala

2.3.2.2. Piso 1

Ao nível do 1º piso, as fachadas Noroeste, Sudoeste e Nordeste têm todas a mesma constituição. A Fig. 29, mostra essa composição e o que foi tomado em consideração na simulação do edifício.

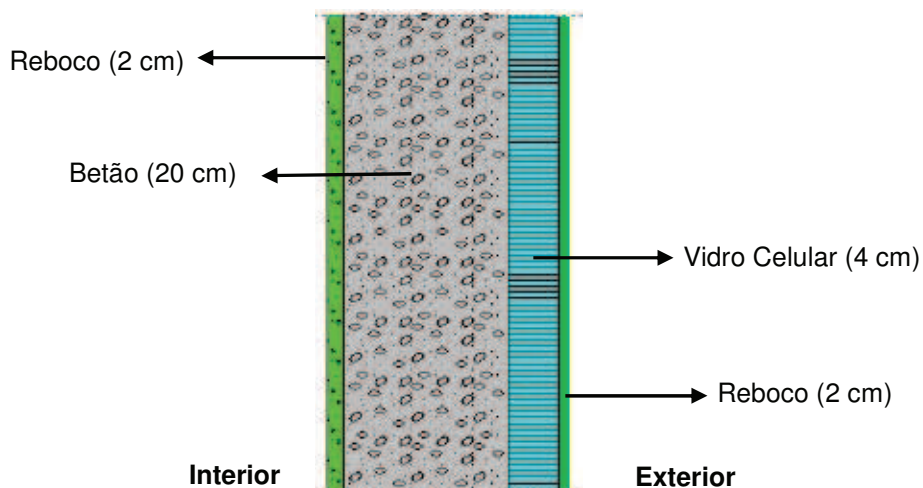


Fig. 29 – Corte construtivo das fachadas do 1º piso

Os envidraçados da parede Sudoeste, ao nível do 1º piso, são vidros temperados de 5 mm+4 mm com caixa-de-ar de 14 mm. Quanto à caixilharia é metálica com corte térmico.

Quanto à fachada Sudeste, esta faz a divisão entre as duas moradias contíguas, pelo que a sua constituição não é igual à constituição das restantes fachadas do mesmo piso.

Os seus materiais constituintes e as respectivas espessuras são apresentadas na figura seguinte.

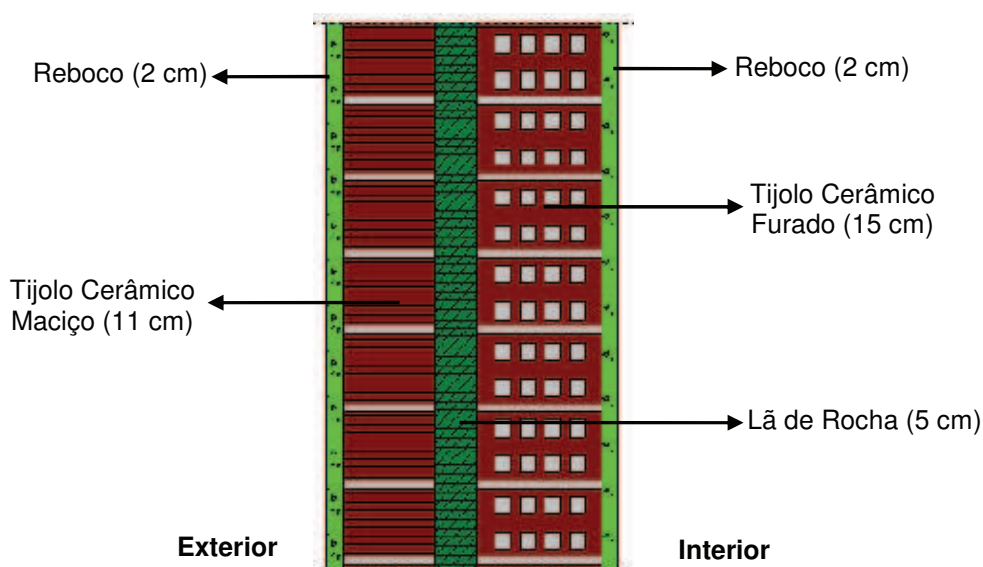


Fig. 30 – Corte construtivo da fachada Sudeste no 1º piso

Na Fig. 30, entenda-se por exterior, a casa contígua à habitação em estudo.

2.3.3. PAREDES INTERIORES E TECTOS

As paredes interiores entre quartos, corredores e halls, são do tipo reboco de 2 cm, tijolo cerâmico de 11 cm e, novamente, reboco de 2 cm.

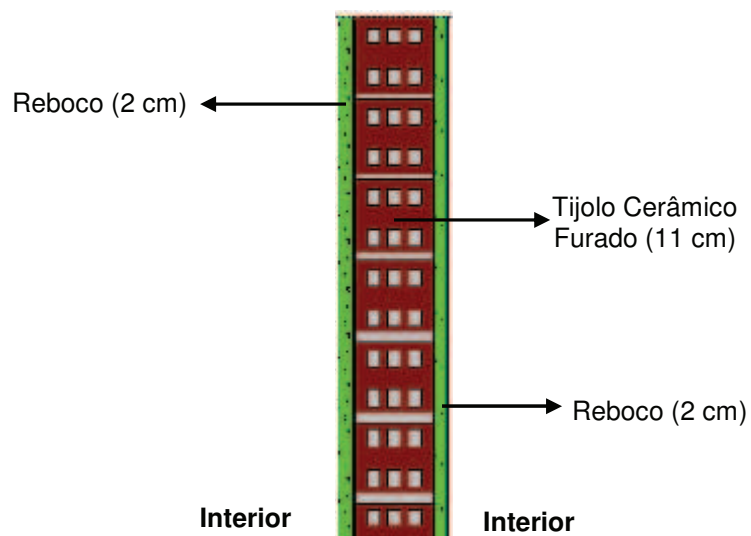


Fig. 31 – Corte construtivo das paredes interiores

Na figura seguinte pode observar-se uma pequena comprovação do estipulado no projecto.



Fig. 32 – Parede Interior

Os acabamentos das paredes interiores da cozinha e de uma parte da sala são feitos em tijolo cerâmico maciço de 11 cm.

Nos quartos de banho, estão presentes dois tipos de acabamentos. Existem uns com as paredes revestidas de azulejo vidrado de aresta lisa e outros de azulejo do tipo pastilha. Para além do revestimento, estas paredes interiores ainda levam uma argamassa de regularização, uma de assentamento e, ainda outra, para betumação de juntas.

Os tectos têm acabamento em estuque. Não levam qualquer tipo de sanca ou cor que não a branca.

2.3.4. PAVIMENTOS

Na habitação em estudo foi implementado um tipo de pavimento radiante composto por placas metálicas de alumínio, emissoras de calor, que permitem a dissipação da temperatura, gerada pelo sistema, de uma forma constante.

Todos os pavimentos da moradia são radiantes, excepto o da cave, havendo três tipos diferentes em uso. Um é na cozinha, outro na sala do rés-do-chão e outro é no pavimento do piso 1.

O tipo de pavimento a ser utilizado, consoante as condições presentes num compartimento, segue uma metodologia que pode ser auxiliada pela observação da figura seguinte [7].

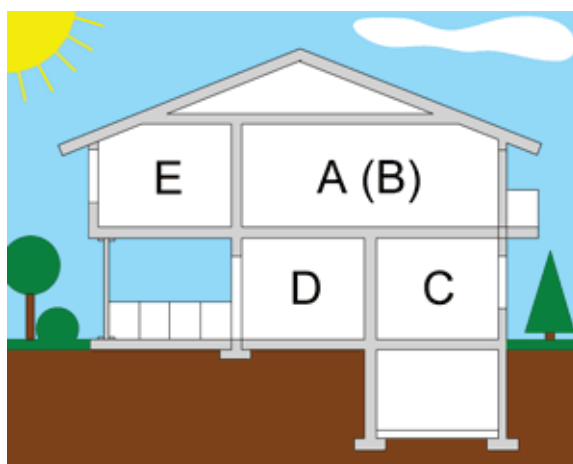


Fig. 33 – Metodologia de uso dos diferentes pavimentos disponíveis

O tipo pavimento adequado a usar em cada compartimento depende da sua tipologia (quarto, cozinha, quarto de banho,...) e das suas condições fronteira (em contacto com o terreno, com um espaço não aquecido, com um espaço aquecido,...).

No caso da cozinha (pavimento sobre espaço não aquecido) tem-se um do tipo C. Por se tratar de uma cozinha, onde pode haver presença de água, este também tem de ser do tipo húmido. Este tipo de pavimento não reforçado é designado por VV.

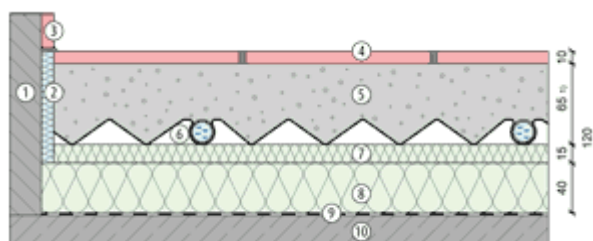


Fig. 34 – Pavimento sobre espaço não aquecido – Pavimento Húmido (VV)

Quadro 5 – Legenda da Fig. 34

1	Parede
2	Fita isoladora de 8 mm
3	Rodapé
4	Placas de granito de 20 mm
5	Argamassa de enchimento
6	Placas de alumínio moldadas de 20 mm
7	Painel de poliestireno expandido de 15 mm
8	Poliestireno expandido de 40 mm
9	Barreira pára-vapor
10	Laje de betão de 100 mm



Fig. 35 – Pavimento da cozinha

Na sala foi aplicado um VH, do tipo seco. Este compartimento é um espaço aquecido em contacto com a cave, pelo que terá algumas características diferentes do aplicado no piso 1.

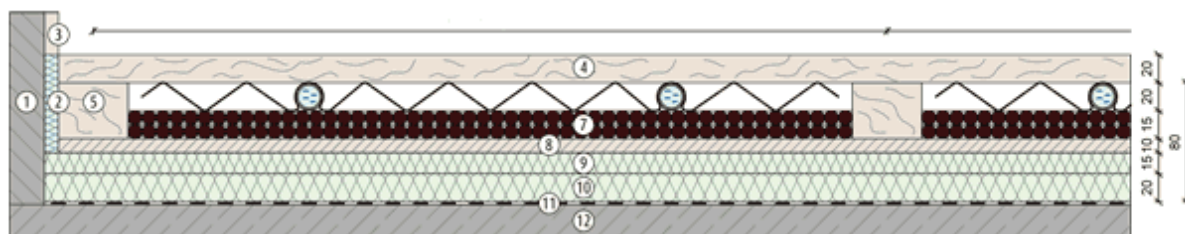


Fig. 36 – Pavimento sobre espaço não aquecido – Pavimento seco (VH)

Quadro 6 – Legenda da Fig. 36

1	Parede
2	Fita isoladora de 8 mm
3	Rodapé
4	Soalho em Riga de 20 mm
5	Ripas de madeira de 35 x 50 mm
6	Placas de alumínio moldadas de 20 mm
7	Espuma de polietileno de 3 mm
8	Contraplacado de choupo de 10 mm
9	Painel de poliestireno expandido de 15 mm
10	Poliestireno expandido EPS 40 de 30 mm
11	Barreira pára-vapor
12	Laje de betão de 100 mm



Fig. 37 – Pavimento da sala

Relativamente ao piso 1 foi, também, aplicado um pavimento do tipo seco, designado, como o da sala, por VH, visto seguirem o mesmo padrão.

Nos quartos de banho deveria ter sido aplicado um tipo de pavimento húmido como o aplicado na cozinha, mas tal não se verifica. Foi instalado um pavimento igual aos dos quartos e da sala. Este pavimento é apresentado de seguida.

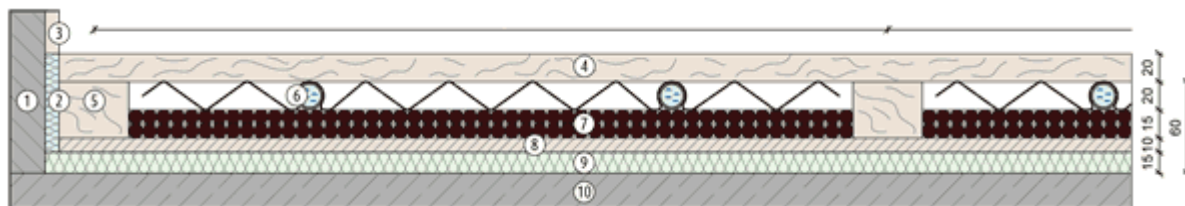


Fig. 38 – Pavimento sobre espaço aquecido – Pavimento seco (VH)

Quadro 7 – Legenda da Fig. 38

1	Parede
2	Fita isoladora de 8 mm
3	Rodapé
4	Soalho em Riga de 20 mm
5	Ripas de madeira de 35 x 50 mm
6	Placas de alumínio moldadas de 20 mm
7	Espuma de polietileno de 3 mm
8	Contraplacado de choupo de 10 mm
9	Painel de poliestireno expandido de 30 mm
10	Laje de betão de 120 mm



Fig. 39 – Pavimento piso 1

2.4. VENTILAÇÃO

É fundamental climatizarem-se os edifícios e simultaneamente prever-se a instalação de sistemas de ventilação permanentes que transportem, para o exterior, os mais de 10 kg de vapor de água produzidos diariamente [8].

A ventilação da habitação está garantida pela presença de grelhas auto-reguláveis na parte superior dos vãos envidraçados e nos WC, e ainda através de um exaustor na cozinha.

Na Fig. 40, pode observar-se a abertura na parte superior de um dos envidraçados do piso 1, pertencente a um dos quartos, onde serão instaladas as grelhas auto-reguláveis.

Nos WC estão, também, presentes aberturas de saída de ar, as quais estão de acordo com a NP 1037-1, uma vez que se situam a mais de 2,1 m de distância do pavimento [9].

Quanto às renovações horárias, pretendidas na fase de dimensionamento, são iguais a $0,6 \text{ h}^{-1}$ [10].



Fig. 40 – Abertura para grelhas de ventilação

2.5. DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

2.5.1. BOMBA DE CALOR SOLO/ÁGUA, SONDA GEOTÉRMICA E ACUMULADOR DE AQS

Um dos objectivos principais presente na escolha de um sistema de climatização, é que este satisfaça certas condições conforto, manutenção e economia.

Um sistema que possibilite alcançar o pretendido e ainda permitir a sua instalação num espaço relativamente pequeno, como é o caso do compartimento técnico na cave, é a implementação de uma bomba de calor geotérmica.

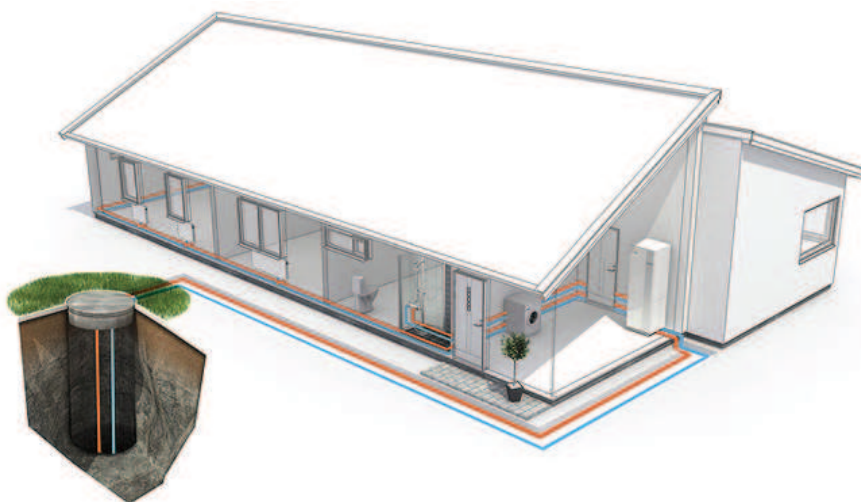


Fig. 41 – Esquema de implementação de uma sonda geotérmica [7]

Assim sendo, foi implantado um sistema constituído por uma bomba de calor geotérmica de 12 kW associada a uma sonda vertical, em duplo U de 40 mm, com 160 m de profundidade, inserida no maciço granítico.

As condições de operação definidas para este sistema foram as seguintes:

- Aquecimento ambiente utilizando uma temperatura de envio para o circuito de aquecimento entre 30 e 35°C (realizado no condensador da bomba de calor);
- Temperatura de funcionamento das sondas geotérmicas entre 7°C (envio para as sondas) e 10°C (retorno das sondas);
- Diferencial de temperaturas entre o envio e o retorno das sondas de 3°C;
- Produção de 250L de água quente sanitária por dia.

Sabendo que a principal função da bomba de calor é a produção de energia suficiente que permita o aquecimento/arrefecimento ambiente e o aquecimento das AQS, é dada, no entanto, especial atenção às necessidades sanitárias. Desta forma, o sistema possui uma capacidade de reversão permitindo inverter o circuito de aquecimento/arrefecimento, quando existe uma necessidade para as águas quentes sanitárias. Durante o decorrer dessa acção o aquecimento/arrefecimento ambiente é garantido pelo termoacumulador.

Através da análise do manual da bomba instalada na habitação [11] conclui-se que, esta possui um coeficiente de performance (COP) igual a 5.



Fig. 42 – Bomba de calor

Todos os equipamentos foram instalados na cave, no compartimento técnico. Entre eles esta o termoacumulador que pode ser observado na figura seguinte.



Fig. 43 – Termoacumulador de águas quentes sanitárias

Na zona ajardinada de cada habitação foi feito um furo vertical, com uma profundidade de 160 m, onde estão instaladas sondas geotérmicas.

Cada sonda geotérmica possui um conjunto de dois tubos de poliestireno de alta densidade (PEad) de 40 mm, em forma de U, ligados entre si e unidos através de uma caixa de colectores, ao nível da cave.



Fig. 44 – Caixa de colector da sonda

Desta caixa de colectores deriva uma tubagem, envolta em material isolante, até à bomba de calor. Na figura seguinte pode observar-se a saída dos tubos provenientes da sonda, visíveis no compartimento técnico da presente habitação.



Fig. 45 – Saída dos tubos da sonda que ligarão à bomba de calor

Para a execução das sondas foi utilizada uma máquina perfuradora de roto-percussão com extracção do material em excesso por ar comprimido. Após a perfuração foi introduzido um tubo de 25 mm em PEad para permitir o preenchimento do furo (entre as paredes do solo e as sondas introduzidas), com uma mistura impermeabilizante e de boa condutibilidade térmica (bentonite, areia de sílica, cimento Portland e água). Foram, depois, introduzidas as sondas, de duplo U, impelidas por um contrapeso de 20 kg para a profundidade final de 160 m. Na totalidade o furo tem 0,13 m de diâmetro.

A Fig. 46, ilustra um corte transversal da sonda.

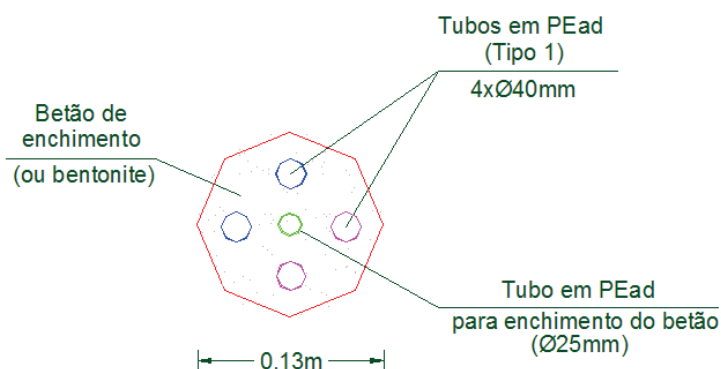


Fig. 46 – Corte transversal da sonda geotérmica

Na Fig. 47, pode ser observada a posição relativa da sonda geotérmica e o esquema de ligação entre a bomba de calor e o termoacumulador que abastecem, através de uma tubagem suspensa, o edifício.

Para melhor compreensão da figura proposta importa dizer que TA é a abreviatura de termoacumulador e que este tem uma capacidade de 250L. BC é a abreviação de bomba de calor.

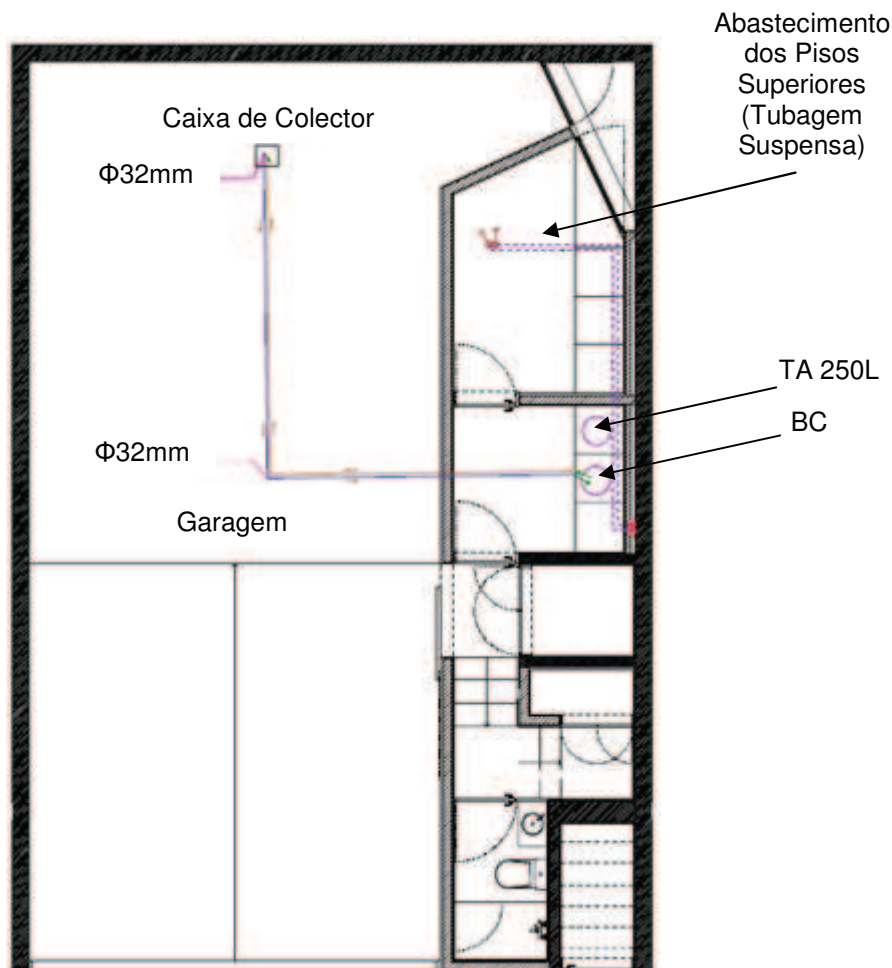


Fig. 47 – Esquema da transmissão de calor até à bomba

Nas tubagens colocadas na sonda, designadas por sistema primário, circula permanentemente um fluido frigogénico (água + glicol), responsável pela troca de calor através do contacto com o solo. Este processo é garantido pela bomba de circulação colocada junto à bomba de calor, que permite a movimentação contínua do fluido.

Na bomba de calor dá-se a transferência da energia captada através de um permutador de calor. Por sua vez, a bomba de calor incrementa a temperatura do fluido até ao necessário para o aquecimento do ambiente requerido, bem como para a produção de AQS.

Na estação de arrefecimento, como já foi mencionado anteriormente, através de um dispositivo reversível, o circuito é invertido. Neste caso, o mesmo fluido é arrefecido até ao nível de temperatura necessário para o arrefecimento do ambiente, fazendo também a produção de AQS quando requerida.

A bomba de calor é controlada pelo termóstato colocado no exterior da habitação em combinação com o caudal desejado.

Esquemáticamente, o funcionamento da bomba pode ser observado na figura seguinte.

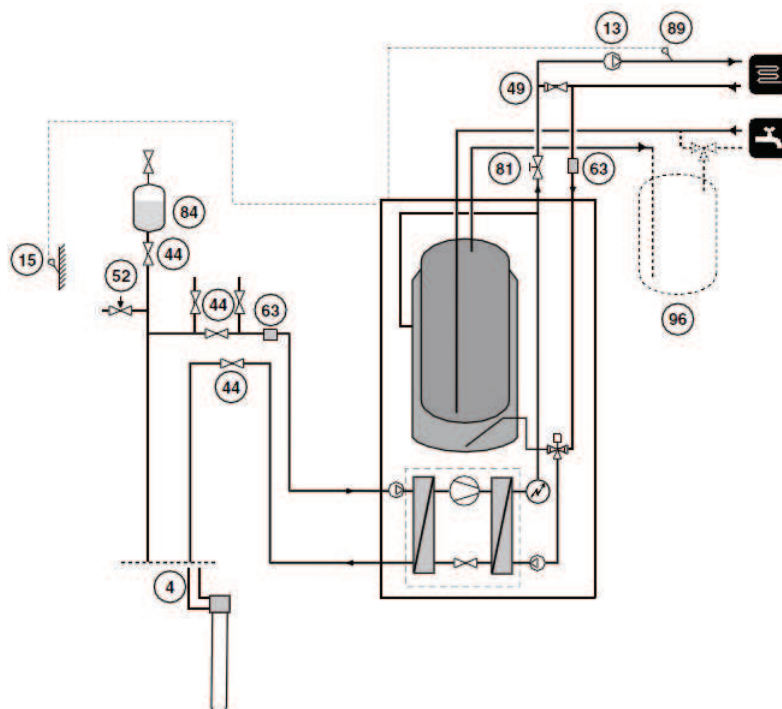


Fig. 48 – Esquema de funcionamento da bomba de calor [11]

Quadro 8 – Legenda da Fig. 48

4	Sonda geotérmica
13	Bomba de circulação
15	Termóstato exterior
44	Válvula On/Off
49	Válvula de não retorno
52	Válvula de segurança
63	Filtro de partículas
81	Válvula de controlo de caudal
84	Válvula de nível
89	Sensor de caudal
96	Aquecedor eléctrico de água

2.5.2. CIRCUITO DE AQUECIMENTO / ARREFECIMENTO

Para a dissipação energética no interior de cada habitação previu-se a colocação de um pavimento radiante capaz de garantir o aquecimento ou arrefecimento de cada espaço em função das necessidades térmicas sazonais. Este é constituído por uma malha de tubos capilares com diâmetros reduzidos. Cada grupo de malhas está ligado a um conjunto de equipamentos de controlo (sensores e termóstatos), bem como a uma caixa de colector prevista ao nível de cada piso, a qual permite o accionamento ou o corte do sistema de cada compartimento, em função das necessidades energéticas detectadas.



Fig. 49 – Colector do pavimento radiante

2.5.2.1. Descrição do dimensionamento do circuito de aquecimento

O dimensionamento deste sistema foi elaborado na fase de projecto, através de um programa de cálculo próprio. Este permite seleccionar várias opções de construção, possibilitando concluir qual a mais adequada ao caso em estudo. A partir daí, com as cargas térmicas para cada compartimento, ou com os valores estimados do coeficiente de transmissão térmica (U), é possível determinar as variáveis que constituem o sistema [12]. Essas variáveis podem ser listadas da seguinte forma:

- O número de circuitos necessários por divisão;
- O comprimento dos tubos em cada circuito;
- O número de placas emissoras;
- O número de circuitos em cada colector;
- A determinação da temperatura mínima e da sua variação, capaz de satisfazer a emissão prevista;
- O caudal de água necessário (l/min), por circuito;
- As perdas de carga por circuito (kPa);
- As perdas de carga por colector (kPa);
- As perdas totais a serem ultrapassadas pela bomba de circulação (kPa).

O programa dispõe, ainda, de uma interface gráfica que permite desenvolver e visualizar o projecto de implementação do pavimento, partindo de informações básicas, como posição dos colectores de distribuição e o *input* da planta em DWG.

Com estes dados, o programa traça os circuitos, posiciona os emissores, localiza a passagem da tubagem necessária e contabiliza as emissões previstas em cada compartimento.

O Quadro 9 e o Quadro 10 apresentam os valores fornecidos pelo programa, para o caso em estudo. E os *outputs* gráficos, que servem de legenda a estas tabelas, são apresentados mais à frente, no presente trabalho, na Fig. 50, e na Fig. 51.

Quadro 9 – Dados do programa do pavimento para o 1º andar

Nº	Descrição	Área (m²)	Tipo Pav.		Ti (°C)	To (°C)	Energia Requisitada (W)	Energia Efectiva (W)	ΔT
101	Corredor	15,7	VH						
102	WC	5,1	VH	Heating	24,0	28,3	408	296	3,55
				Cooling	26,0	20,0	250	250	3,00
103	Quarto	15,6	VH	Heating	20,0	23,8	780	780	3,06
				Cooling	26,0	20,0	765	765	3,00
104	Quarto	12,1	VH	Heating	20,0	23,8	605	605	3,06
				Cooling	26,0	20,0	593	593	3,00
105	Quarto	11,8	VH	Heating	20,0	23,8	590	590	3,06
				Cooling	26,0	20,0	579	579	3,00
106	Quarto	11,5	VH	Heating	20,0	23,8	575	575	3,06
				Cooling	26,0	20,0	564	564	3,00
107	Quarto	11,0	VH	Heating	20,0	23,8	550	550	3,06
				Cooling	26,0	20,0	539	539	3,00
108	WC	11,2	VH	Heating	24,0	28,3	896	650	3,55
				Cooling	26,0	20,0	549	549	3,00
109	WC	4,7	VH	Heating	24,0	28,3	376	273	3,55
				Cooling	26,0	20,0	231	231	3,00
Total				Heating			4780	4318	
				Cooling			4070	4070	

Quadro 10 – Dados do programa do pavimento para o Rés-do-Chão

Nº	Descrição	Área (m²)	Tipo Pav.		Ti (°C)	To (°C)	Energia Necessária (W)	Energia Efectiva (W)	ΔT
1	Corredor	9,5	VH						
2	Cozinha	14,4	VV	Heating	20,0	23,1	720	720	3,06
				Cooling	26,0	20,1	706	706	3,00
3	Sala A)	18,1	VH	Heating	20,0	23,8	2715	905	3,06
				Cooling	26,0	20,0	2661	887	3,00
3	Sala B)	18,1	VH	Heating	20,0	23,8		905	3,06
				Cooling	26,0	20,0		887	3,00
3	Sala C)	18,1	VH	Heating	20,0	23,8		905	3,06
				Cooling	26,0	20,0		887	3,00
4	Dispensa	9,4	VH	Heating	20,0	23,8	470	470	3,06
				Cooling	26,0	20,0	461	461	3,00
5	WC	1,2	VH	Heating	20,0	23,8	60	60	3,05
				Cooling	26,0	20,0	59	59	3,00
Total				Heating			3965	3965	
				Cooling			3887	3887	

Os parâmetros são definidos pelas seguintes abreviações:

- VH – Pavimento do tipo seco;
- VV – Pavimento do tipo húmido;
- Ti – Temperatura interior do ambiente (°C);
- To – Temperatura do pavimento (°C);
- Target – Potência não suprida pelo sistema (W);
- Actual – Potência fornecida pelo pavimento (W);
- ΔT – Diferença de temperatura (°C).

Através da análise dos quadros anteriores conclui-se que para o 1º andar as temperaturas interiores dimensionadas atingem os 26°C, sendo para isso necessário uma potência de 50 a 58W/m². Para este piso todas as necessidades de arrefecimento são supridas, atingindo-se um valor total de 4070W para a potência de emissão necessária. O mesmo já não acontece no aquecimento onde se atinge uma potência de emissão necessária de 4319W e uma não suprida de 4780W.

No Quadro 11 encontram-se apresentadas as áreas de emissão referentes a cada piso, assim como a potência de emissão e a não suprida pelo sistema.

Quadro 11 – Resultados finais do dimensionamento do pavimento radiante

Piso	Área de emissão (m ²)	Potência de emissão fornecida pelo sistema (W)		Potência de emissão não suprida pelo sistema (W)	
		Aquecimento	Arrefecimento	Aquecimento	Arrefecimento
1º andar	99	4319	4070	-461	0
Rés-do-Chão	89	3965	3887	0	0
TOTAL	188	8284	7957	-461	0

Apesar de existirem 461W de potência que o sistema não consegue fornecer, isso não implica que as temperaturas interiores não verifiquem o pretendido, apenas significa que os circuitos que fornecem os quartos de banho não atingem, exactamente, a temperatura dimensionada.

2.5.2.2. Descrição do processo construtivo utilizado

A figura seguinte ilustra o *output* visual que o programa de dimensionamento dos pavimentos radiantes fornece.

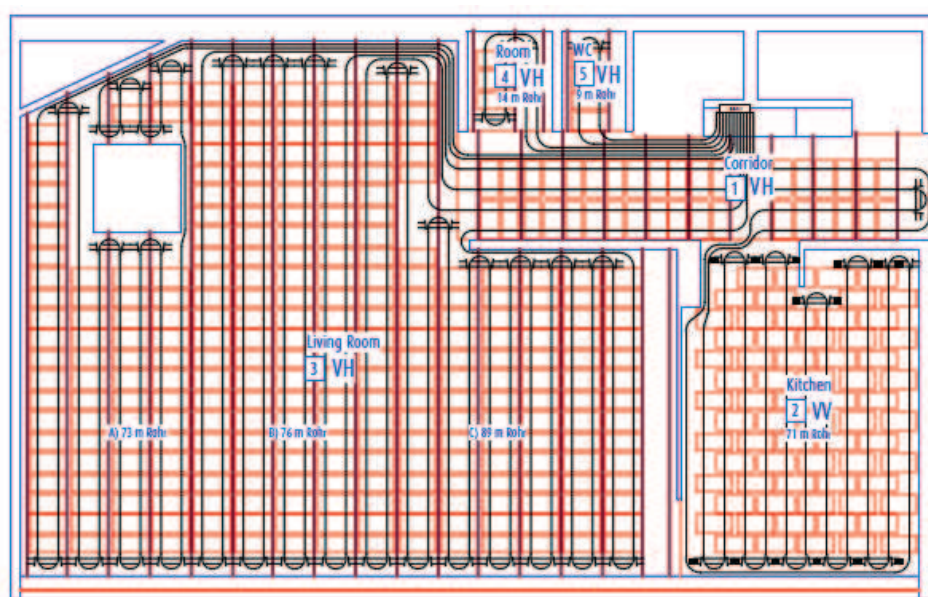


Fig. 50 – Disposição do pavimento radiante no Rês-do-Chão

Esta Fig. 50, permite visualizar o tipo de pavimento utilizado no piso 0, bem como a totalidade de comprimento dos tubos. Permite ainda observar a orientação e disposição das malhas capilares e a posição do colector.

A Fig. 51, mostra o mesmo *output* mas agora para o 1º piso.

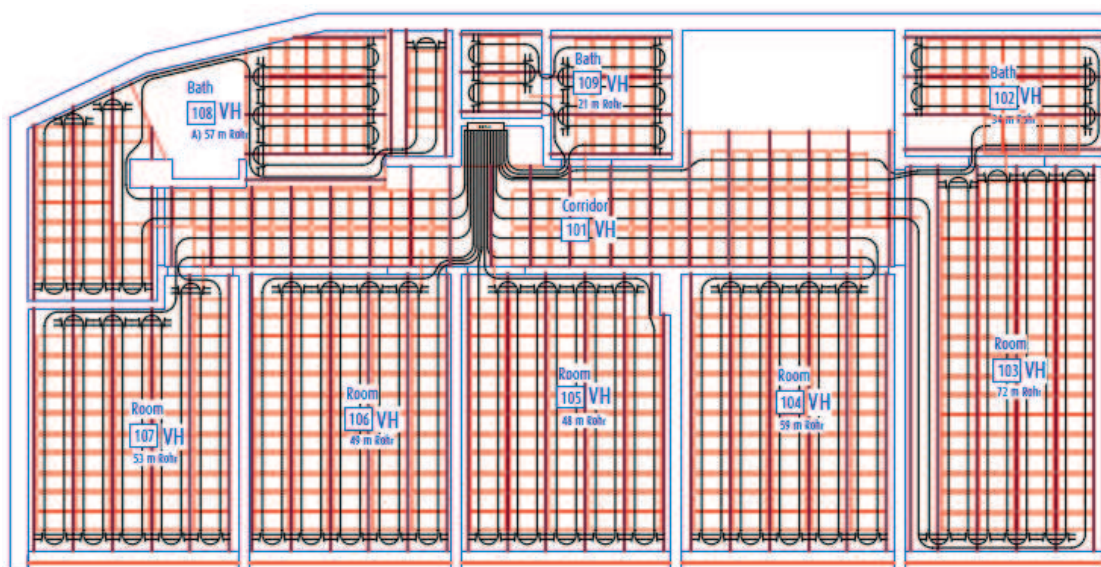


Fig. 51 – Disposição do pavimento radiante do piso 1

Observa-se que no primeiro piso será sempre usado um pavimento radiante do tipo VH (pavimento seco) com características próprias de um pavimento que faz a separação entre dois espaços aquecidos.

Relativamente ao processo construtivo, executaram-se várias etapas. Analisando, em particular, a execução de um pavimento seco, pode dizer-se que inicialmente efectuou-se a limpeza e o nivelamento de todo o piso.

Após a limpeza e o nivelamento referidos passou-se à colocação da espuma de poliestireno e do contraplacado. De seguida efectuou-se o contorno com o ripado de choupo em torno das paredes e locais de remate para mudanças de pavimento.



Fig. 52 – Colocação do ripado para o pavimento seco

De seguida o ripado é aparafusado ao contraplacado. Entre o passo das ripas de madeira é colocado um filme de espuma de polietileno de 3 mm de espessura e procede-se à aplicação da tubagem sobre este ultimo referido.



Fig. 53 – Colocação da tubagem em pavimento seco

Posteriormente são colocadas as placas emissoras entre as ripas, ajudando o facto de estas possuírem já as aberturas de encaixe nos tubos, tornando, assim, a execução fácil e rápida.



Fig. 54 – Colocação das placas de alumínio no pavimento seco

Todos os tubos do circuito estão ligados ao respectivo colector de piso. É neste colector que no caso de avaria de uma válvula, esta pode ser facilmente substituída.



Fig. 55 – Colectores do pavimento radiante

Embora seja de difícil visualização, no meio dos tubos da Fig. 55 (à esquerda) é possível observarem-se uns fios brancos, que na verdade se tratam dos sensores de temperatura do pavimento. Por exemplo, quando a temperatura ponto de orvalho esta prestes a ser atingida o sistema desliga evitando assim a formação de condensações.

A metodologia de implementação dos pavimentos húmidos é praticamente igual à dos pavimentos secos, exceptuando que inicialmente é colocado um painel de poliestireno em vez do contraplacado.



Fig. 56 – Pavimento da cozinha – Pavimento húmido

2.6. PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA

2.6.1. COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA – “U”

Trata-se da quantidade de calor, por unidade de tempo, que atravessa uma superfície, de área unitária, de um elemento da envolvente, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que este separa [13]. A unidade de medida é $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ e resulta da soma do inverso das resistências térmicas das diversas camadas do elemento da envolvente, bem como das resistências superficiais interior e exterior.

Como no presente trabalho o objectivo é o uso da ferramenta de simulação EnergyPlus, analisada no Capítulo 3, é necessário ter-se presente a definição de coeficiente de transmissão térmica, pois os valores que entram no seu cálculo tratam-se dos dados a introduzir no programa, mas o cálculo de “U”, propriamente dito, é apresentado no Capítulo 4, onde é estudada a conformidade da habitação segundo o RCCTE.

Assim sendo, passa-se à apresentação das características dos materiais de cada elemento, constituintes da habitação, sendo “e” a espessura do material, “ λ ” o coeficiente de condutibilidade térmica, “ ρ ” a densidade, “Cp” o calor específico e “R” a resistência térmica.

Os coeficientes de condutibilidade térmica, as densidades e as resistências térmicas constam no ITE50 [14]. Por sua vez, o calor específico pode ser consultado na publicação ASHRAE [15] ou ainda no site “The Engineering Tool Box” [16].

2.6.2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

2.6.2.1. Cobertura

A cobertura, como já foi mencionado anteriormente, é não acessível e de pendente quase nula. Os materiais que a constituem são apresentados na Fig. 20, e as suas características são as seguintes.

Quadro 12 – Características dos materiais constituintes da cobertura

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m. $^\circ$ C),	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² . $^\circ$ C/W)
Lajeta Flutuante	2	-	-	-	-
Poliestireno Extrudido	8	0,037	33	1210	-
Betão Leve	10	0,046	1050	960	-
Laje	26	2,0	2450	750	-
Reboco	1,5	1,3	1900	900	-

Neste elemento considerou-se desprezível a contribuição da lajeta flutuante.

2.6.2.2. Paredes do Rés-do-Chão

As várias paredes que constituem a habitação têm características diferentes no rés-do-chão e no 1º andar. Assim sendo, analisemos cada uma delas individualmente.

Na parede Noroeste do rés-do-chão os materiais presentes são os seguintes.

Quadro 13 – Características dos materiais constituintes da parede Noroeste do rés-do-chão

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Granito	20	2,8	2600	790	-
Vidro Celular	4	0,04	120	840	-
Caixa-de-ar	5	-	-	-	0,18
Tijolo Cerâmico Maciço	11	-	-	-	0,13

A parede Sudeste é onde se encontra a entrada principal da habitação. Esta é constituída pelos seguintes materiais.

Quadro 14 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do rés-do-chão

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Reboco	2	1,3	1900	900	-
Betão	20	2,0	2450	750	-
Vidro Celular	4	0,04	120	840	-
Tijolo Cerâmico Maciço	11	-	-	-	0,13

A parede Nordeste é uma das paredes da sala e é o único elemento revestido interior e exteriormente, em simultâneo, por tijolo cerâmico maciço. Veja-se o seguinte quadro.

Quadro 15 – Características dos materiais constituintes da parede Nordeste do rés-do-chão

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Tijolo Cerâmico Maciço	11	-	-	-	0,13
Vidro Celular	4	0,04	120	840	-
Betão	20	2,0	2450	750	-
Tijolo Cerâmico Maciço	11	-	-	-	0,13

A parede Sudoeste é composta apenas por envidraçados, de grande porte, cujo coeficiente de transmissão térmica é apresentado no subcapítulo 2.6.2.6.

2.6.2.3. Paredes do 1º Andar

As fachadas orientadas a Noroeste, Sudoeste e Nordeste têm a mesma constituição, sendo os seus materiais os seguintes.

Quadro 16 – Características dos materiais constituintes das paredes Noroeste, Sudoeste e Nordeste do 1º Andar

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Reboco	2	1,3	1900	900	-
Betão	20	2,0	2450	750	-
Vidro Celular	4	0,04	120	840	-
Reboco	2	1,3	1900	900	-

A fachada a Sudeste é a fachada que separa as habitações contíguas, ou seja, é um elemento adiabático que faz a separação entre dois espaços aquecidos. A sua constituição é a seguinte.

Quadro 17 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do 1º Andar

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Reboco	2	1,3	1900	900	-
Tijolo Cerâmico Maciço	11	-	-	-	0,13
Lã de Rocha	5	0,040	55	840	-
Tijolo Cerâmico Furado	15	-	-	-	0,39
Reboco	2	1,3	1900	900	-

2.6.2.4. Paredes Interiores

As paredes interiores, que fazem a divisão entre os vários compartimentos da habitação, têm a seguinte formação.

Quadro 18 – Características dos materiais constituintes das paredes interiores

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Reboco	2	1,3	1900	900	-
Tijolo Cerâmico Furado	11	-	-	-	0,27
Reboco	2	1,3	1900	900	-

2.6.2.5. Pavimentos

No piso 0 temos um pavimento radiante do tipo seco e um do tipo húmido.

No pavimento tipo seco (VH) estão presentes os seguintes materiais.

Quadro 19 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 0

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Soalho	2	0,23	810	1200	-
Espuma de Polietileno	0,3	-	-	-	0,44
Contraplacado de Choupo	1	-	-	-	0,07
Painel Poliestireno Expandido	1,5	-	-	-	0,33
Poliestireno Expandido EPS40	3	-	-	-	0,50
Laje de Betão	10	2,0	2450	750	-
Gesso	1,3	0,57	1150	840	-

No pavimento do tipo húmido (VV), o que esta presente na cozinha, tem-se a seguinte constituição.

Quadro 20 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo húmido (VV)

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Placas de Granito	2	0,69	1700	790	-
Argamassa de Enchimento	6,5	1,3	1900	900	-
Painel Poliestireno Expandido	1,5	-	-	-	0,33
Poliestireno Expandido	4	-	-	-	1,0
Laje de Betão	10	2,0	2450	750	-
Gesso	1,3	0,57	1150	840	-

No pavimento do 1º piso também se trata de um do tipo seco, mas como este separa ambientes aquecidos, as suas definições são ligeiramente diferentes do aplicado no rés-do-chão.

Quadro 21 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 1

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Soalho	2	0,23	810	1200	-
Espuma de Polietileno	0,3	-	-	-	0,44
Contraplacado de Choupo	1	-	-	-	0,07
Painel Poliestireno Expandido	1,5	-	-	-	0,33
Laje de Betão	10	2,0	2450	750	-
Gesso	1,3	0,57	1150	840	-

2.6.2.6. Envidraçados, Caixilharias e Dispositivos de Sombreamento

Os vãos envidraçados do rés-do-chão são duplos de 4 mm + 6 mm com caixa-de-ar de 12 mm. O coeficiente de transmissão térmica é 2,8 W/ (m².°C) e o factor solar 0,75 [17].

Ao nível do 1º piso, os vidros são duplos de 5 mm + 4 mm com 14 mm de caixa-de-ar. O coeficiente de transmissão térmica e o factor solar são iguais aos do rés-do-chão [18].

Quanto às clarabóias sabe-se que são vidro simples, reflectante verde de 6 mm de espessura, com um U=5,7 W/ (m².°C) e um factor solar de 0,36 [19].

Relativamente aos dispositivos de sombreamento, trata-se de estores exteriores em ripas horizontais de madeira. A largura das ripas é 3,0 cm, a distância entre ripas 2,5 cm e a espessura 3 mm. O coeficiente de transmissão térmica da madeira em uso é 0,9 W/m.°C.

3

ENERGYPLUS – SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

3.1. INTRODUÇÃO AO ENERGYPLUS

Um dos grandes problemas ecológicos dos nossos dias é o ritmo de exploração, degradação e destruição dos recursos naturais, ter-se tornado mais rápido do que a capacidade da Natureza para os repor, não garantindo a sustentabilidade do meio ambiente. Esta problemática conduziu a uma procura de soluções e, sucessivamente, à implementação de regras de monitorização, que permitam controlar os gastos de recursos naturais e o uso, sempre que possível, de energias renováveis.

Uma das formas de controlar os gastos energéticos numa habitação é através da simulação do seu comportamento térmico, recorrendo ao uso de ferramentas informáticas próprias, como o EnergyPlus.

O EnergyPlus é um programa que permite simular o comportamento térmico e energético de uma habitação, nomeadamente, em questões de aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e energia, possibilitando uma análise das várias características [20].

O programa não possui uma interface de fácil acesso ao utilizador, e é necessário introduzir se uma série de dados (*input*) de forma a ser possível a obtenção dos resultados pretendidos (*outputs*).

Podemos definir uma simulação energética com base numa metodologia de três passos. Primeiro é necessário criar o modelo no programa, introduzir os vários dados que definem o edifício, como é o caso da sua geometria, dimensões e constituição. Em segundo o programa corre a simulação calculando o proposto pelo utilizador, tendo em conta um ficheiro de dados climáticos proposto pelo mesmo. Por último, analisam-se os resultados e tiram-se as conclusões, elaborando, se for o caso, análises de sensibilidade das várias variáveis inerentes ao edifício.

3.2. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

No programa EnergyPlus é necessário que o utilizador indique um ficheiro de dados climáticos (*Weather File*) que juntamente com as definições das várias características do caso em estudo (*IDF Editor*), permitem alcançar o estudo do comportamento térmico e energético do edifício. Assim sendo, serão analisadas, passo a passo, a definição e a introdução, do necessário, ao programa correr a simulação da habitação H5.

Interface de lançamento do programa é apresentada na figura seguinte.

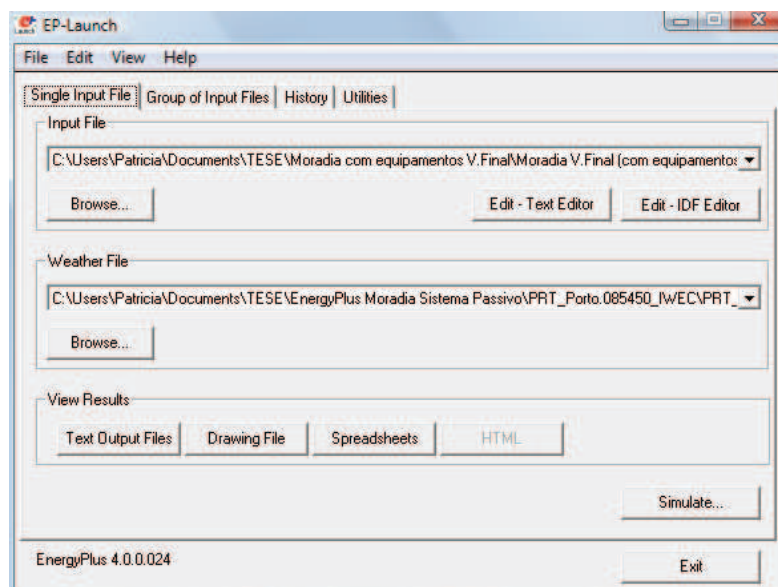


Fig. 57 – Interface de lançamento do programa

No campo “*Simulate*” dá-se início à simulação e no “*View Results*” visualizam-se os resultados da mesma.

3.3. FICHEIRO DE DADOS CLIMÁTICOS (“*WEATHER FILE*”)

Os dados climáticos são um dos parâmetros mais importantes na simulação térmica dos edifícios, principalmente quando o objectivo é o estudo do comportamento em condições de aquecimento e/ou arrefecimento e respectivo dimensionamento de sistemas de climatização.

Para que seja possível responder às necessidades do utilizador e às suas opções de simulação, o site distribuidor do EnergyPlus disponibiliza dois tipos de ficheiros. Um onde constam valores climáticos registados em tempo real, por estações meteorológicas estrategicamente posicionadas, e outro com base em dados estatísticos respectivos ao país e à zona em estudo. No presente trabalho usou-se o ficheiro climático elaborado estatisticamente, ou seja, a simulação será para um ano típico e não, especificamente, para o ano da presente dissertação [21].

As informações básicas incluídas, no ficheiro climático em uso, são a localização (Porto), fonte dos dados, latitude (N 41°13’), longitude (W 8° 40’), altitude (73 m acima da cota do mar), informações de horários, condições extremas (máximos e mínimos), dias especiais (feriados), luminosidade, períodos típicos e extremos e temperaturas do solo.

Os intervalos de tempo incluem temperaturas secas, temperaturas ponto de orvalho, humidade relativa, pressão atmosférica (100451 Pa), radiação solar (terrestre, infravermelha, directa e difusa), luminância, direcção e velocidade do vento, nuvens e dados do estado do tempo.

A fonte é também indicada no site e trata-se de dois anos de ficheiros/dados criados no Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI). Os dados têm por base dados públicos de tempo publicados pelo instituto de meteorologia de 1951-80, combinados com dados adquiridos pelo próprio INETI. Estes dados estão já convertidos no formato suportado pelo programa (.epw). O formato do ficheiro de clima é TMY (*Typical Meteorological Year*).

3.4. COMANDO “IDF EDITOR”

O comando “IDF Editor” divide-se em vários grupos de variáveis do edifício, subdividindo-se nos vários campos específicos.

No decorrer do presente trabalho surgiram dificuldades, não só ao nível de dados necessários, que não se encontravam disponíveis, como também complicações de interpretação do manual. Foi necessário o estudo de termos técnicos específicos e uma procura particular de características dos equipamentos presentes na habitação em estudo.

3.4.1. GRUPO “SIMULATION PARAMETERS”

3.4.1.1. Versão

A versão utilizada no presente trabalho é a 4.0.0.024. Trata-se, portanto, da versão mais recente, até à data, disponibilizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos [20]. Esta pode ser confirmada na parte inferior da Fig. 57.

3.4.1.2. Campo “Simulation Control”

Este campo permite definir condições de controlo da simulação, nomeadamente, se é pretendido o cálculo das dimensões em planta, da zona ou do sistema, permitindo, ainda especificar se a simulação será anual ou se será para um intervalo pré-definido.

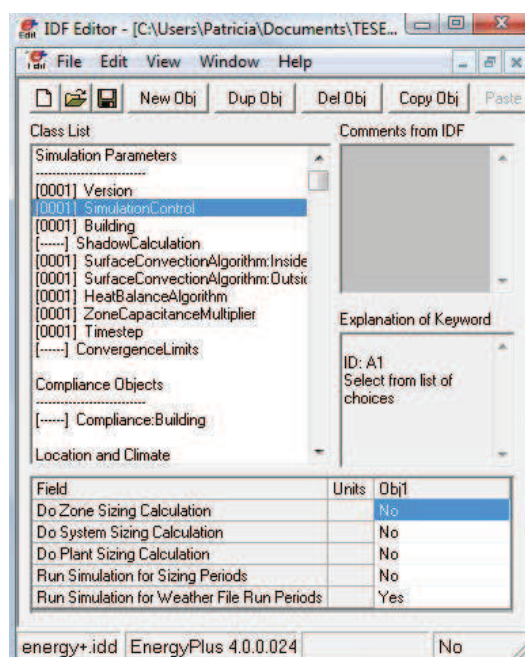


Fig. 58 – Campo “Simulation Control”

A simulação será anual e para um ficheiro climático, não para um período restrito de tempo e não serão calculadas dimensões

3.4.1.3. Campo “Building”

Permite definir parâmetros relativos ao edifício, como é o caso do ângulo em planta que o edifício faz com o Norte (30°), o tipo de meio envolvente (cidade), os valores de convergência, o tipo de distribuição solar e o máximo de dias de preparação da simulação.

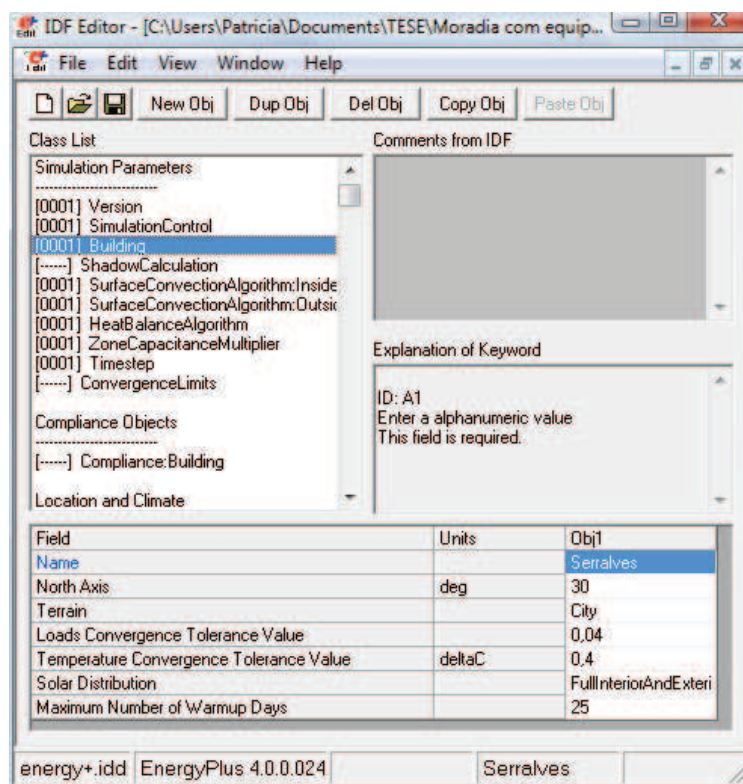


Fig. 59 – Campo “Building”

Relativamente à opção “*FullInteriorAndExterior*”, esta indica que existe sombreamento da radiação solar através de elementos exteriores horizontais e verticais, e que esta radiação incide não só no chão como, também, em superfícies como as paredes.

O máximo de dias de preparação da simulação (*Maximum Number of Warmup Days*) é relativo à complexidade do edifício e é pré-definido que 25 é o indicado para um edifício corrente. Mais do que 25 definiria um edifício bastante complexo, o que não é o caso.

3.4.1.4. Campo “Timestep”

Permite estipular como vêm apresentados os resultados. Definiu-se que o cálculo será em intervalos de tempo de 15 em 15 minutos, logo este será 4 (uma hora divide em 4 intervalos de 15 minutos).

3.4.2. GRUPO “LOCATION AND CLIMATE”

3.4.2.1. Campo “Run Period”

Onde são decididas características que definem a apresentação dos resultados. É o caso do dia e mês em que começa a simulação e o dia e mês em que esta termina. Como a simulação será anual, definiu-se que esta terá início no dia 1 de Janeiro e fim no dia 31 de Dezembro. É definido ainda que não se dá especial atenção a dias extraordinários, como é o caso dos fins-de-semana, férias ou feriados, e que o ficheiro de clima, em uso, tem em conta valores indicativos de neve e de vento.

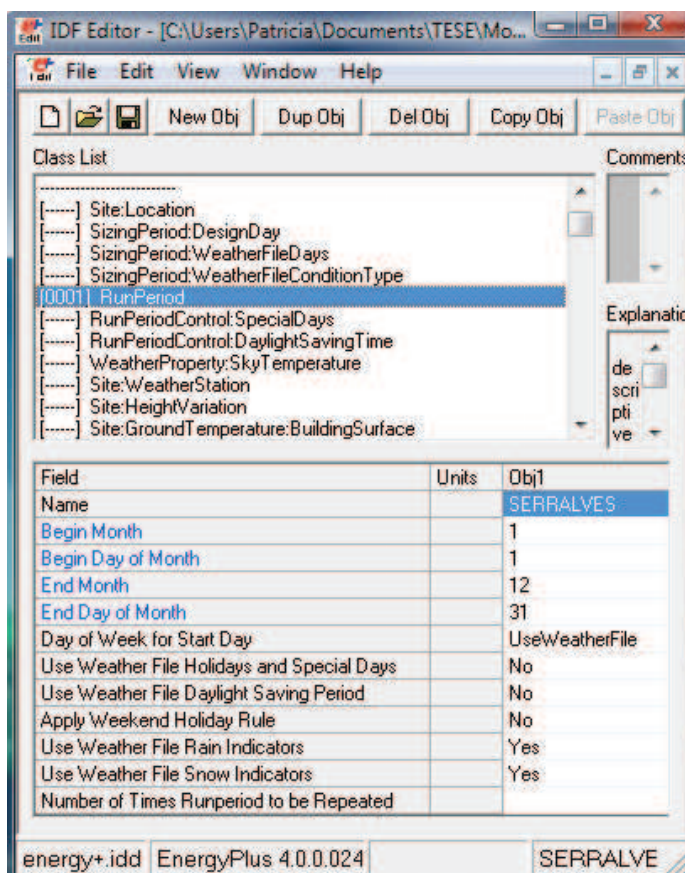


Fig. 60 – Campo “Run Period”

3.4.3. GRUPO “SCHEDULES”

3.4.3.1. Campo “Schedules: Type Limits”

Este campo permite ao utilizador influenciar horários de funcionamento ou activação dos vários sistemas implementados na habitação. Para tal, é necessário definir valores máximos e mínimos que funcionam, para o programa, como complemento a outros horários, definidos no campo “Schedules: Compact”, analisado no subcapítulo seguinte.

Para a simulação é necessária a definição de 5 intervalos de valores mínimos e máximos, são eles:

- o “ANYNUMBER”;
- o “ControlType”;
- o “Temperaure”;
- o “Fraction”;
- e, ainda, o “On/Off”.

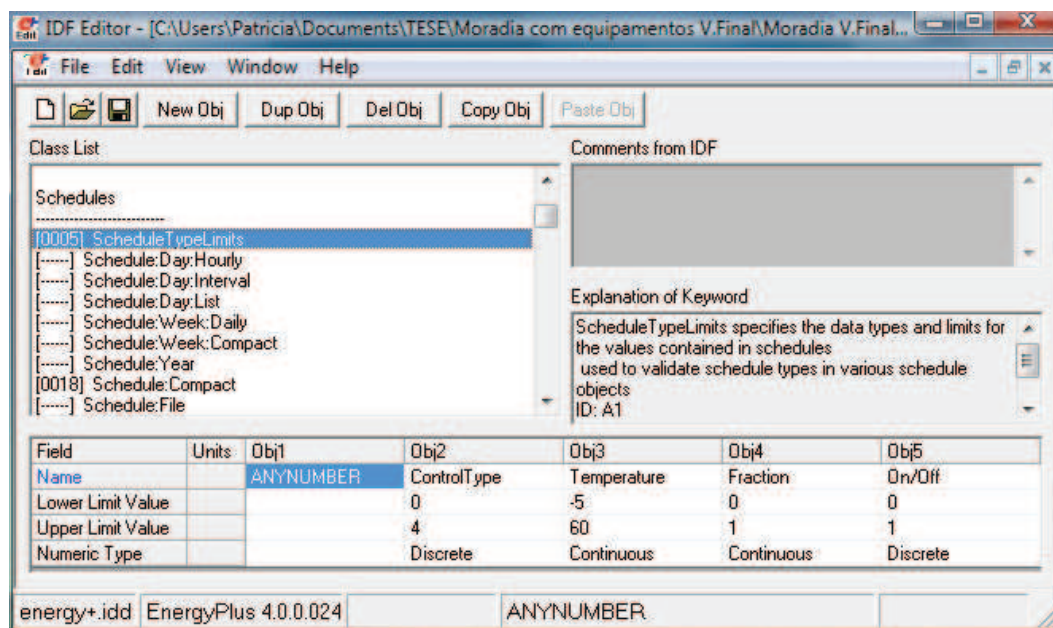


Fig. 61 – Campo “Schedules: Type Limits”

Veja-se, por exemplo, o intervalo “Control Type”. Este foi pensado para que fosse possível controlar o tipo de comportamento presente na habitação. Oscila entre 0 e 4 e só toma valores inteiros (*Discrete*). É particularmente importante no sentido em que permite saber se à zona estão impostos limites máximos e mínimos de temperatura, influenciando, directamente se está presente aquecimento ou arrefecimento simples, ou ainda, os dois.

Os valores que este assume traduzem o seguinte:

- 0 – Zona não controlada;
- 1 – Aquecimento simples;
- 2 – Arrefecimento simples;
- 3 – Aquecimento/Arrefecimento simples;
- 4 – Duplo controlo de Aquecimento/Arrefecimento.

3.4.3.2. Campo “Schedules: Compact”

Aqui são definidos os horários de funcionamento de cada item, as datas de início e de fim, se são tidos em conta dias especiais e ainda os valores limites que indicam ao programa, por exemplo, quando o sistema deve ligar/ desligar.

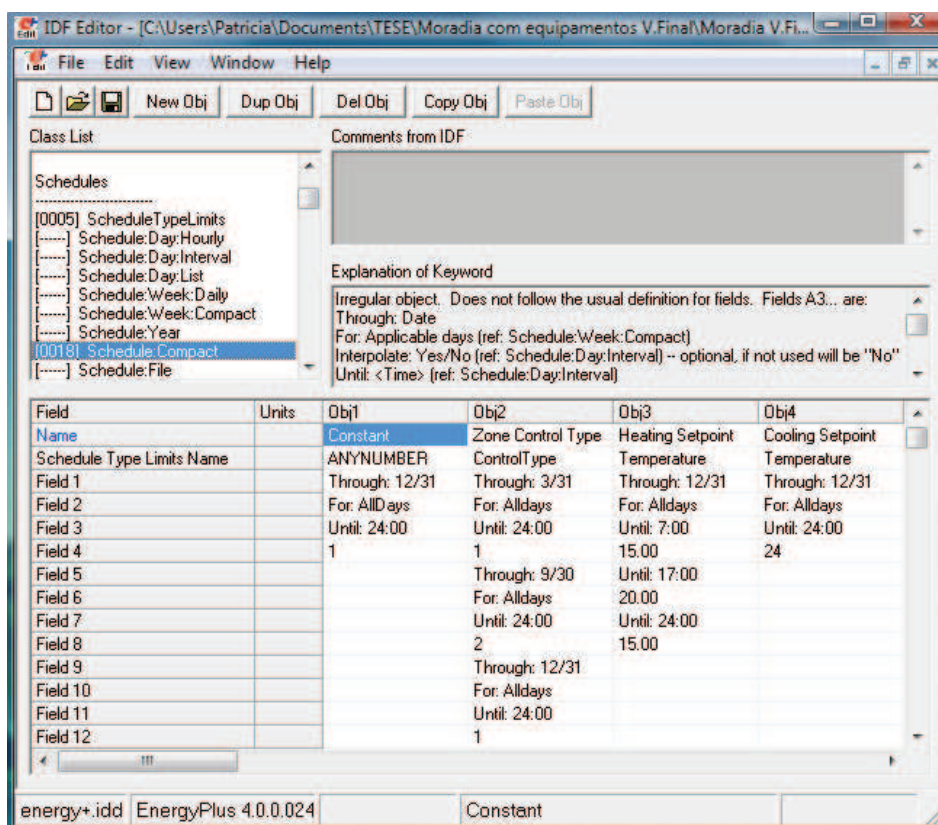


Fig. 62 – Campo “Schedules: Compact”

Veja-se, por exemplo, o horário definido por “Constant”. Pensado para apoiar os cálculos relativamente aos ganhos internos e à ventilação natural, os seus valores no campo anterior não estão limitados a um máximo ou a um mínimo (ANYNUMBER), mas sim definidos, no respectivo objecto, mais à frente, que as renovações horárias serão $0,6 \text{ h}^{-1}$ e os ganhos 4 W/m^2 . Isto ocorre durante todo o ano até dia 31 de Dezembro (Through:12/31), para todos os dias da semana (For:AllDays), até às 24 horas de cada dia (Until:24:00).

O horário designado por “Zone Control Type” foi pensado para que se pudesse definir o tipo de comportamento dos equipamentos de climatização no decorrer de um ano. De acordo com o ficheiro climático, o programa define este comportamento, sabendo que até dia 31 de Março predominará um (Through:3/31), de Março a Setembro tem-se outro (Through:9/30) e de Agosto até Dezembro o caso será ainda outro (Through:12/31).

3.4.4. GRUPO “SURFACE CONSTRUCTION ELEMENTS”

3.4.4.1. Campo “Material”

Neste campo introduzem-se os vários materiais constituintes de cada elemento estrutural, que contribuem, significativamente, para a inércia térmica. Estes elementos (paredes, pavimentos e cobertura) são ilustrados no Capítulo 2, e as propriedades e espessuras de cada camada são apresentadas no subcapítulo 2.6 – Parâmetros de Caracterização Energética.

Veja-se, por exemplo, o necessário à introdução no programa, do granito presente na parede Noroeste do rés-do-chão Quadro 13. De acordo com o quadro, a sua espessura é 20 cm, a condutividade 2,8 W/(m.°C), a densidade 2600 kg/m³ e o calor específico 790 J/(kg.K).

É necessário definir a rugosidade (*Roughness*) de cada material. Segundo definições do programa, esta depende da textura da superfície de contacto. No caso do granito, trata-se de um material rugoso.

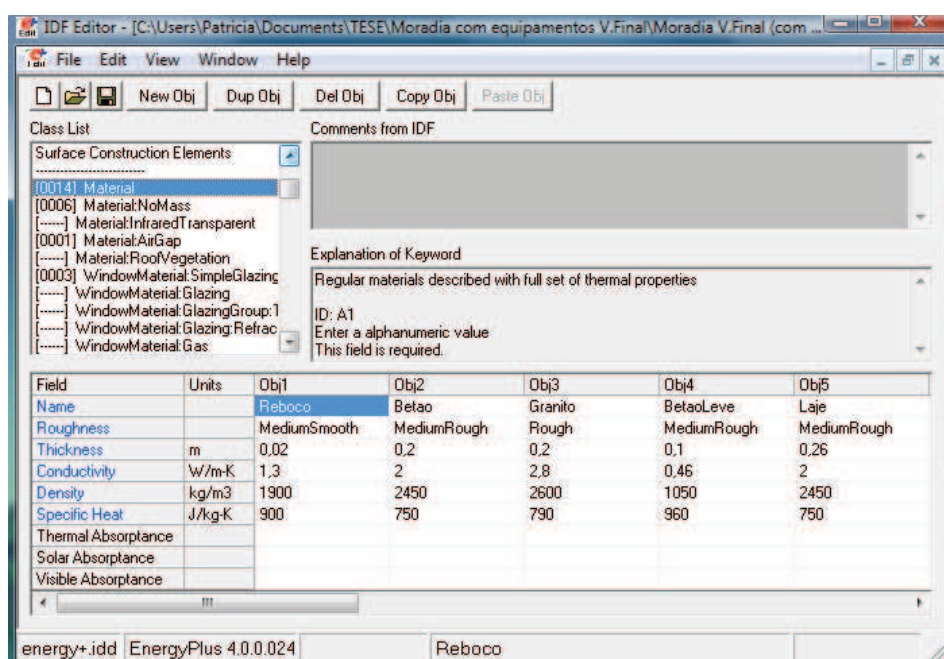


Fig. 63 – Campo “Material”

3.4.4.2. Campo “Material: No Mass”

Aqui são introduzidos os materiais cuja principal característica é a resistência térmica, R. Estes são de baixa densidade e a sua capacidade de retenção de calor é pequena.

O cálculo da resistência térmica duma camada do elemento da envolvente, resulta do quociente da espessura dessa camada e do coeficiente de condutibilidade térmica “λ” do material que a compõe. Estes valores foram retirados do ITE50 [14] e são apresentados no subcapítulo 2.6.

Neste campo estão definidas a textura e a resistência térmica dos seguintes materiais:

- Poliestireno Expandido (EPS);
- Espuma de Polietileno (Polietileno);
- Painel Poliestireno Expandido (XPS PAV);
- Lã de Rocha;
- Poliestireno Expandido (XPS);
- Contraplacado de choupo.

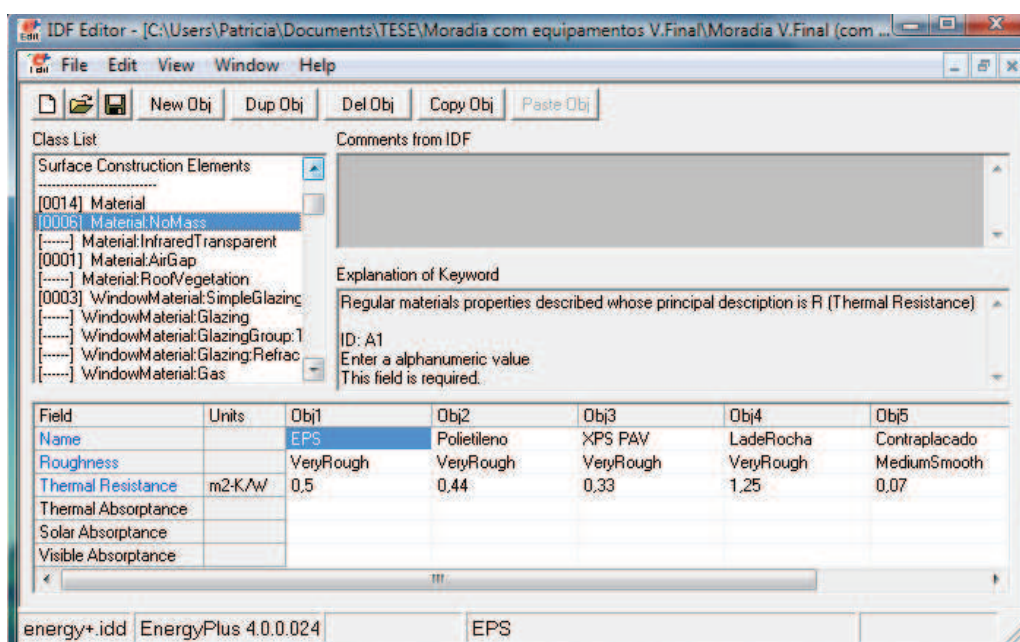


Fig. 64 – Campo “Material: No Mass”

3.4.4.3. Campo “Material: Air Gap”

Aqui são definidos os espaços de ar presentes nas paredes, pavimentos e cobertura. Assim sendo, introduziu-se apenas um objecto, a caixa-de-ar presente na parede Noroeste do rés-do-chão, sendo a sua resistência térmica 0,18 m²·K/W.

3.4.4.4. Campo “Window Material: Simple Glazing System”

Este campo é uma das novas funcionalidades presentes na versão 4.0.0.024. Trata-se da possibilidade de definir uma janela como um todo onde a principal característica é o coeficiente de transmissão térmica, U, do conjunto, em vez de obrigar à definição do vão por camadas.

Os coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados, presentes nos dois pisos da habitação, estão definidos no subcapítulo 2.6.2.6, assim como os respectivos factores solares.

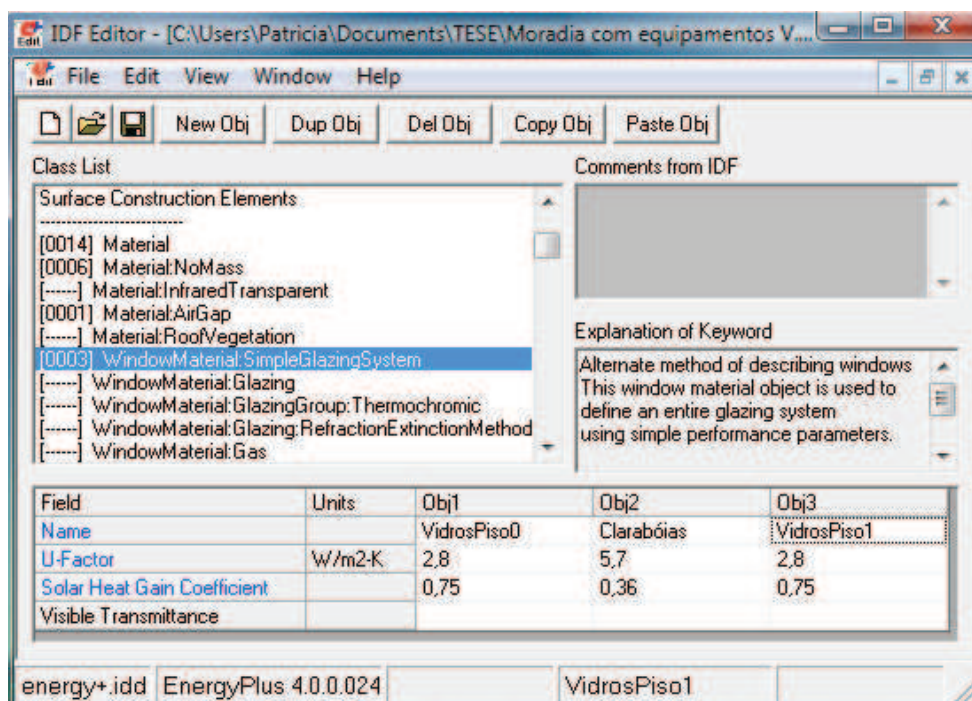


Fig. 65 – Campo “Window Material: Simple Glazing System”

3.4.4.5. Campo “Window Material: Blind”

Os elementos de sombreamento são definidos no presente campo. Estes têm como principais funções a redução da quantidade de radiação solar que entra na habitação, a minimização desejada da quantidade de luz (iluminação), o aumento da privacidade e, ainda, a diminuição das perdas pelos envidraçados.

Na habitação H5 estão colocados dispositivos exteriores de sombreamento em madeira, do tipo laminados, apenas nos envidraçados do piso 1. No piso 0 não existem elementos de sombreamento. Não está prevista a existência, de elementos de sombreamento interiores.

Para o EnergyPlus os dispositivos de sombreamento exteriores designam-se por “Blind,” os do tipo persiana por “Screen” e as cortinas por “Shade”. O programa faz ainda a distinção entre estores interiores (*Interior Blind*) e exteriores (*Exterior Blind*), sendo este último o caso em estudo.

Para a simulação foi necessário introduzir a largura das ripas (3,0 cm), a distância entre ripas (2,5 cm), a espessura (3 mm) e o coeficiente de transmissão térmica da madeira em uso (0,9 W/m.°C).

3.4.4.6. Campo “Construction”

A constituição das paredes, dos pavimentos, das coberturas e dos vãos envidraçados é definida neste campo usando os materiais anteriormente introduzidos. A metodologia seguida é a definição dos elementos por camadas (*Layers*) listando-as do exterior para o interior. O máximo de camadas, por elemento, permitidas pelo programa, é 10.

Veja-se, por exemplo, a definição da parede exterior do tipo I (*ExtWallTipoI*) na figura seguinte. Trata-se do nome de construção da parede que faz a separação entre as habitações contíguas, ou seja, da parede a Sudeste ao nível do 1º Piso.

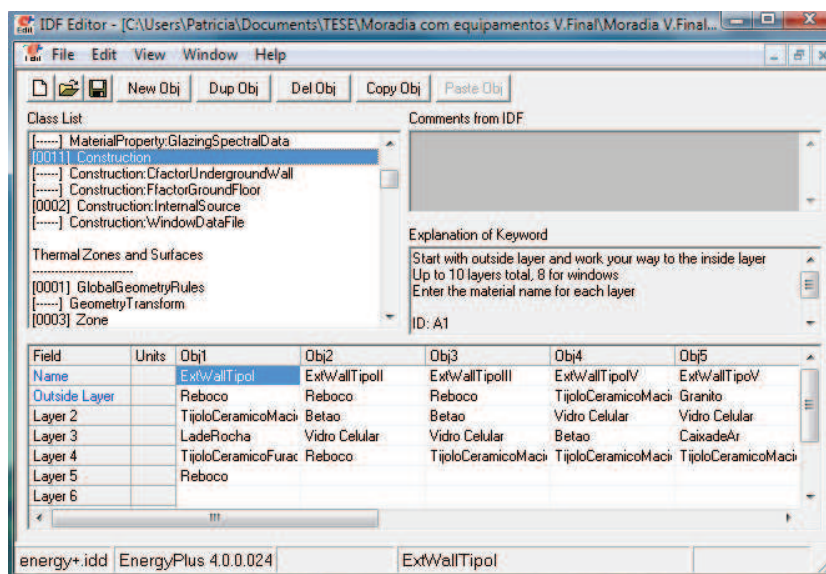


Fig. 66 – Campo “Construction”

Este tipo de parede decompõe-se em 5 camadas:

- Reboco;
- Tijolo Cerâmico Maciço de 11cm;
- Lã de Rocha;
- Tijolo Cerâmico Furado de 15cm;
- Reboco.

As várias camadas de material do elemento são aqui definidas seguindo a sua ordem real, de dentro para fora. Esta metodologia repete-se para as restantes paredes, pavimentos e cobertura. No caso dos envidraçados, definido o tipo e características dos vidros e dos dispositivos de sombreamento, constroem-se, também, por camadas, estes elementos. Veja-se a figura seguinte.

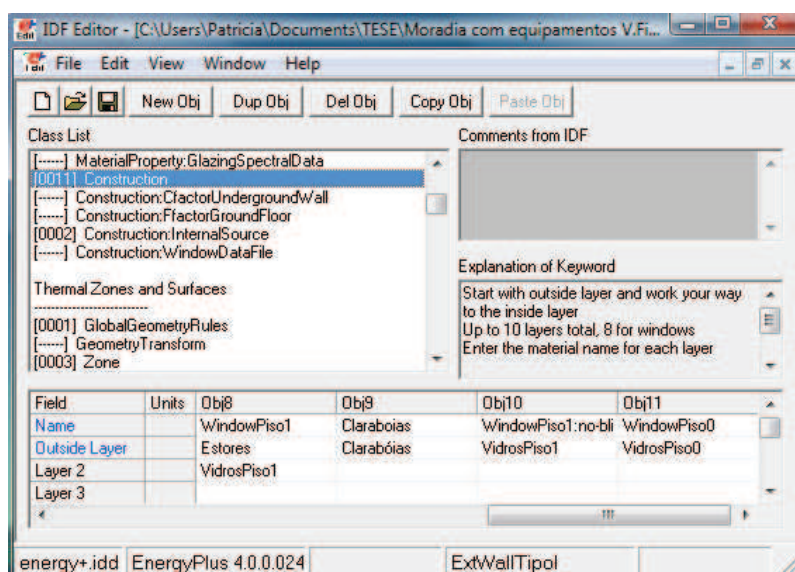


Fig. 67 – Campo “Construction” – Envidraçados

As janelas do piso 1 possuem um sistema de sombreamento (Estores), introduzido no subcapítulo 3.4.4.5. Para definir as janelas e os dispositivos de sombreamento foi necessário criarem-se dois objectos, o designado por “*WindowPiso1*” e o “*WindowPiso1:no-blind*”. Como estes interagem entre si e com o programa é explicado mais à frente, no decorrer do presente trabalho.

3.4.4.7. Campo “*Construction: Internal Source*”

Quando, em estudo, está presente um sistema radiante, na construção deste pavimento é necessário ter em conta a presença de tubos ou resistências. A metodologia de definição destes elementos é semelhante à do campo anterior, excepto algumas propriedades adicionais relativas ao sistema de climatização. Essas propriedades podem ser verificadas na figura seguinte.

Nota: Para o desenvolvimento da simulação da habitação H5, foi necessário dividi-la em 3 zonas. Uma zona é um espaço com propriedades térmicas específicas. A divisão em zonas, o porquê desta divisão e a solução adoptada serão explicadas no campo “*Zone*” apresentado em 3.4.5.2.

Para o presente subcapítulo esta nota é relevante, uma vez que no EnergyPlus foram introduzidos apenas dois tipos de pavimento radiante. De acordo com o Capítulo 2, estão instalados três tipos de pavimento, um na cozinha, outro na sala e outro no piso 1. Para o EnergyPlus existem apenas dois tipos, o da sala do rés-do-chão e o do piso 1. Esta solução foi adoptada porque para introduzir, também, o pavimento tipo da cozinha seria necessária a divisão da habitação não em 3 zonas, mas sim em 4. Além disso, como estes pavimentos são de características semelhantes, esta alteração não seria significativa.

Assim sendo, na simulação estão presentes o pavimento da sala (*FloorPiso0*) e o do 1º andar (*FloorPiso1*).

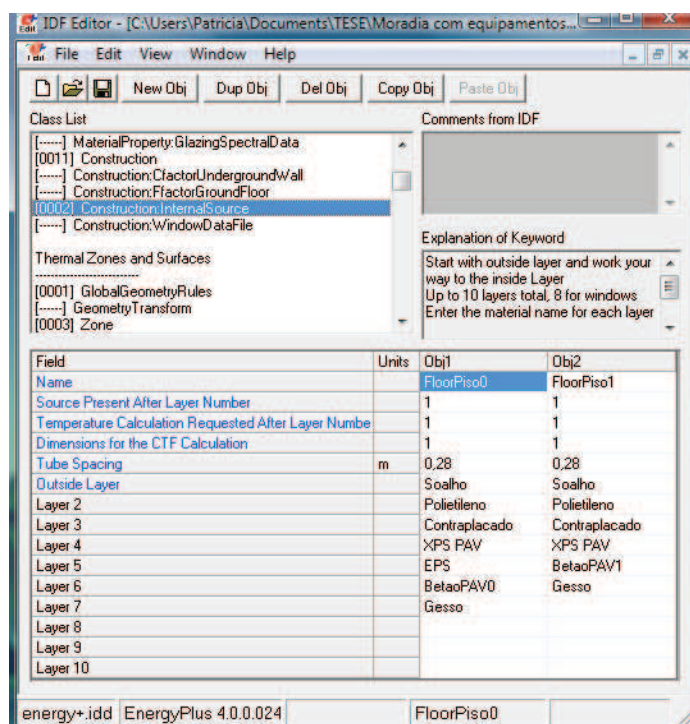


Fig. 68 – Campo “*Construction: Internal Source*”

Neste campo, para além das camadas de material que constituem os pavimentos, é necessário introduzir-se a localização dos tubos (*Source Present After Layer Number*). A introdução do valor 1 indica ao programa que os tubos estão entre a primeira e a segunda camada de material. O objecto “*Temperature Calculation Requested After Layer Number*” tem o mesmo propósito que o campo anterior. O valor de 1 significa o mesmo e tem especial importância no estudo das condensações no pavimento. O objecto “*Dimensions for the CTF Calculation*” tem como objectivo a definição do detalhe de cálculo. Aqui o valor 1 significa que estamos perante um sistema unidimensional de tubos. O objecto “*Tube Spacing*”, como o próprio nome indica, é o afastamento entre tubos, na direcção perpendicular à qual se dá a transferência de calor. Este afastamento pode ser observado na figura seguinte.

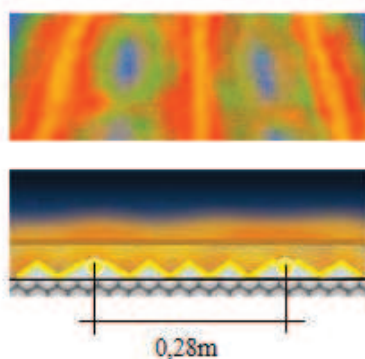


Fig. 69 – Comportamento térmico do sistema radiante implementado [7]

3.4.5. GRUPO “*THERMAL ZONES AND SURFACES*”

3.4.5.1. Campo “*Global Geometry Rules*”

Antes de se definirem as coordenadas do edifício, é necessário estipular parâmetros relativos à geometria.

A introdução da geometria do edifício é feita elemento a elemento, definindo cada vértice que os constituem. O primeiro vértice de cada elemento é o superior esquerdo, observando de fora para dentro, e segue a contagem no sentido inverso dos ponteiros do relógio.

As superfícies são medidas pelo exterior, incluindo as espessuras dos elementos.

Quanto às coordenadas, estas são do tipo X, Y, Z e são introduzidas pelo utilizador, o que obriga a definir, no programa, a opção “*Relative*”.

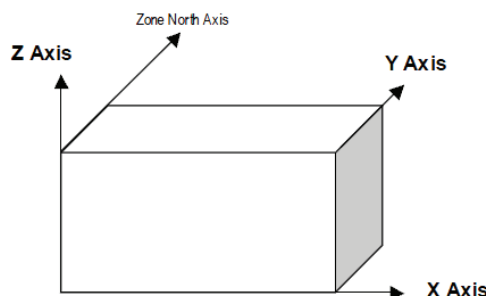


Fig. 70 – Sistema de coordenadas usado pelo EnergyPlus [22]

3.4.5.2. Campo “Zone”

Uma zona é um espaço com características térmicas próprias, ou seja, sempre que há uma mudança de elementos construtivos e/ou uma mudança no tipo de condição de contacto com o exterior, define-se uma zona.

Assim, dividiu-se a habitação em estudo em 3 zonas. A divisão entre o piso 0 e piso 1 é clara pela presença de diferentes constituições de paredes e pavimentos. O tecto do piso 0 é adiabático fazendo fronteira entre dois espaços aquecidos. O do piso 1 faz fronteira entre o interior e o exterior (cobertura).

Relativamente à terceira zona, trata-se do quarto nº 5. Este está em contacto com o exterior situando-se por cima do corredor de acesso comum às habitações. Este corredor é um espaço exterior apenas sujeito à acção do vento.

Todas as zonas têm origem no vértice (0,0,0).

3.4.5.3. Campo “Building Surface: Detailed”

Este campo é onde se erige o edifício propriamente dito. Vejamos o exemplo da parede Sudeste do piso 0. A esta foi dado o nome de SudestePiso0, o tipo de elemento é uma parede, o nome da construção a ela associada é “ExtWallTipoIII”. A zona onde esta se insere é a Piso 0, e está em contacto com o exterior (*Outdoors*). Os seus vértices são os apresentados no quadro seguinte.

Quadro 22 – Vértices da parede Sudeste do Piso 0

	V1	V2	V3	V4
X	13	13	13	13
Y	0	0	8,1	8,1
Z	2,45	0	0	2,45

Cada elemento está associado a um tipo de superfície (parede, chão, cobertura ou tecto) e a um nome de construção que identifica a sua constituição (subcapítulos 3.4.4.6. 3 e 3.4.4.7.)

Para superfícies comuns a duas zonas estas têm de estar repetidas, associando-se cada uma delas às respectivas zonas de contacto.

Quanto ao tipo de condição fronteira (*Outside Boundary Condition*), se for parede exterior ou cobertura é “*Outdoors*”, se for tecto é “*Celling*”, para o pavimento do piso 1 é “*Adiabatic*” e no caso do pavimento do piso 0 é “*Surface*”. A opção “*Surface*” é usada quando o elemento é fronteira entre duas zonas, mas só uma delas é significativa no cálculo da simulação térmica, ou seja, quando uma zona não é definida no programa por ser uma zona não aquecida, por exemplo, uma cave, cujo comportamento térmico não é relevante estudar. Ao colocar “*Surface*” o programa assume que a diferença de temperaturas entre as zonas não é de significativa diferença.

É ainda necessário definir a exposição ou não dos elementos à acção solar e à do vento. No caso de elementos exteriores, estes estão sujeitos a ambos, excepto o pavimento do quarto nº 5, uma vez que o corredor que fica por baixo é espaço exterior, mas não está sujeito à acção do sol e sim apenas à do vento. Quando são elementos interiores estes não estão sujeitos a nenhuma das acções anteriormente referidas.

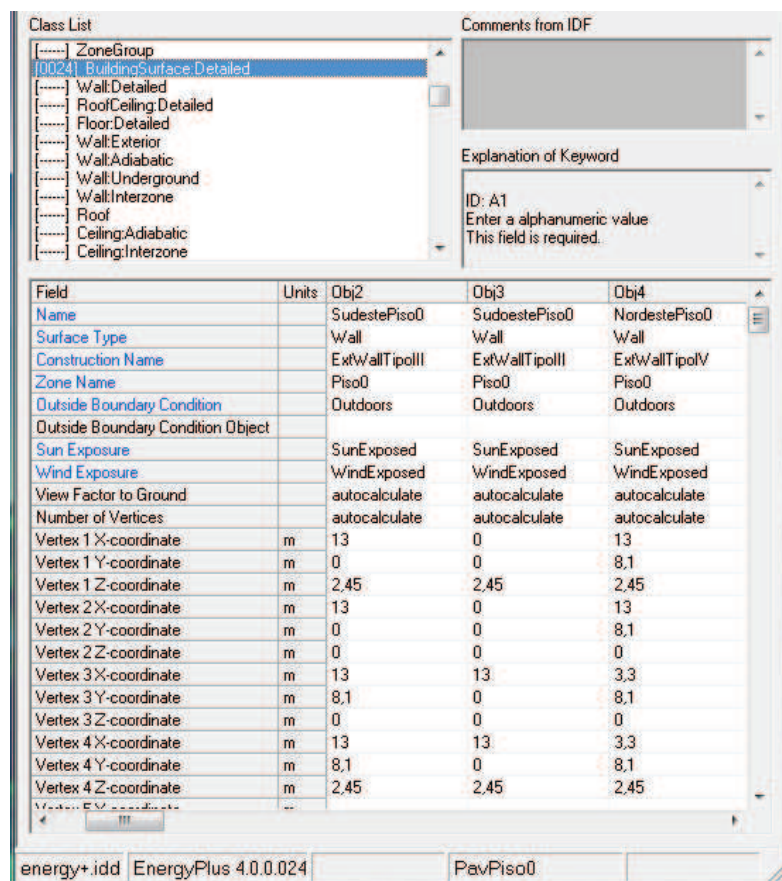


Fig. 71 – Campo “Building Surface: Detailed”

3.4.5.4. Campo “Fenestration Surface: Detailed”

Neste campo são definidos os vãos envidraçados e as clarabóias, ou seja, são caracterizados os elementos em que a incidência solar é relevante para o estudo térmico. A metodologia é semelhante ao campo anterior. Primeiro define-se o tipo de superfície, o nome da sua constituição, o elemento em que este objecto se insere, se tem sombreamento e, por fim, as suas coordenadas.

Veja-se o caso da clarabóia 1. Analisando a Fig. 72, conclui-se que esta é um tipo de envidraçado, está inserida na cobertura da zona Piso 1 e as suas coordenadas são as seguintes:

Quadro 23 – Vértices da clarabóia 1

	V1	V2	V3	V4
X	0,82	0,82	1,32	1,32
Y	4,88	4,38	4,38	4,88
Z	5,82	5,82	5,82	5,82

Para as restantes clarabóias ou envidraçados a metodologia é semelhante.

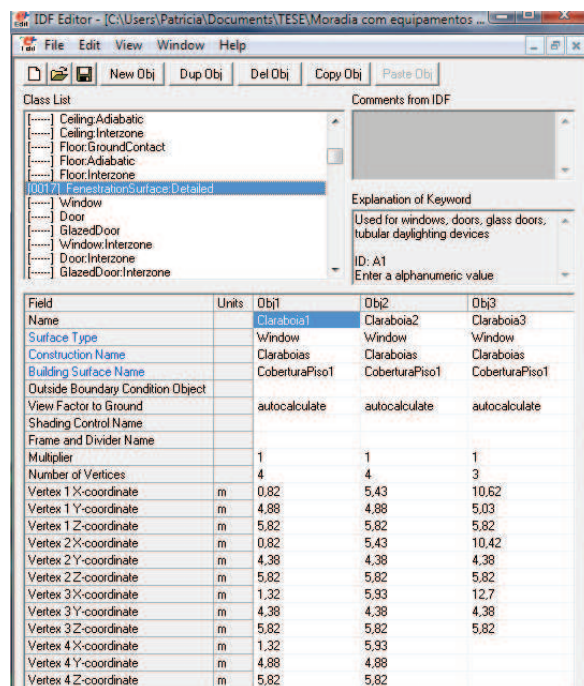


Fig. 72 – Campo “Fenestration Surface: Detailed”

Há apenas um caso particular, neste campo, que difere do método das clarabóias, são os envidraçados do 1º piso. Estes possuem dispositivos de sombreamento. A sua definição aparece no objecto “*Outside Boundary Condition Object*” onde é introduzido o nome de construção “*WindowPiso1*” (vide Fig. 73). Este objecto (*WindowPiso1*) é composto por duas camadas, Estores e VidrosPiso1.

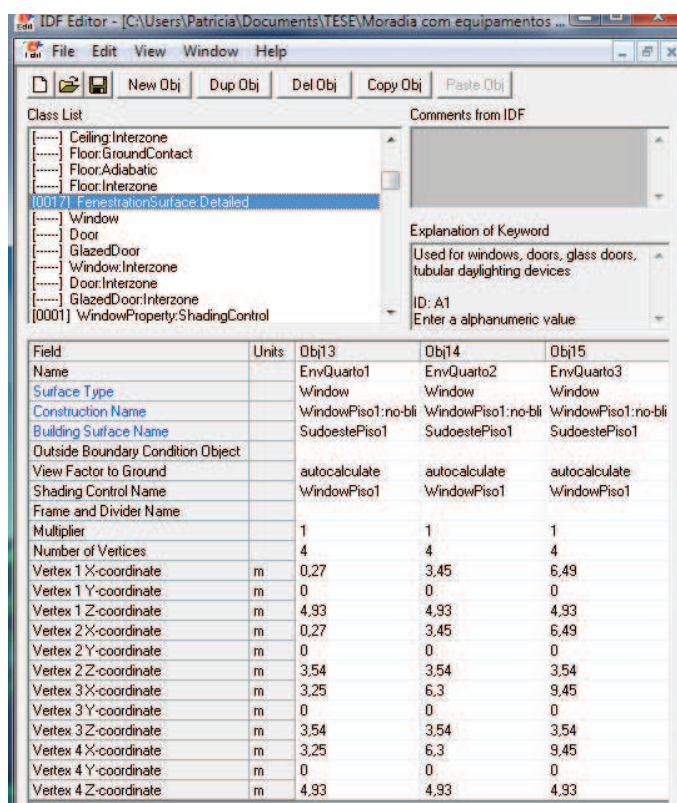


Fig. 73 – Campo “Fenestration Surface: Detailed” – Envidraçados Piso 1

3.4.5.5. Campo “Window Property: Shading Control”

Este campo permite definir o tipo de funcionamento dos dispositivos de sombreamento. Como neste caso são dispositivos fixos, pode dizer-se que está sempre em acção (*Always On*).

3.4.6. GRUPO “INTERNAL GAINS”

Os ganhos internos de um edifício podem ser devido à ocupação, à iluminação e/ou aos equipamentos, e contribuem para o aquecimento ambiente. Para a presente simulação adoptou-se o valor de 4W/m^2 [23].

3.4.7. GRUPO “ZONE AIRFLOW”

3.4.7.1. Campo “Zone Ventilation”

Conforme o descrito no subcapítulo 2.4, a ventilação é do tipo natural e está garantida pela presença de grelhas na parte superior dos vãos envidraçados e nos WC, e ainda pelo exaustor instalado na cozinha.

Para a simulação térmica do edifício considerou-se as renovações horárias iguais a $0,6\text{ h}^{-1}$ [10].

3.4.8. GRUPO “ZONE HVAC CONTROLS AND THERMOSTATS”

3.4.8.1. Campo “Zone Control: Thermostat”

Um sistema AVAC tem como objectivo manter as condições pretendidas de ambiente, num determinado espaço. Em quase todas as aplicações há um conjunto de opções possíveis que condicionam o seu dimensionamento para que o conforto desejado possa ser alcançado. Assim, um sistema AVAC é caracterizado por ser um método de controlo de aquecimento, arrefecimento, ventilação ou ar condicionado de uma determinada área.

No presente campo o objectivo é definir condições de controlo deste sistema, através dos intervalos horários definidos no campo “Schedule: Compact”.

3.4.9. GRUPO “ZONE HVAC RADIATIVE/ CONVECTIVE UNITS”

3.4.9.1. Campo “Zone HVAC: Low Temperature Radiant: Constant Flow”

Um sistema radiante é pensado no sentido de proporcionar certas condições de conforto. Este sistema transfere a maioria da sua energia a um espaço aquecendo ou arrefecendo a temperatura ambiente.

O sistema, instalado na habitação em estudo, será de caudal constante e para temperaturas médias. De acordo com as definições do próprio programa, é um do tipo “Low Temperature: Radiant Constant Flow”.

O diâmetro interno dos tubos é 16 mm [7]. O comprimento dos tubos, em cada zona, foi obtido através do programa de dimensionamento do pavimento mencionado em 2.5.2.1.

Houve valores que não se encontravam disponíveis para a simulação, pelo que se adoptaram os exemplos que o programa disponibiliza. Considera-se que tal é viável pois estando numa perspectiva de projectista é possível trabalhar com valores comuns, embora esses possam não corresponder, exactamente, ao que está instalado na realidade.

3.4.10. GRUPO “NODE-BRANCH MANAGEMENT”

Branches é o conjunto de componentes do sistema do circuito de água. Estes são uma informação básica necessária ao programa e definem a ordem em que funcionam. Este conjunto designa-se por ramificação e a cada ramo desta, está associado um ou mais componentes a trabalhar em série. No final, todos estes componentes formam um circuito. Os vários componentes estão ligados entre si através de nós, aos quais o programa chama de *Node*. A cada componente estão associados pelo menos dois nós, o de entrada e o de saída [24].

Mais uma vez, como se trata de informação indisponível foi adoptado o exemplo proposto pelo EnergyPlus.

3.4.11. GRUPO “PUMPS”

3.4.11.1. Campo “Pump: Variable Speed”

As bombas de circulação são impostas no presente campo. Estas têm como função impulsionar o líquido no circuito e trabalham em conjunto com o condensador. Existem vários tipos e modelos de bombas circuladoras disponíveis. Aqui adoptou-se uma bomba de velocidade variável [25]. Veja-se a figura seguinte.

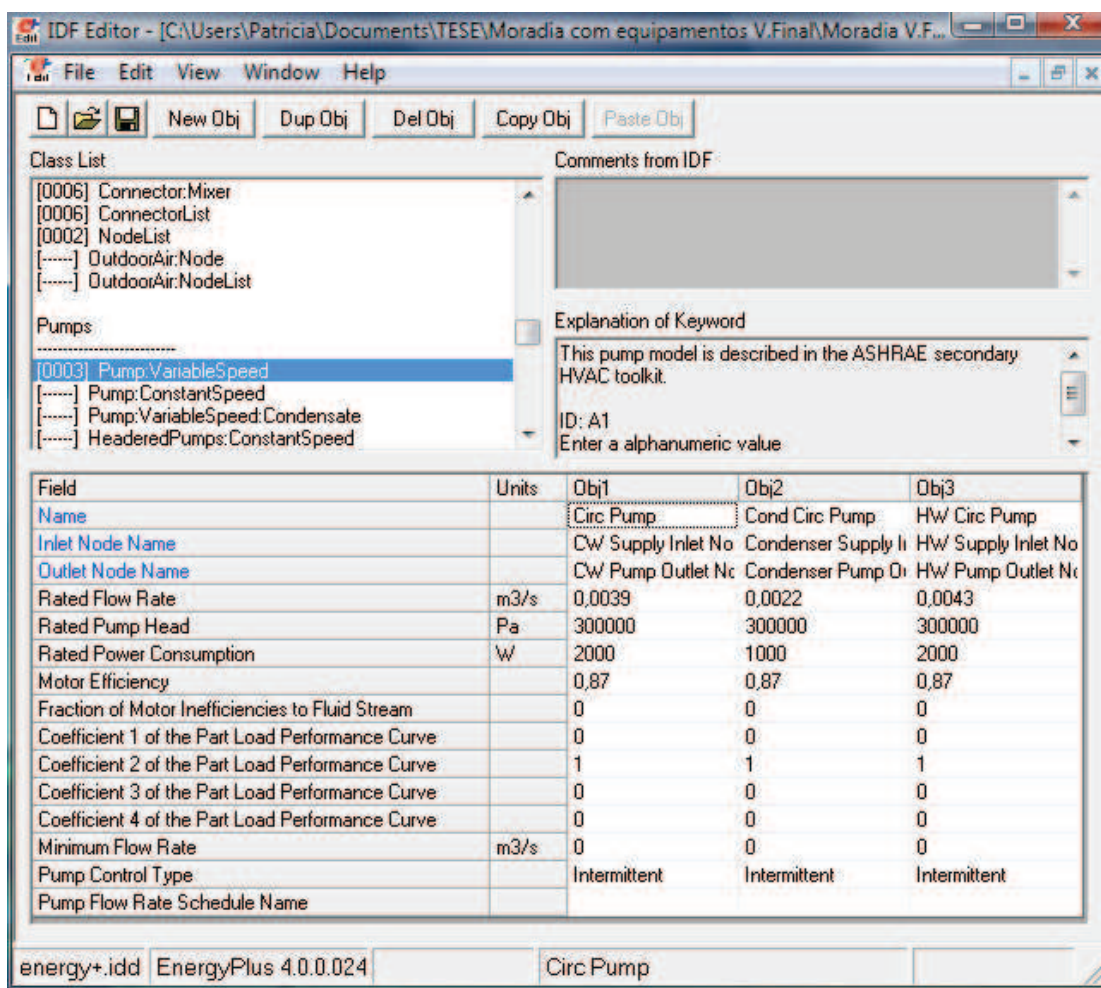


Fig. 74 – Campo “Pump: Variable Speed”

3.4.12. GRUPO “PLANT HEATING AND COOLING EQUIPMENT”

3.4.12.1. Campo “Chiller: Electric”

Este modelo é o modelo empírico das cargas e Termodinâmica *Building System* (BLAST) do programa. A sua capacidade, potência e plena carga são definidos por um conjunto de curvas de desempenho (quadrático). Estas curvas de desempenho são geradas por dados de catálogo apropriado para equações polinomiais de terceira ordem [26].

3.4.13. GRUPO “PLANT – CONDENSER CONTROL”

O campo “*Plant Equipment Operation Schemes*” é onde são definidos os regimes de funcionamento do circuito, ou seja, como já foi dito anteriormente, o objectivo deste sistema radiante é o aquecimento da temperatura ambiente na estação fria e o arrefecimento na estação quente. Assim sendo, deduz-se que os regimes serão de dois tipos, o de aquecimento e o de arrefecimento. A estes estão associados os respectivos circuito de equipamentos e componentes que permitirão a concretização dos objectivos.

O ligar ou desligar do sistema também se inclui nos objectivos deste campo. Definiu-se que o sistema quando estivesse On estaria para toda a habitação e Off, pelo mesmo raciocínio, desligado para todo o edifício.

3.4.14. GRUPO “SETPOINT MANAGERS”

Aqui são definidos os controlos principais do sistema e é indicado ao programa quando este deve ligar ou desligar o pavimento radiante, uma vez que foram atingidos os níveis de temperatura desejados [27].

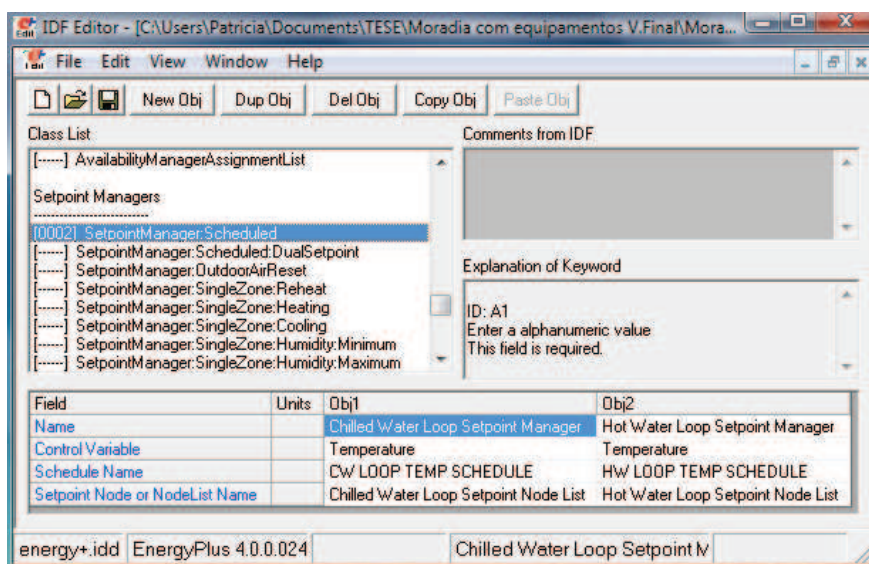


Fig. 75 – Grupo “Setpoint Manager: Scheduled”

3.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Introduzidos os dados necessários à simulação e indicado o ficheiro climático procedeu-se à simulação. O resultado foi sem qualquer tipo de erro ou aviso, o que, segundo o EnergyPlus, significa que não houve má interpretação dos dados necessários ao programa e que não há discrepâncias ou anomalias em valores que são introduzidos mais que uma vez.

Em relação aos resultados da simulação, o utilizador tem a liberdade de optar pelos que mais lhe convêm para tirar as suas conclusões, definindo-os no campo “*Output: Variable*”. Neste caso decidiu-se estudar os seguintes:

- Humidade relativa interior (*Zone Air Relative Humidity*);
- Humidade relativa exterior (*Outdoor Relative Humidity*);
- Temperatura do ar interior (*Zone/Sys Air Temperature*).

No cumprimento dos objectivos propostos, estudar-se-á estes valores horários para uma simulação anual.

O programa, no final de cada simulação, dispõe os resultados. Observe-se o resultado da geometria da habitação, em formato CAD, para cada orientação.

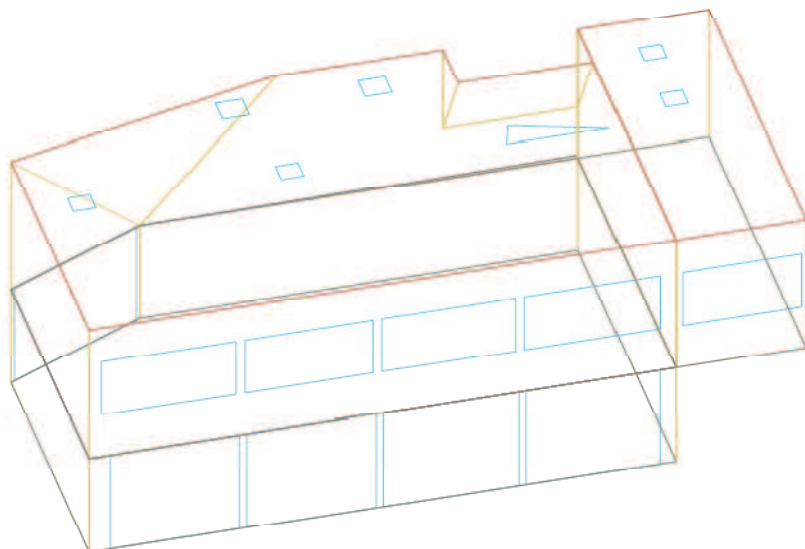


Fig. 76 – Orientação Sudoeste (CAD)

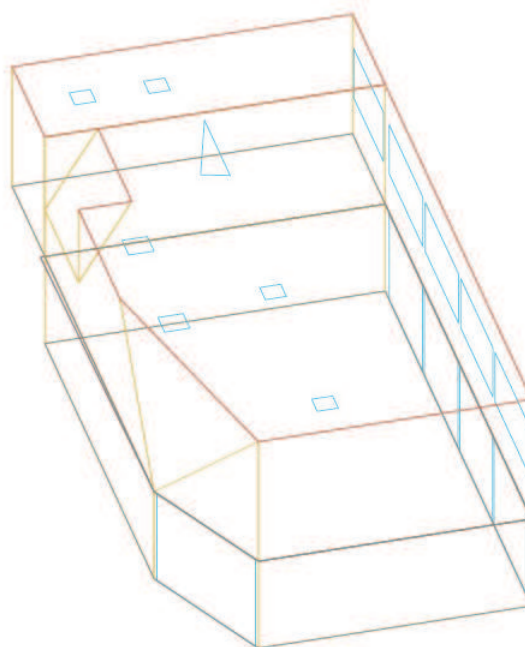


Fig. 77 – Orientação Nordeste (CAD)

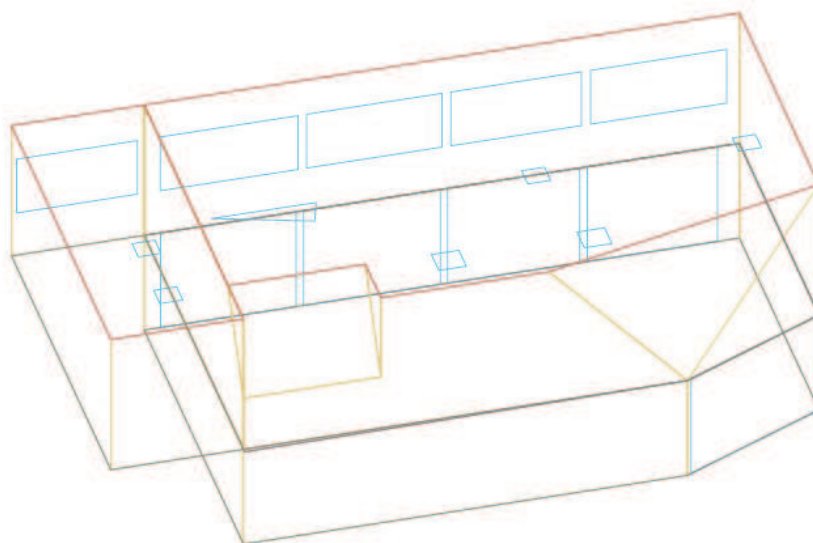


Fig. 78 – Orientação Noroeste (CAD)

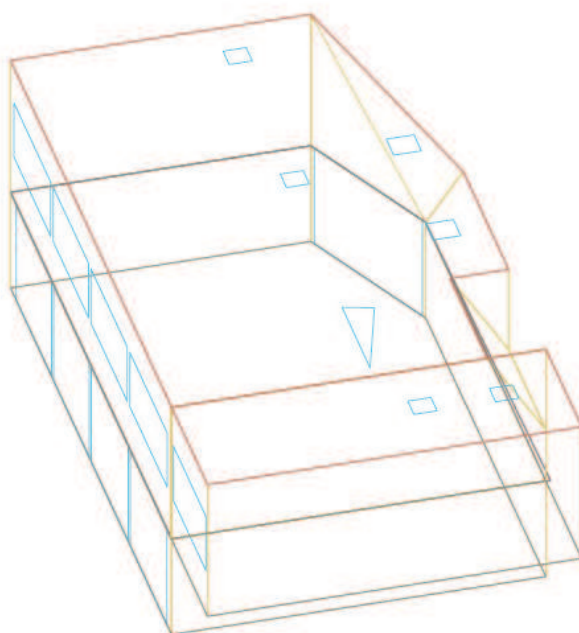


Fig. 79 – Orientação Sudeste (CAD)

Os resultados dos parâmetros em estudo para cada zona são apresentados nas figuras seguintes.

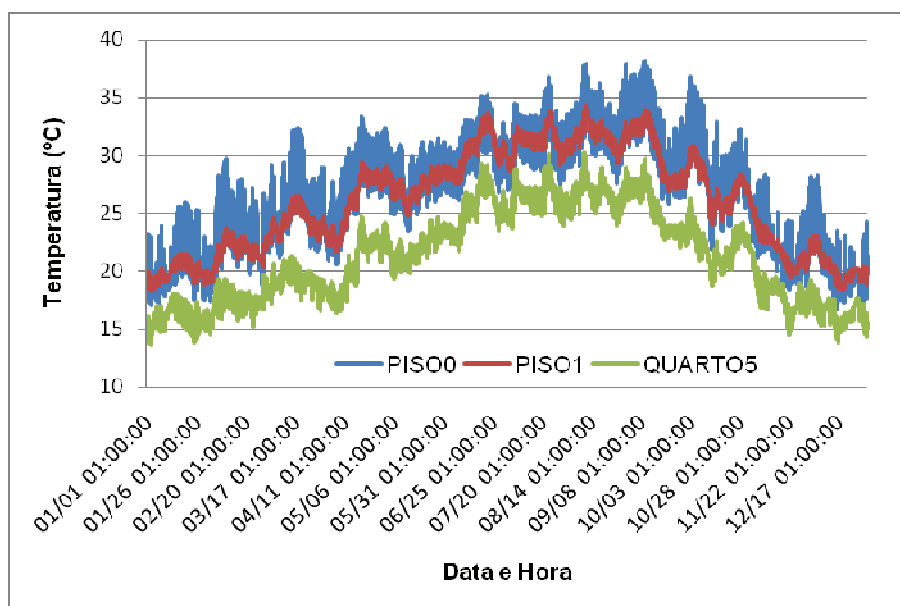


Fig. 80 - Temperaturas do ar interior com o sistema de climatização ligado

Observando a Fig. 80, concluiu-se que as temperaturas interiores atingem, aproximadamente, 15 e 38°C no mínimo e no máximo, respectivamente. Estas temperaturas estão afectadas do funcionamento do sistema de climatização.

A zona Quarto 5 atinge valores menores de temperaturas máximas e mínimas, isto pode deve-se ao facto de se tratar do único quarto da habitação que está em contacto com o exterior, através do pavimento. Isto também pode indicar que a potência do sistema nesta zona é insuficiente. Convém, ainda, ter em consideração que esta zona tem menor área de envidraçado que a zona Piso 1 e a zona Piso 0, e que para além disto, ainda difere da zona Piso 0 na existência de elementos de sombreamento.

Relativamente à zona Piso 0 e Piso 1, estas apresentam temperaturas, aproximadamente, de 25°C na estação de aquecimento, o que pode ser indicativo que o sistema de climatização não cumpre a sua função. Quanto à estação de arrefecimento apresentam temperaturas acima dos 30°C, porque talvez devido à presença de envidraçados de áreas significativas, que conduzem a elevados ganhos solares, a operação do sistema de climatização fica comprometida. Isto pode, ainda, dever-se a algum dado mal dimensionado ou erradamente estabelecido durante a simulação, pelo que o aprofundamento do estudo da simulação seria algo muito interessante como projecto futuro a ser desenvolvido.

Optou-se, ainda, por simular o comportamento da habitação com o sistema desligado, obtendo-se os resultados de temperaturas interiores apresentados na figura seguinte.

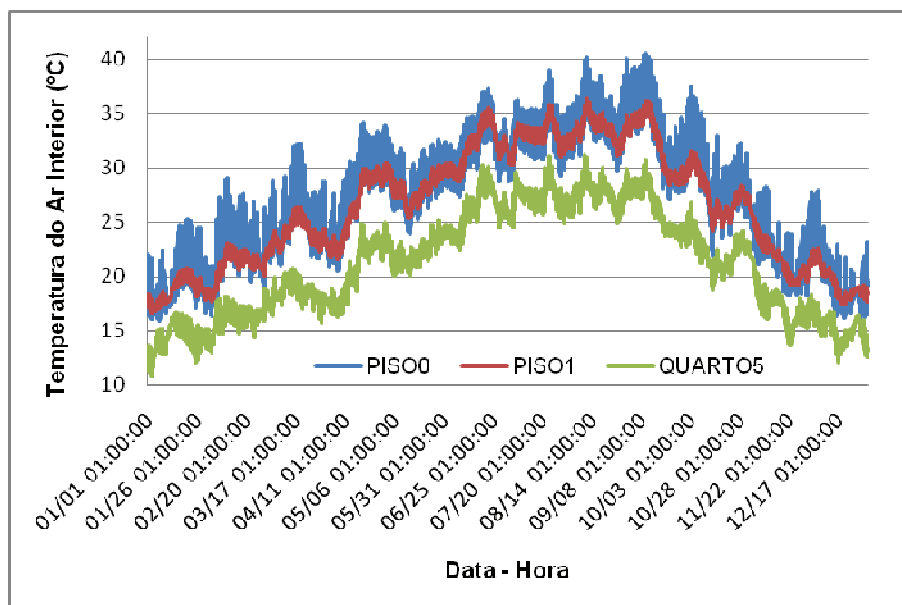


Fig. 81 – Temperaturas do ar interior com o sistema de climatização desligado

Observa-se que no Inverno com o sistema desligado, a temperatura chega, quase, a atingir os 10 °C. Já no Verão, mais propriamente nos meses de Agosto e Setembro, chegam a ser atingidas temperaturas de 40°C. Estes valores podem ser justificados pela quantidade de envidraçados, orientados a Sudoeste, que existe na habitação. Não se pode descurar, ainda, que nesta simulação também foram considerados ganhos internos de 4W/m^2 , o que também contribui para o aumento das temperaturas do ar interior.

Na simulação, o utilizador tem de definir o tipo de controlo de temperatura que indica ao sistema do pavimento radiante quando este deve iniciar ou encerrar. Para tal foram introduzidas temperaturas de conforto ao programa às quais se dá o nome de “Setpoints”. O funcionamento deste sistema de controlo pode ser interpretado nas figuras seguintes.

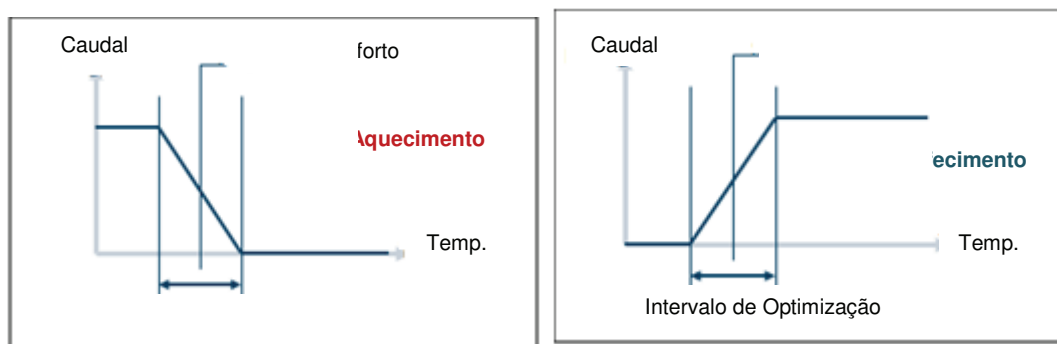


Fig. 82 - Funcionamento do sistema com Setpoints [28]

O que se conclui das figuras anteriores é que o sistema assume um intervalo de optimização, tendo por base a temperatura de conforto (*Setpoint Temperature*) para a estação de aquecimento (*Heating*) e para a de arrefecimento (*Cooling*). Quando a temperatura do ar interior atinge um determinado valor, por exemplo de 22 °C, na estação de arrefecimento, esse valor apesar de ser mais baixo que os 25 °C do “*Setpoint*”, funciona como indicador para o sistema começar arrefecer. O mesmo raciocínio aplica-se na estação de aquecimento.

Importa, ainda, referir, que no âmbito do trabalho apresentado, foram estudados os resultados da simulação referentes aos consumos energéticos. Estes consumos são traduzidos em necessidades nominais de energia útil, de aquecimento e arrefecimento, e têm como objectivo serem comparados com os resultados, das necessidades energéticas, obtidos pelo método de cálculo do RCCTE. Estes cálculos e resultados são apresentados no Capítulo 6.

4

RCCTE - SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

4.1. ENQUADRAMENTO

O presente capítulo assenta na conformidade do comportamento térmico da habitação em estudo, relativamente ao RCCTE [2].

Inclui uma descrição das características térmicas dos elementos da envolvente, a quantificação dos diferentes parâmetros térmicos, a determinação das necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}) e de arrefecimento (N_{vc}), a quantificação das necessidades nominais para produção de água quente sanitária (N_{ac}) e ainda o cálculo das necessidades nominais globais de energia primária (N_{tc}).

Pretende-se, assim, obter uma comparação de necessidades energéticas com as obtidas pela simulação efectuada com o programa EnergyPlus, apresentada e descrita no Capítulo 3.

A localização, bem como as características e tipologia da habitação em estudo, encontram-se apresentadas no Capítulo 2 do presente trabalho.

As exigências do RCCTE aplicam-se apenas a espaços onde se impõem condições interiores de conforto, designados como “espaços úteis”. Os espaços aos quais não se aplicam estas condições consideram-se espaços “não úteis” e não podem ser incluídos no cálculo dos valores de N_{ic}, N_{vc} e N_{tc}. Na aplicação do RCCTE, ao edifício em estudo, considerou-se que todo o piso da cave corresponde a um espaço “não útil”.

4.2. DADOS CLIMÁTICOS

4.2.1. ZONA CLIMÁTICA

Para efeitos do RCCTE, o país é dividido em três zonas climáticas de Inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de Verão (V1, V2 e V3). A fracção autónoma em estudo pertence à zona climática de Inverno “I2” e à zona climática de Verão “V1” (Quadro III.1 do RCCTE).

4.2.2. GRAUS – DIAS DE AQUECIMENTO (GD)

Os graus-dias de aquecimento caracterizam a severidade de um clima durante a estação de aquecimento. Para o edifício em estudo, o número de graus-dias de aquecimento é igual a 1610 °C.dias (Quadro III.1 do RCCTE).

4.2.3. DURAÇÃO DA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

A duração da estação de aquecimento para a fracção em estudo é igual a 6,7 meses (Quadro III.1 do RCCTE).

4.2.4. ENERGIA SOLAR INCIDENTE NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

Como já foi mencionado, a habitação encontra-se na zona climática I2, logo a energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento (G_{sul}) é de 93 kWh/m².mês (Quadro III.8 do RCCTE).

4.2.5. INTENSIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR PARA A ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

A intensidade da radiação solar para a estação de arrefecimento do local em estudo é consultada no Quadro III.9 do RCCTE.

Como a fracção se situa a Norte, na zona climática V1, a intensidade da radiação solar é a indicada no quadro seguinte.

Quadro 24 – Intensidade da radiação solar para a estação de arrefecimento

Zona Climática	Intensidade da Radiação Solar – I_r [kWh/m ²]								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Horiz.
V1 - N	200	300	420	430	380	430	420	300	730

4.2.6. TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DO AR PARA A ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

De acordo com o Quadro III.9 do RCCTE, tratando-se da zona climática V1 – Norte, a temperatura do ar exterior para a estação convencional de arrefecimento é igual a 19°C.

4.3. REQUISITOS ENERGÉTICOS – EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES

Segundo o RCCTE, para que o edifício esteja em conformidade com o estipulado por lei, as necessidades nominais anuais de energia (N_{ic} , N_{vc} , N_{ac} e N_{tc}) não podem exceder os valores máximos admissíveis (N_i , N_v , N_a e N_t).

As folhas de cálculo, respeitantes à metodologia do RCCTE, encontram-se apresentadas em Anexo.

4.3.1. NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA AQUECIMENTO - N_i

4.3.1.1. Factor de Forma (FF)

Segundo o RCCTE Anexo II, o factor de forma da presente habitação é igual a 1,04 m⁻¹.

4.3.1.2. Quantificação de N_i

De acordo com o artigo 15º do RCCTE, as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_i) são iguais a 99,23 kWh/(m².ano).

4.3.2. NECESSIDADES NOMINAIS ANUAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA ARREFECIMENTO - Nv

O valor limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento (Nv) de uma fracção autónoma depende apenas da sua zona climática (artigo 15º do RCCTE).

$$\text{Zona V1 (Norte)} \Rightarrow N_v = 16 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$$

4.3.3. LIMITAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ENERGIA PARA PREPARAÇÃO DAS AQS - Na

O limite máximo das necessidades de energia para preparação das águas quentes sanitárias (Na) da fracção autónoma, segundo o artigo 15º do RCCTE, é 396,51 kWh/(m²·ano).

4.3.3. LIMITAÇÃO DAS NECESSIDADES NOMINAIS GLOBAIS DE ENERGIA PRIMÁRIA - Nt

As necessidades nominais anuais globais (Ntc) da habitação, em estudo, não podem exceder um valor máximo admissível de energia primária (Nt), calculado com base nos valores de Ni, Nv e Na (artigo 15º do RCCTE). Assim sendo Nt é igual a 54,57 (kgep/m²·ano).

4.4. QUANTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS

4.4.1. COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA - U

Utilizando os quadros apresentados no subcapítulo 2.6, onde constam as características dos vários materiais constituintes dos elementos construtivos, precedeu-se ao cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (U), necessários para a verificação da conformidade com o RCCTE.

4.4.1.1. Cobertura

Quadro 25 – Características dos materiais constituintes da cobertura

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/(m.°C),	kg/m ³	J/(kg.K)	(m ² .°C/W)
Lajeta Flutuante	2	-	-	-	-
Poliestireno Extrudido	8	0,037	33	1210	2,16
Betão Leve	10	0,046	1050	960	-
Laje	26	2,0	2450	750	-
Reboco	1,5	1,3	1900	900	-

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,08}{0,037} + \frac{0,10}{0,46} + \frac{0,26}{2,0} + \frac{0,015}{1,3} + 0,10} = 0,376 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (1)$$

4.4.1.2. Paredes do Rés-do-Chão

As paredes do rés-do-chão que entram nos cálculos do RCCTE são a Noroeste, a Sudeste e a Nordeste. A fachada orientada a Sudoeste não entra porque é praticamente constituída apenas por envidraçados.

Assim sendo, são apresentados, de seguida, os cálculos de cada U respectivo.

Quadro 26 – Características dos materiais constituintes da parede Noroeste do rés-do-chão

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Granito	20	2,8	2600	790	-
Vidro Celular	4	0,04	120	840	1,0
Caixa-de-ar	5	-	-	-	0,18
Tijolo Cerâmico Maciço	11	0,846	1800	920	0,13

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,20}{2,8} + \frac{0,04}{0,04} + 0,18 + 0,13 + 0,13} = 0,644 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (2)$$

Quadro 27 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do rés-do-chão

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Reboco	2	1,3	1900	900	-
Betão	20	2,0	2450	750	-
Vidro Celular	4	0,04	120	840	1,0
Tijolo Cerâmico Maciço	11	0,846	1800	920	0,13

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,02}{1,3} + \frac{0,20}{2,0} + \frac{0,04}{0,04} + 0,13 + 0,13} = 0,707 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (3)$$

Quadro 28 – Características dos materiais constituintes da parede Nordeste do rés-do-chão

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Tijolo Cerâmico Maciço	11	0,846	1800	920	0,13
Vidro Celular	4	0,04	120	840	1,0
Betão	20	2,0	2450	750	-
Tijolo Cerâmico Maciço	11	0,846	1800	920	0,13

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,04}{0,04} + \frac{0,20}{2,0} + 0,13 + 0,13} = 0,654 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (4)$$

4.4.1.3. Paredes do 1º Andar

Relativamente ao piso 1, é necessário o cálculo de U para todas as fachadas, não esquecendo que a fachada a Sudeste é aquela que faz a divisão entre as habitações contíguas ($R_{se} = R_{si}$).

Como anteriormente, também, são aqui usados, os quadros constantes do subcapítulo 2.6 referenciando as características térmicas de cada material que constituiu os elementos construtivos do 1º piso.

Quadro 29 – Características dos materiais constituintes das paredes Noroeste, Sudoeste e Nordeste do 1º Andar

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Reboco	2	1,3	1900	900	-
Betão	20	2,0	2450	750	-
Vidro Celular	4	0,04	120	840	1,0
Reboco	2	1,3	1900	900	-

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,04 + 0,13 + \frac{0,04}{0,04} + \frac{0,20}{2,0} + 0,13 + 0,13} = 0,769 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (5)$$

Quadro 30 – Características dos materiais constituintes da parede Sudeste do 1º Andar

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Reboco	2	1,3	1900	900	-
Tijolo Cerâmico Maciço	11	0,846	1800	920	0,13
Lã de Rocha	5	0,040	55	840	1,25
Tijolo Cerâmico Furado	15	0,385	1200	920	0,39
Reboco	2	1,3	1900	900	-

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,13 + \frac{0,02}{1,3} + 0,13 + \frac{0,05}{0,04} + 0,39 + \frac{0,02}{1,3} + 0,13} = 0,485 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (6)$$

4.4.1.3. Pavimentos

Conforme já mencionado, na presente dissertação, existem três tipos de pavimentos radiantes instalados na habitação, mas convém lembrar que devido à separação em zonas, da habitação, para a simulação no EnergyPlus, simplificou-se o caso e trabalhou-se, apenas, com dois tipos de pavimento radiante, o da sala, para todo o rés-do-chão, e o dos quartos, para todo o piso 1. De seguida apresentam-se os respectivos coeficientes de transmissão térmica de cada um deles.

No Piso 0 temos um pavimento radiante do tipo seco (VH). Trata-se de um pavimento sobre um espaço não-útil, pelo que se admitiu que $R_{se} = R_{si}$.

Quadro 31 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 0

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m ³	J/ (kg.K)	(m ² .°C/W)
Soalho	2	0,23	810	1200	-
Espuma de Polietileno	0,3	-	-	-	0,44
Contraplacado de Choupo	1	-	-	-	0,07
Painel Poliestireno Expandido	1,5	-	-	-	0,33
Poliestireno Expandido EPS40	3	-	-	-	0,50
Laje de Betão	10	2,0	2450	750	-
Gesso	1,3	0,57	1150	840	-

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,17 + \frac{0,02}{0,23} + 0,44 + 0,07 + 0,33 + 0,50 + \frac{0,10}{2,0} + \frac{0,013}{0,57} + 0,17} = 0,544 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (7)$$

No 1º piso é importante calcular o U do pavimento do quarto 5, uma vez que este se encontra em contacto com o exterior.

Quadro 32 – Características dos materiais constituintes do pavimento do tipo seco (VH) do piso 1

Descrição	e	λ	ρ	Cp	R
	cm	W/ (m.°C)	kg/m³	J/ (kg.K)	(m².°C/W)
Soalho	2	0,23	810	1200	-
Espuma de Polietileno	0,3	-	-	-	0,44
Contraplacado de Choupo	1	-	-	-	0,07
Painel Poliestireno Expandido	1,5	-	-	-	0,33
Laje de Betão	10	2,0	2450	750	-
Gesso	1,3	0,57	1150	840	-

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,02}{0,23} + 0,44 + 0,07 + 0,33 + \frac{0,10}{2,0} + \frac{0,013}{0,57} + 0,17} = 0,820 \text{ W / (m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (8)$$

4.4.1.4. Vãos Envidraçados

Os vãos envidraçados presentes na habitação, são descritos no subcapítulo 2.6.2.6. Para o RCCTE importa relembrar os coeficientes de transmissão térmica respectivos.

Quadro 33 – Envidraçados

Descrição	U
	W/ (m².°C)
Vidros do Piso 0	2,8
Vidros do Piso 1	2,8
Clarabóias	5,7

4.5. COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR - Ψ

4.5.1. ELEMENTOS EM CONTACTO COM O TERRENO

O coeficiente de transmissão térmica linear (Ψ) de elementos em contacto com o terreno é função da diferença de nível entre a face superior do pavimento interior e a cota do terreno exterior. Neste caso, é necessário contabilizar as perdas pela base da fachada orientada a Noroeste, ao nível do rés-do-chão. Esta está em contacto com o terreno, sendo o 0 m o desnível entre a face superior do terreno interior e a cota do terreno exterior.

Quadro 34 – Parede em contacto com o terreno

	Tabela	Ligação	Ψ
Ψ_1	IV.2.2	Parede Noroeste do piso 0 em contacto com o terreno	0,40

4.5.2. PONTES TÉRMICAS LINEARES

Antes de mais é necessário ter em conta que não se contabilizam perdas térmicas lineares entre dois espaços não aquecidos ou, ambos, aquecidos, entre um espaço útil e um espaço não-útil desde que $\tau \leq 0,7$ e em paredes interiores que interceptam a cobertura, fachadas ou pavimentos sobre o exterior ou espaços não-úteis.

No Quadro 35 apresentam-se os valores de ψ das pontes térmicas lineares.

Quadro 35 – Coeficientes de transmissão térmica linear para pontes térmicas lineares

	Ligação	Tabela	Ψ
Ψ_2	Fachada Noroeste com pavimento sobre a cave	Br.1	0,80
Ψ_2	Fachada Nordeste com pavimento sobre a cave	Br.1	0,80
Ψ_3	Fachada Sudeste com pavimento sobre o corredor	Br.1	0,80
Ψ_4	Fachada Sudeste com pavimento sobre a cave	Be.2	0,60
Ψ_5	Fachada Sudoeste com pavimento sobre a cave	Não Regulamentado	0,50
Ψ_6	Fachada com pavimentos intermédios	Não Regulamentado	0,50
Ψ_7	Fachada Nordeste, Noroeste e Sudoeste com a cobertura	De.	0,55
Ψ_8	Fachada Sudeste com a cobertura	Dr.	0,75
Ψ_9	Ligação da fachada com o corpo em balanço (Quarto 5)	Er.	0,45
Ψ_{10}	Ligação entre duas paredes verticais	Não Regulamentado	0,50
Ψ_{11}	Ligação fachada/ padieira ou peitoril		0,00

4.6. COEFICIENTES τ

De acordo com o RCCTE, as trocas de calor ocorrem entre o ambiente interior e o exterior dos edifícios, bem como, entre o interior e os espaços não úteis.

As perdas térmicas através dos elementos da envolvente interior são afectadas do correspondente coeficiente τ , indicado na tabela IV.1 do RCCTE.

Quadro 36 – Coeficiente τ

Tipo de espaço não útil	A_i/A_u	τ
Cave (Garagem Privada)	1,4	0,5

4.7. FACTOR SOLAR

Conforme já mencionado no Capítulo 2, os valores dos coeficientes de transmissão e os factores solares dos envidraçados em uso foram obtidos através da consulta dos respectivos fabricantes.

4.8. PERDAS POR VENTILAÇÃO

A ventilação do edificio é mista (natural + exaustor de cozinha). As rotações por hora (RPH) têm o valor de $0,6 \text{ h}^{-1}$ (RCCTE Anexo IV).

Durante toda a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar as perdas por ventilação, de acordo com o RCCTE Anexo IV, é 3464,6 kWh/ano.

4.9. GANHOS SOLARES

4.9.1. ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

Sabendo que a fachada com a maior área de envidraçados está orientada a Sudoeste, e tendo em atenção o estipulado pelo RCCTE Anexo IV, conclui-se que, na estação de aquecimento, os ganhos solares são iguais a 5900,15 kWh/ano. Esta avaliação consta da folha de cálculo IV.1e, apresentada em Anexo.

4.9.2. ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

Para a estação de arrefecimento os ganhos solares são iguais a 4969,49 kWh/ano (FCV.1ef).

4.10. COLECTORES SOLARES

Não existem colectores solares instalados na habitação, porém existem sondas geotérmicas que captam o calor do solo e o transformam em energia.

A energia geotérmica é um tipo de energia que funciona graças à capacidade natural da Terra em reter calor. Transferindo esse calor através de um sistema de tubos subterrâneos (sonda geotérmicas) gera-se energia para aquecer ou arrefecer um edifício. Este tipo de energia renovável, associada a um sistema próprio de funcionamento, é o que existe na habitação em estudo.

Devido a tratar-se de uma técnica recente, ainda não foram contabilizados esses ganhos energéticos nem estabelecidas metodologias de cálculo efectivas, por entidades competentes. Assim sendo, não é possível entrar com um valor que caracterize os ganhos através deste sistema.

4.11. QUANTIFICAÇÃO DOS REQUISITOS ENERGÉTICOS

Chega-se, então, aos valores que constituem o principal objectivo do presente capítulo, os requisitos energéticos da habitação (Quadro 37). Estes proporcionarão uma comparação com os resultados da simulação feita com o EnergyPlus, apresentada no Capítulo 6 – Discussão de Resultados.

Quadro 37 – Requisitos Energéticos

Nic	Nvc	Nac	Ntc
kWh/(m ² .ano)	kWh/(m ² .ano)	kWh/(m ² .ano)	kWh/(m ² .ano)
64,38	13,45	284,67	24,70

Relativamente à conformidade da habitação com o RCCTE, esta pode ser verificada no quadro seguinte ou através da consulta das folhas de cálculo apresentadas em Anexo.

Quadro 38 – Valores de referência das necessidades nominais de aquecimento, arrefecimento, e preparação de AQS da habitação em estudo

	kWh/(m ² .ano)	%	Verifica?
Nic	64,38	64,88	OK
Ni	99,23		
Nvc	13,45	84,06	KO
Nv	16,0		
Nac	284,67	71,79	OK
Na	396,51		
Ntc	24,70	45,26	OK
Nt	54,57		

5

MEDIÇÕES “IN SITU”

5.1. ENQUADRAMENTO

No Capítulo 3 descreve-se a simulação térmica da habitação em estudo, usando a ferramenta de cálculo EnergyPlus. Para poder, de alguma forma, validar-se a fiabilidade deste estudo, optou-se, para além do estudo da compatibilidade com os resultados do RCCTE, pela colocação de sensores na habitação, durante aproximadamente 3 meses, obtendo-se registos de temperaturas e humidades relativas no interior e exterior. Estes registos possibilitarão uma análise comparativa entre os resultados do EnergyPlus e a realidade presente.

A moradia em estudo, até à data de entrega do presente trabalho, não foi finalizada, pelo que os sistemas de climatização implantados não entraram em funcionamento. Assim sendo, e sabendo que a probabilidade deste contratempo era bastante significativa, não foi posto de lado o interesse na colocação dos sensores, mas teve de se adaptar a simulação a um estado passivo, ou seja, utilizou-se o EnergyPlus mas para a habitação com os sistemas de climatização desligados.

5.2. EQUIPAMENTOS

Utilizaram-se dois tipos de sensores, uns que registam valores de temperatura e humidade relativa, e outros apenas valores de temperatura.

Na figura seguinte pode observar-se um dos exemplares em uso.



Fig. 83 – Sensor HOBO em uso no estudo (HOBO, 2008)

Na totalidade foram implementados 7 sensores na habitação.

Para que esta recolha de dados fosse produtiva foi necessário ter em conta os seguintes requisitos [29]:

- Planeamento;
- Configuração;
- Colocação;
- Recolha;
- Tratamento de dados.

5.2.1. PLANEAMENTO

Para que a amostra de dados seja algo produtivo e da qual resultem dados credíveis e possíveis de se usar, estipularam-se certos critérios a ter em atenção aquando a implementação dos sensores. Definiu-se que o objectivo primordial era obter dados de temperatura e humidade relativa dentro e fora da habitação, em intervalos de tempo horários. Os principais compartimentos a estudar são aqueles onde o conforto térmico é uma exigência relevante, como é o caso da sala e dos quartos.

5.2.2. CONFIGURAÇÃO

Antes da sua colocação em obra, todos os sensores foram configurados e calibrados por técnicos do Laboratório de Física das Construções (LFC) da FEUP.

O programa de interface dos sensores que possibilita o arranque, paragem ou recolha dos dados designa-se por BoxCar. Este software foi disponibilizado juntamente com os equipamentos pelo LFC.

5.2.3. COLOCAÇÃO

Relativamente à colocação dos sensores surgiram algumas dificuldades, uma vez que a habitação encontrava-se, ainda, em fase de acabamento. Quase sempre estavam trabalhadores presentes no interior, o que influenciou os registos e a localização dos sensores. Houve influência, no aumento da ventilação provocada pela ausência de portas, em conjunto com algumas janelas que eram abertas pelos próprios operários.

O critério de maior relevância na localização dos sensores limita-se à escolha de locais onde não se prevê a incidência de radiação solar directa, pelos envidraçados ou pelas clarabóias.

Fixaram-se os equipamentos com uma massa adesiva que possibilitou a sua imobilização no local pretendido. Para a recolha de dados usou-se um computador portátil que permitia o acesso a cada um dos sensores, sem ser necessário retirar-los do sítio.

Relativamente à distância ao pavimento, teve-se o cuidado de instalar os sensores, aproximadamente, a meia altura das paredes interiores dos compartimentos em estudo.

Na Fig. 84, observa-se o sensor colocado no corredor do piso 1.



Fig. 84 – Sensor colocado no corredor do Piso 1

Como o edifício não dispõe de elementos de sombreamento como palas exteriores ou corpos balanceados (varandas), foi necessário arranjar uma forma para que o sensor instalado no exterior estivesse protegido contra as intempéries. Assim sendo, e utilizando a janela da lavandaria, criou-se a solução apresentada na figura seguinte.



Fig. 85 – Sensor instalado no exterior

Este sensor tem como objectivo o registo da temperatura e da humidade relativa no exterior da habitação.

Como já mencionado, foram instalados um total de 7 sensores na habitação. Definiu-se ser fundamental a recolha de dados nos quartos, no corredor do piso 1, na sala e no exterior. O posicionamento de cada sensor na habitação e a sua legenda são indicados nas figuras seguintes.

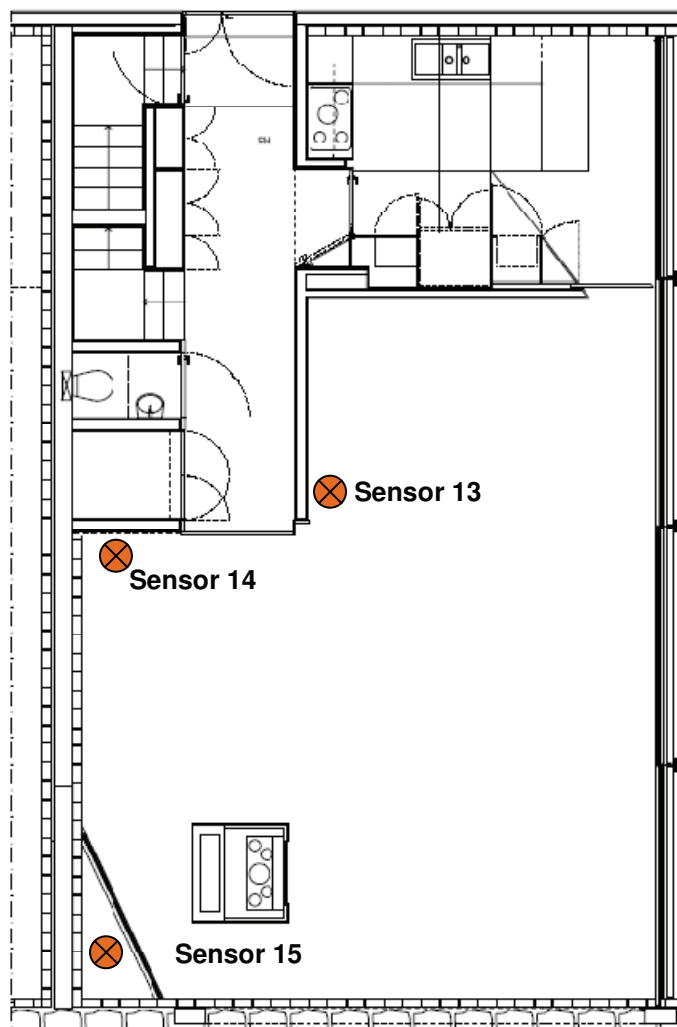


Fig. 86 – Posicionamento de sensores no Rés-do-Chão

Relativamente à localização dos sensores 13 e 14 encontraram-se algumas dificuldades. Conforme descrito no Capítulo 2 do presente trabalho, a fachada orientada a Sudoeste do rés-do-chão é praticamente composta por envidraçados, o que aumenta a incidência solar na sala. Como os sensores não podem estar expostos à radiação solar directa e ainda não podem estar localizados em elementos da envolvente exterior, as hipóteses de escolha ficaram bastante reduzidas, optando-se pela solução apresentada na Fig. 86.

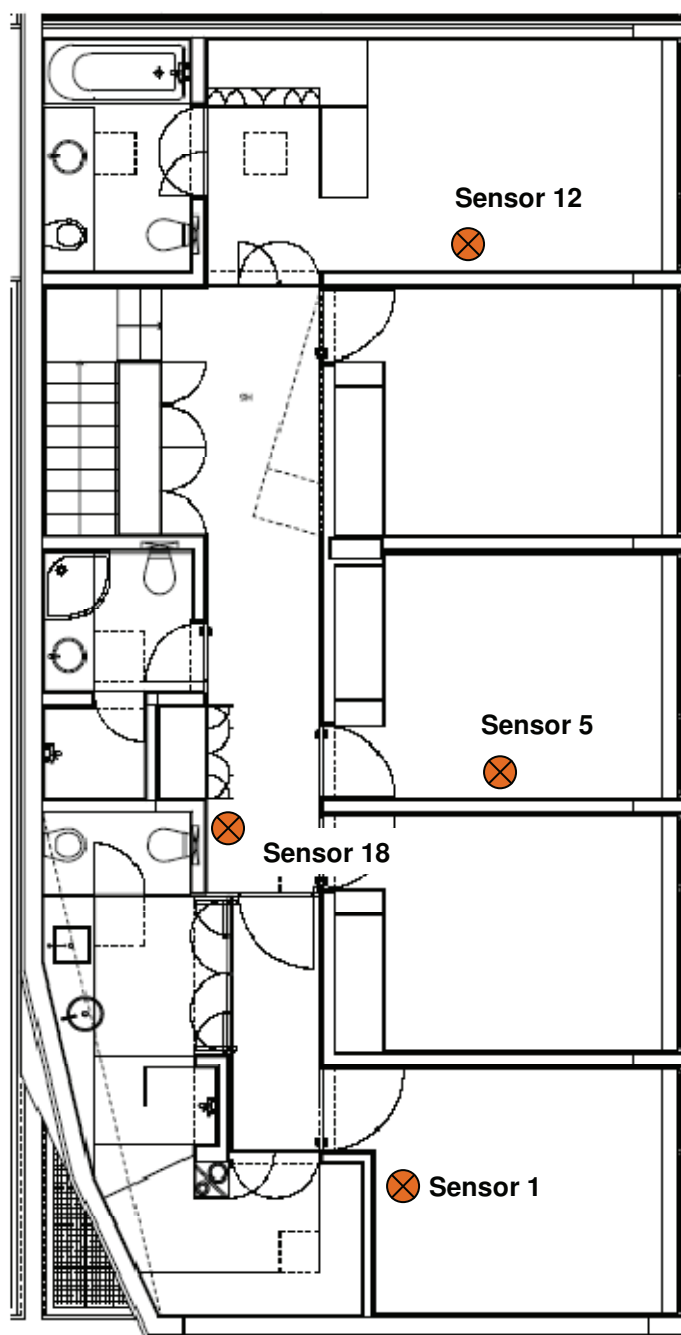


Fig. 87 – Posicionamento de sensores no Piso 1

O estudo do comportamento térmico é essencial nos compartimentos onde o conforto térmico é uma exigência. Assim, instalaram-se sensores nos quartos e um no corredor de circulação comum. Nos quartos existem aberturas na parte superior dos envidraçados cuja função é permitir a ventilação natural do edifício.

No quadro seguinte pode observar-se a listagem dos vários sensores usados, bem como o tipo de dados que cada um recolhe e a sua localização, definida na fase de planeamento.

Quadro 39 – Legenda dos sensores

N.º	Tipo de dados	Local de Implantação
1	Temperatura/HR	Quarto 1
5	Temperatura	Quarto 3
12	Temperatura	Quarto 5
13	Temperatura	Sala
14	Temperatura	Sala
15	Temperatura/HR	Exterior
18	Temperatura	Corredor Piso 1

5.2.4. RECOLHA

Fizeram-se recolhas periódicas semanais dos dados climáticos registados. No final de cada recolha reprogramava-se o lançamento dos sensores para uma hora conveniente e disponível, estipulada de acordo com a hora da própria recolha.



Fig. 88 – Recolha de dados no sensor que se encontrava na exterior

5.2.5. TRATAMENTO DE DADOS

A recolha dos registos de medições é através do BoxCar, donde resultam gráficos como o da figura seguinte.

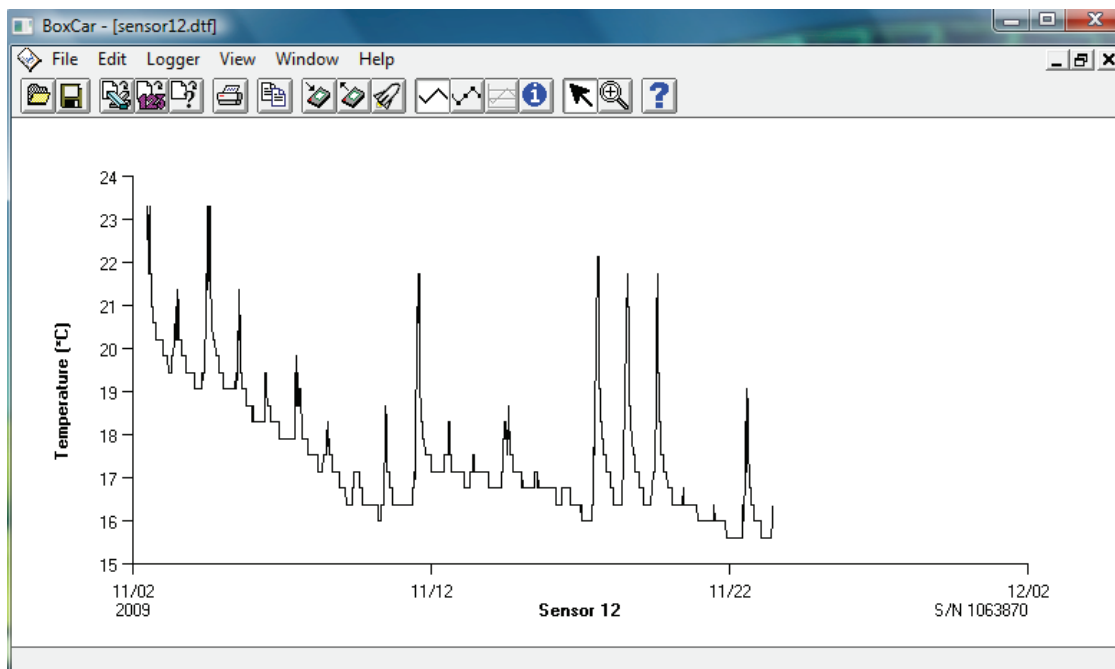


Fig. 89 – Registos do sensor 12 para o período de tempo de 2/11/09 até 23/11/09

O BoxCar permite exportar todos os registos para o Microsoft Office Excel, o que facilita a análise e tratamento dos dados. Os resultados obtidos, respeitantes ao comportamento térmico da habitação no estado passivo, são apresentados no subcapítulo seguinte.

5.3. REGISTOS CLIMÁTICOS DOS SENSORES

Inicialmente estava previsto que os sistemas de climatização entrassem em funcionamento antes da finalização da presente dissertação, mas tal não aconteceu, pelo que não foi possível a recolha de medições de temperatura e humidade relativa interior, com o pavimento radiante em funcionamento.

Seguidamente podem observar-se os registos climáticos de cada sensor.

A análise de comparação dos registos dos sensores com os resultados do EnergyPlus, para o sistema passivo, é apresentada no capítulo seguinte (Capítulo 6 - Discussão de Resultados).

Na zona Piso 1 foram colocados três sensores (1, 5 e o 18), donde resultam os registos apresentados na figura seguinte.

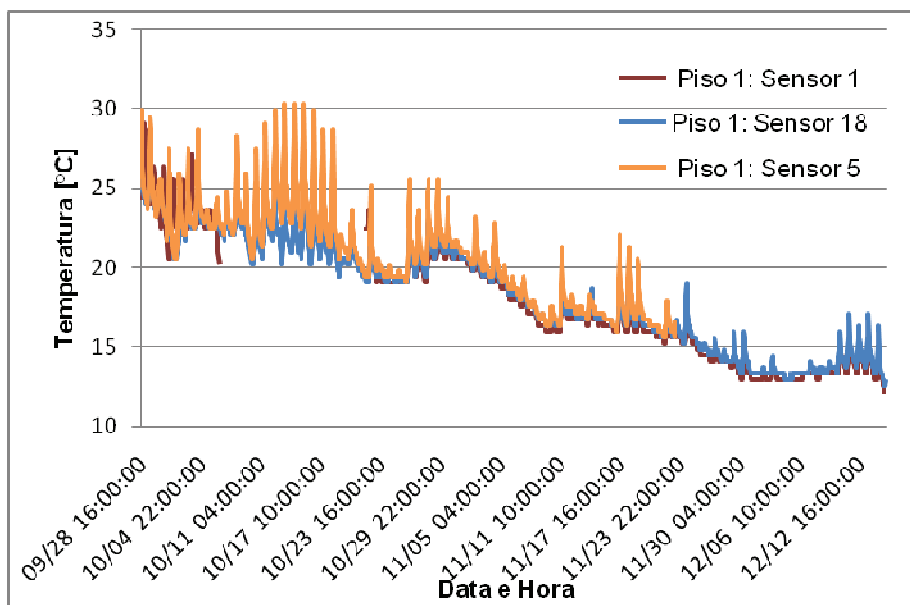


Fig. 90 – Temperaturas Interiores na zona Piso 1

Observa-se que o sensor 5 é o que apresenta registos de temperaturas mais elevadas, em relação aos outros dois, que se deve ao facto de ter sido colocado próximo de um envidraçado e numa parede interior que divide dois espaços aquecidos. O sensor 18 foi instalado no corredor, numa parede interior, onde as trocas térmicas são praticamente nulas e onde não há incidência solar directa por nenhuma clarabóia. Relativamente ao sensor 1, este corresponde a medições no quarto 1, ou seja, medições no único quarto da habitação onde duas paredes constituintes estão em contacto com o exterior, o que origina maiores perdas térmicas e consequentemente menores temperaturas.

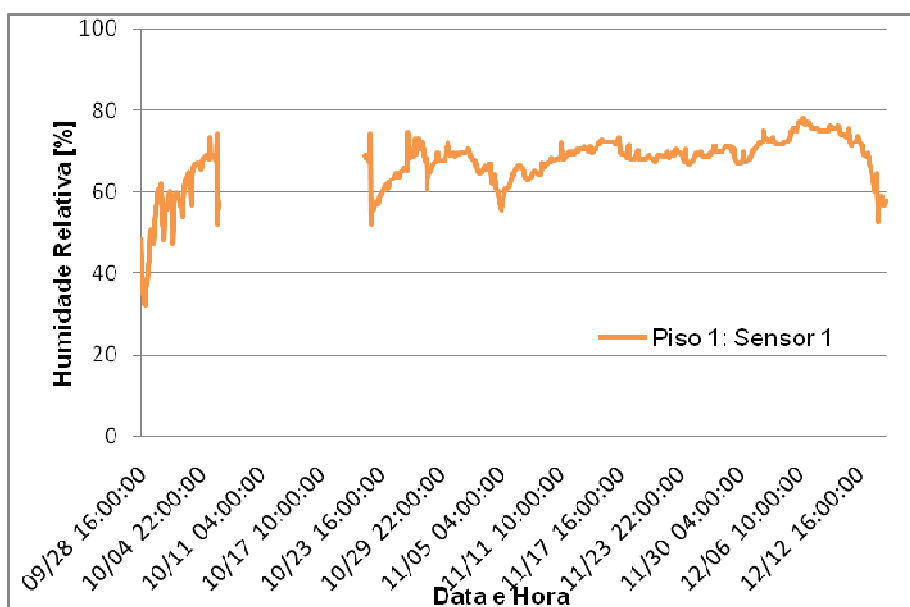


Fig. 91 – Humidade Relativa interior na zona Piso 1

Por motivos desconhecidos, houve um certo período de tempo que o sensor 1 não recolheu medições de humidade relativa, tal pode ser observado na Fig. 91. Quanto aos valores de humidade estes variam entre 20 e 80 %, e conclui-se que aumentam com a diminuição da temperatura, ao longo dos meses.

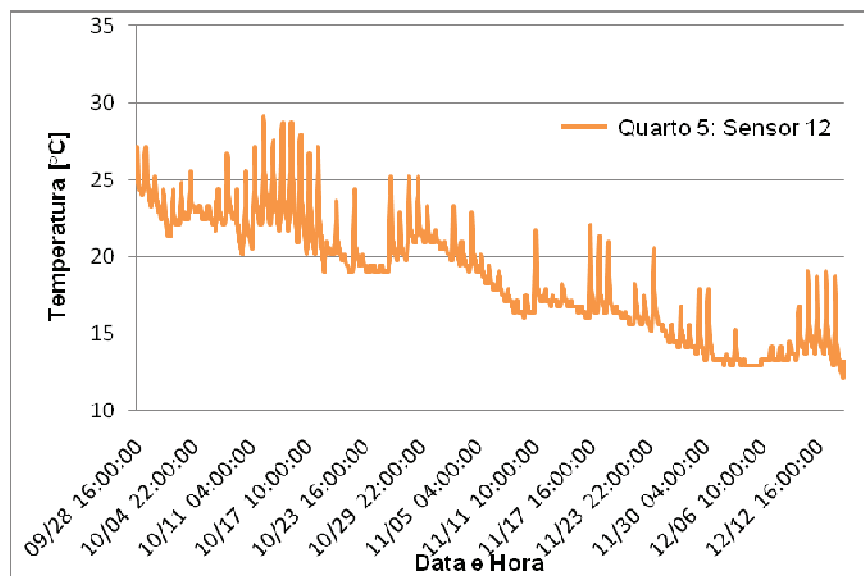


Fig. 92 – Temperatura Interior na zona Quarto 5

Relativamente à zona Quarto 5, registada pelo sensor 12, observam-se temperaturas entre os 10 e os 30 °C, e o seu decréscimo acompanha a variação sazonal. Este sensor foi instalado numa parede interior que separa dois espaços aquecidos e este quarto está em contacto com a habitação contígua. Assim sendo, e tomando em atenção que não existem sistemas de climatização em funcionamento ou ganhos internos de qualquer tipo, pode concluir-se que se trata de registos credíveis.

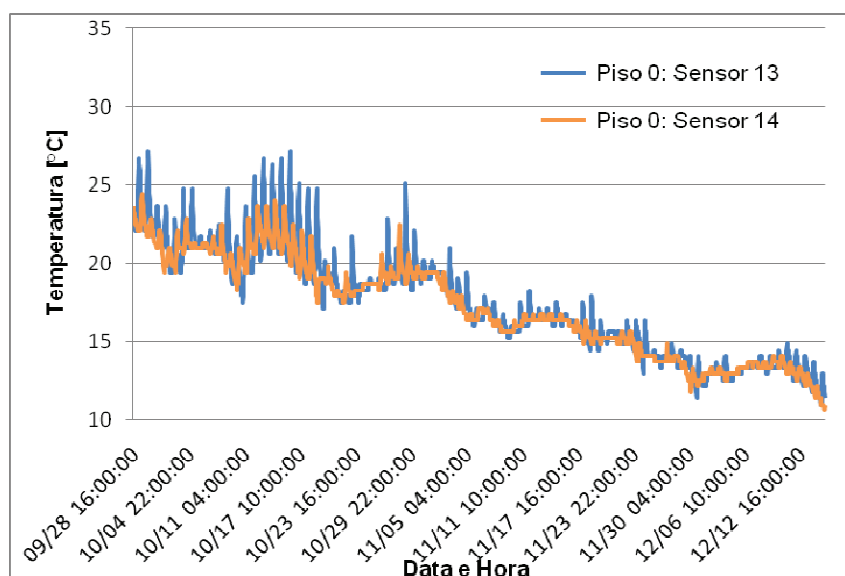
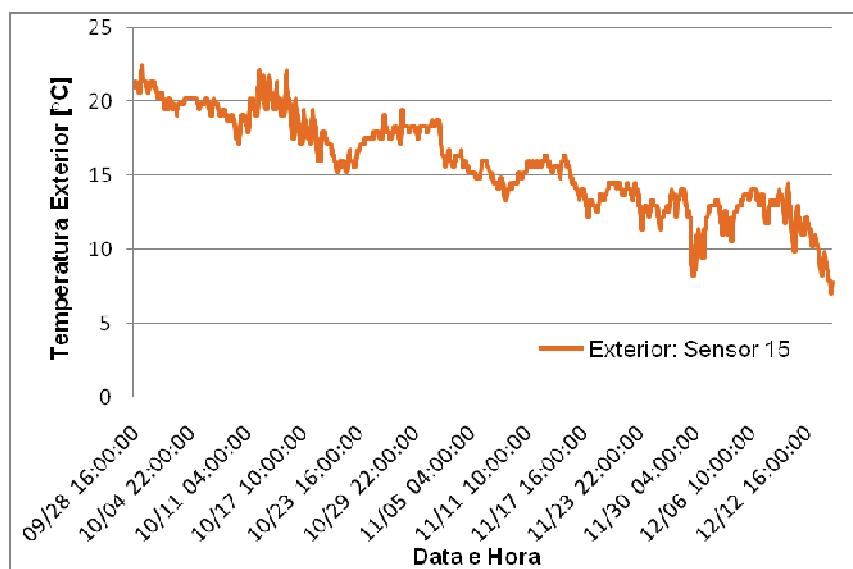
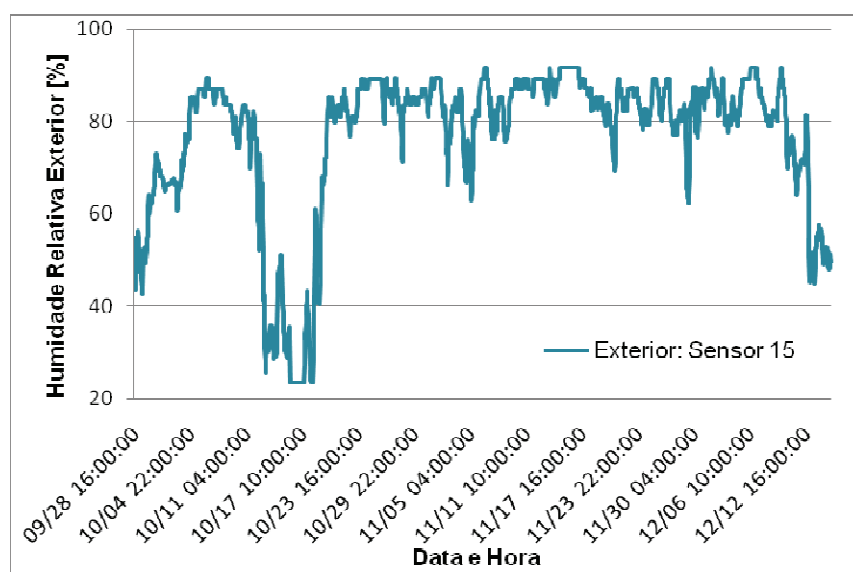


Fig. 93 – Temperatura Interior na zona Piso 0

Na Fig. 93, são apresentados os registos de temperatura na sala do rés-do-chão, recolhidos pelos sensores 13 e 14. Como já referido, a fachada orientada a Sudoeste, ao nível do rés-do-chão, é composta, praticamente, apenas por envidraçados o que origina substantivos ganhos solares. Observa-se que o sensor 13 registou temperaturas maiores que o 14, isto é justificado pelo facto de este estar mais próximo dos envidraçados que o outro. Além disto, o sensor 14 estava posicionado perto da envolvente exterior, o que também influencia nos resultados.



Através do sensor 15 foram recolhidos os valores da temperatura exterior. Como era de esperar, uma vez que o início das medições foi em Setembro, a temperatura do ar exterior foi diminuindo ao longo dos três meses de registo, acompanhando a variação sazonal.



Na Fig. 95, observa-se os registos da humidade relativa no exterior da habitação. A comparação destes valores com os resultados obtidos pelo EnergyPlus, permitirá tirar conclusões sobre as diferenças entre o ficheiro climático, fornecido pelo próprio site, e os valores reais observados durante o período de medições.

No Capítulo 6 – Discussão de Resultados, são apresentadas todas as análises elaboradas, no âmbito da presente dissertação, em conjunto com conclusões a tirar de cada uma delas.

6

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1. ENQUADRAMENTO

Para a concretização dos objectivos propostos, elaboraram-se comparações entre os resultados das necessidades energéticas obtidas pelo EnergyPlus e pelo RCCTE, e entre os registos dos sensores, colocados na habitação, e os resultados do EnergyPlus para uma simulação no estado passivo.

No início da presente dissertação, quando se definiu o âmbito e os propostos deste trabalho, expôs-se o interesse em comparar os resultados da simulação com os equipamentos ligados, com os dados dos sensores, mas sucederam-se atrasos na execução da obra, que conduziram à impossibilidade da recolha de dados com o sistema de climatização ligado.

6.2. ENERGYPLUS VS RCCTE

Cada vez mais, na execução de projectos de climatização, é indispensável o recurso a ferramentas de simulação dinâmica. Porém, é necessário usar os resultados de forma crítica e usando sempre o bom senso. Assim sendo, e para tornar possível uma confrontação de resultados, apresenta-se, de seguida, uma análise dos valores obtidos pelo EnergyPlus e pelo RCCTE.

6.2.1. GRAUS - DIAS

Segundo o RCCTE Anexo II, os graus-dias de aquecimento é um número que caracteriza a severidade de um clima durante a estação de aquecimento e é igual ao somatório das diferenças positivas registadas entre uma temperatura de base (20°C) e a temperatura do ar exterior, durante a estação de aquecimento.

Usando esta mesma metodologia, mas aplicada ao EnergyPlus, tendo por base as temperaturas exteriores fornecidas pelo ficheiro climático em uso, chegou-se à conclusão que os graus-dias de aquecimento são iguais a 1650 °C.dias.

Segundo o RCCTE (Quadro III.1) os GD de aquecimento para o Porto são 1610 °C.dias.

Quadro 40 – Número de Graus – Dias obtidos

	RCCTE	EnergyPlus
GD (°C.dias)	1610	1650

Assim, e observando que os resultados são bastante próximos, pode concluir-se que, ambas as ferramentas de simulação de comportamento térmico do edifício, usaram a mesma severidade de clima na estação de aquecimento.

6.2.2. NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA ÚTIL DE AQUECIMENTO E DE ARREFECIMENTO

Relativamente à análise dos consumos energéticos, pretende-se estudar a eficiência do sistema de climatização proposto e o valor final da solução integrada.

O EnergyPlus permite ao utilizador, saber quais quantidades de energia anuais necessárias para aquecer ou arrefecer a habitação. Para facilidade de identificação, optou-se por indicar as quantidades anuais de energia de aquecimento por C_I e as de arrefecimento por C_V . Estas são apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 41 – Quantidades de energia anuais

	C_I (kWh)	C_V (kWh)
EnergyPlus	11234	4051

Para melhor discussão e comparação de valores com os resultados obtidos pelo RCCTE, decidiu-se passar estes consumos anuais a necessidades nominais de energia. Entenda-se por N_{i_c} as necessidades nominais de energia útil de aquecimento e por N_{v_c} as necessidades nominais de energia útil para arrefecimento

$$N_{i_c} = \frac{\text{Total de Energia de Aquecimento (kWh/ano)}}{\text{Área Útil de Pavimento (m}^2\text{)}} \quad (9)$$

$$N_{v_c} = \frac{\text{Total de Energia de Arrefecimento (kWh/ano)}}{\text{Área Útil de Pavimento (m}^2\text{)}} \quad (10)$$

A área útil de pavimento é 179,4 m².

O quadro seguinte mostra os resultados das necessidades nominais de energia útil de aquecimento, obtidos pelo RCCTE e pelo EnergyPlus.

Quadro 42 – Necessidades Nominais de Energia Útil de Aquecimento (N_{i_c})

	N_{i_c} (kWh/m ² .ano)
RCCTE	64,38
EnergyPlus	62,62

Antes de mais, convém lembrar que todas as necessidades nominais de energia, calculadas pelo RCCTE, não ultrapassam os valores limite máximos admissíveis, o que valida a conformidade da habitação segundo a regulamentação aplicada. Isto pode ser observado através do Quadro 38.

De acordo com o Quadro 42, analisando as necessidades nominais de energia útil de aquecimento ($N_{i,c}$), conclui-se que os resultados são semelhantes. Isto pode ser justificado pelo facto que ambas as ferramentas usam valores de GD muito semelhantes, o que conduz a uma mesma severidade de clima.

Na simulação efectuada, usando o EnergyPlus, embora se tenha obtido resultados de consumos energéticos satisfatórios, as temperaturas interiores da habitação, nomeadamente na zona Quarto 5, não satisfazem a temperatura de conforto imposta (20°C). Como já mencionado anteriormente, isto pode dever-se a uma potência insuficiente do sistema ou, ainda, ao facto de esta zona ter uma área de envidraçado mais pequena e protegida por elementos de sombreamento, o que se traduz em ganhos solares, significativamente, menores.

De acordo com o RCCTE, as necessidades nominais de arrefecimento de uma fracção autónoma de um edifício são a energia útil que é necessário retirar-lhe para manter permanente, no seu interior, a temperatura de referência (25°C), durante toda a estação convencional de arrefecimento, isto é, nos meses de Junho a Setembro, inclusive [30].

Assim sendo, tendo em conta o anteriormente citado, comparando as necessidades nominais de energia útil ($N_{v,c}$) obtidas pelo RCCTE e pelo EnergyPlus, chegou-se aos resultados apresentados no quadro seguinte.

Quadro 43 – Necessidades Nominais de Energia Útil de Arrefecimento ($N_{v,c}$)

	$N_{v,c}$ (kWh/m ² .ano)
RCCTE	13,45
EnergyPlus	18,57

Conclui-se que as necessidades de arrefecimento obtidas pelo EnergyPlus são um pouco maiores que as obtidas pelo RCCTE, o que pode dever-se ao facto deste método ser um pouco mais minucioso, uma vez que são introduzidas as temperaturas horárias, interiores e exteriores, através do ficheiro climático, ou, ainda, que o sistema necessita de um consumo elevado para atingir a temperatura de referência.

Relativamente à eficiência do sistema de climatização, na estação de arrefecimento, as temperaturas interiores chegam a atingir valores um tanto ou quanto desmedidos, o que pode dever-se ao facto de a habitação possuir elevada área de envidraçados orientados a Sudoeste, o que origina elevados ganhos solares. Assim sendo, para arrefecer a habitação até, pelo menos, aos 25°C o sistema necessita de consumos energéticos substanciais e a sua eficiência fica comprometida.

6.3. ENERGYPLUS VS MEDIÇÕES “*IN SITU*”

Outro método adoptado, para possibilitar uma análise de fiabilidade dos resultados obtidos através da simulação dinâmica da habitação com recurso ao EnergyPlus, foi a instalação de sensores e o estudo dos seus registos de temperaturas e humidades relativas.

6.3.1. GRAUS - DIAS

Para ser possível a comparação entre os valores resultantes da simulação do EnergyPlus com as medições feitas pelos sensores instalados na habitação, é necessário calcularem-se os graus-dias (GD) de cada um dos métodos.

Os sensores registaram valores de temperaturas e humidades relativas, interiores e exteriores, desde do dia 28 de Setembro de 2009 até ao dia 15 de Dezembro de 2009. Tomando este intervalo de tempo, para as temperaturas exteriores dos sensores e do EnergyPlus, e atendendo a uma temperatura base de 20°C, chegou-se aos resultados apresentados no quadro seguinte.

Quadro 44 – Número de Graus – Dias Obtidos

	Sensores	EnergyPlus
GD (°C.dias)	331	526

Conclui-se que o EnergyPlus considera um clima mais severo que o captado pelos sensores. Os valores de referência incluídos no ficheiro climático, usado no EnergyPlus, são referentes a temperaturas mais baixas, que aquelas que foram captadas pelos sensores durante o período de recolha de medições.

6.3.2. TEMPERATURAS INTERIORES E EXTERIORES

Durante o período de medições a habitação ainda não havia sido concluída, pelo que estes registos correspondem a um cenário onde não existem elementos de sombreamento, ganhos internos ou sistemas de climatização.

Considerando os resultados das medições apresentados no Capítulo 5, calcularam-se as diferenças entre as temperaturas, interior e exterior, registadas pelos sensores, para cada zona em estudo. Estes resultados, apresentados na Fig. 96, têm como objectivo permitir uma melhor análise do comportamento da habitação.

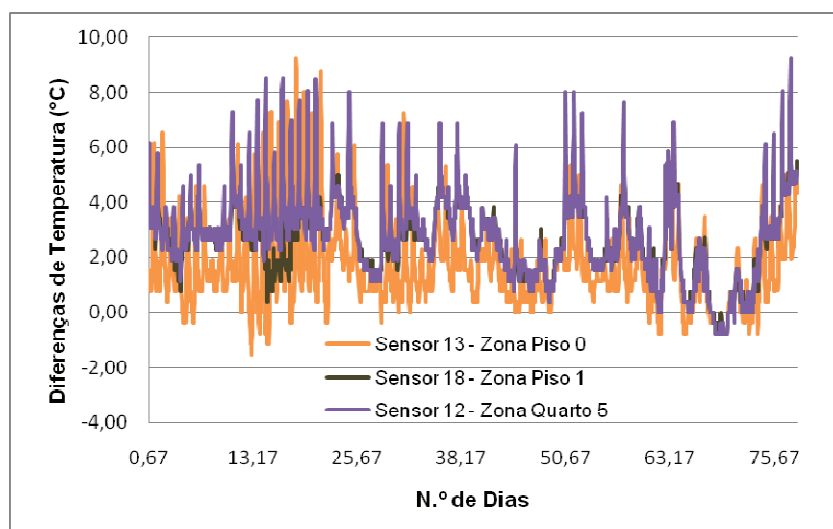


Fig. 96 – Diferenças de temperatura, interior e exterior, registadas pelos sensores

As diferenças de temperatura interior e exterior, apresentadas na figura anterior, permitem supor que a habitação tem um comportamento algo semelhante em cada zona que a constitui. Ainda assim, observa-se que na zona Piso 1, a variação é mais oscilatória o que significa que há maiores transferências de calor entre o interior e o exterior, isto pode dever-se ao facto da elevada área de envidraçados, presente na parede orientada a Sudoeste. Essa oscilação pode indicar que durante o dia há elevados ganhos solares e durante a noite, quando não há incidência de radiação, a temperatura interior diminui significativamente.

Para podermos comparar estes resultados com o EnergyPlus foi necessário fazer correr uma outra simulação respeitante ao sistema passivo da habitação. Por sistema passivo entende-se a mesma habitação mas sem elementos de sombreamento, sem ganhos internos e sem sistemas de climatização. Este cenário proposto nesta simulação é o mesmo, efectivamente, que existiu durante o período de recolha de medições. Os resultados da diferença de temperaturas, interior e exterior, obtidas nessa simulação, podem ser observados na figura seguinte.

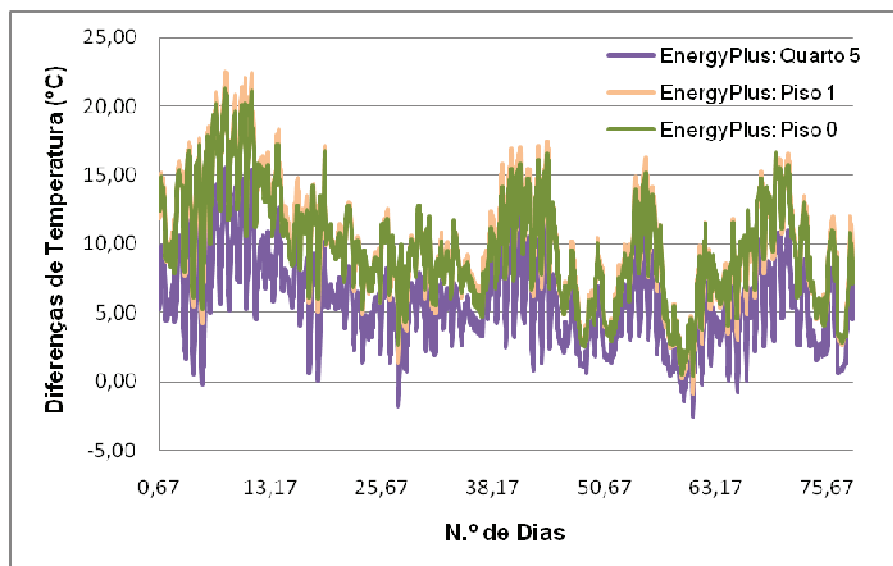


Fig. 97 – Diferenças de temperaturas, interior e exterior, para o sistema passivo

Apesar da ausência de elementos de sombreamentos, ganhos internos ou sistemas de climatização, esta simulação tem em conta a constituição da habitação definida no Capítulo 2 e ainda as renovações horárias de $0,6 \text{ h}^{-1}$.

Analisando a Fig. 97, e comparando-a com a Fig. 96, chega-se à conclusão que os resultados da simulação pelo EnergyPlus e os adquiridos pelos sensores são bastante diferentes. Isto pode dever-se ao facto do ficheiro climático, disponibilizado pelo site do EnergyPlus, possuir valores de temperaturas exteriores diferentes da realidade observada, na localização da habitação em estudo. Isto é facilmente constatado pela comparação das linhas das temperaturas exteriores, onde se observa uma significativa diferença entre valores. É importante referir que os valores da temperatura exterior, relativa ao EnergyPlus, não são afectados pela simulação do comportamento térmico da habitação, estes apenas foram retirados do ficheiro climático, ou seja, esses valores da temperatura exterior correspondem aos, efectivamente, usados na simulação, quer do sistema passivo ou activo (habitação com os equipamentos de climatização ligados, ganhos internos e elementos de sombreamento).

Para uma melhor visualização da divergência entre as diferenças de temperatura, interior e exterior, obtidas pelos sensores e pelo EnergyPlus, decidiu-se construir o gráfico apresentado na figura seguinte (tomou-se a zona Piso 1 como exemplo).

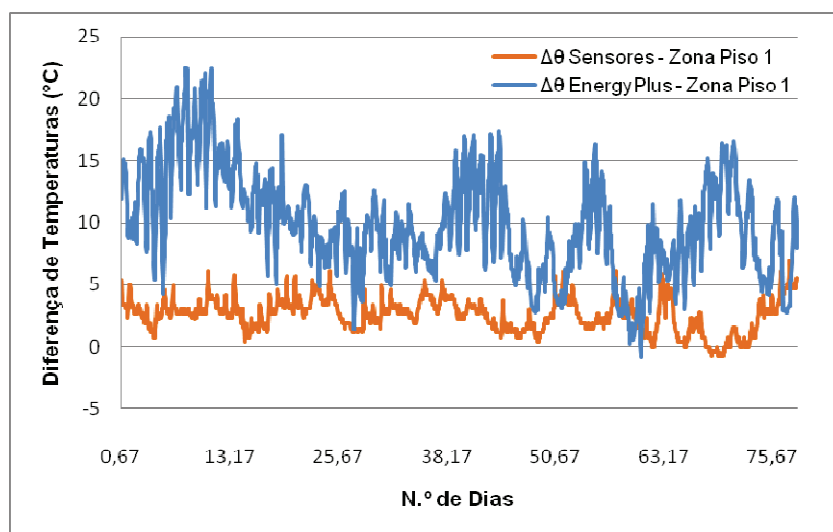


Fig. 98 – Diferença de temperatura interior e exterior

Pela observação da Fig. 98, conclui-se que os valores registados pelos sensores correspondem a um comportamento térmico mais linear, da habitação. Os resultados pelo EnergyPlus indicam maiores oscilações de temperatura, para dias consecutivos. Esta discrepância dos resultados da simulação pode advir de propriedades da simulação diferentes das que se encontram na realidade, tal como, as renovações de ar, a forma como se simulou a cave, a influência da sujidade dos vidros no factor solar ou, até mesmo, alguma constituição de um elemento que não foi realizada de acordo com o estabelecido em projecto.

Outra condição que pode ter influenciado estes resultados é a incidência de radiação solar.

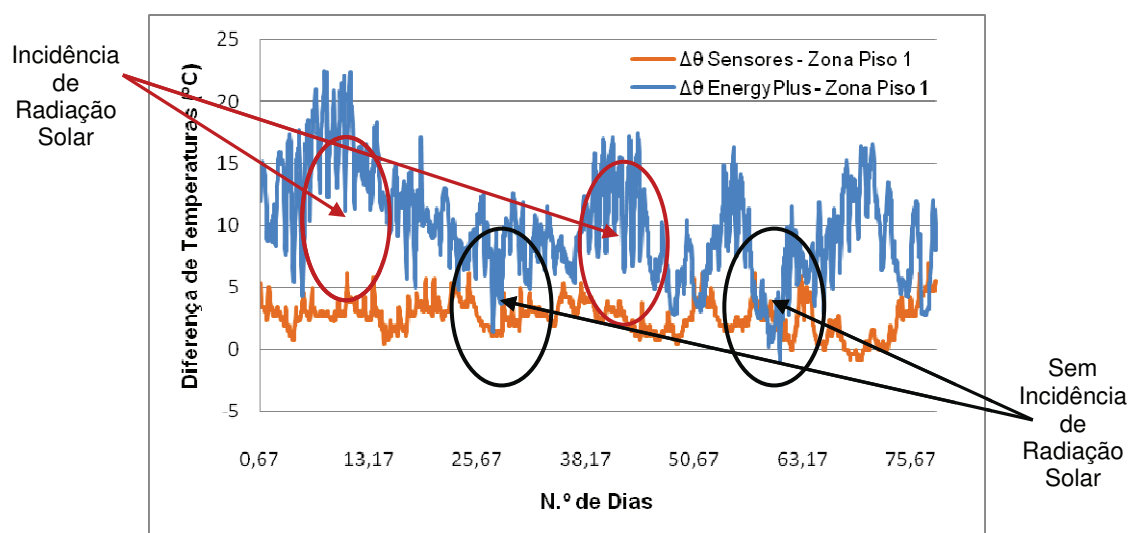


Fig. 99 – Influência da radiação solar

Analisando a figura anterior, observa-se que os resultados se aproximam a determinadas alturas, o que pode levar a concluir que se trata dos períodos da noite onde não há incidência de radiação solar, resultando em temperaturas interiores mais baixas.

Esta análise da incidência da radiação solar seria um aspecto interessante de aprofundar no futuro. Por agora permite concluir, que existem dúvidas na fiabilidade em como se modelou a habitação. Surgiram muitas dificuldades na interpretação do programa e pode ter havido algum dado mal introduzido, que levou ao EnergyPlus sobrestimar os ganhos solares.

Para que seja possível analisar e comparar as médias das temperaturas interiores, obtidas pelos sensores e pelo EnergyPlus, numa outra forma de visualização de resultados, decidiu-se construir as curvas das frequências acumuladas respectivas.

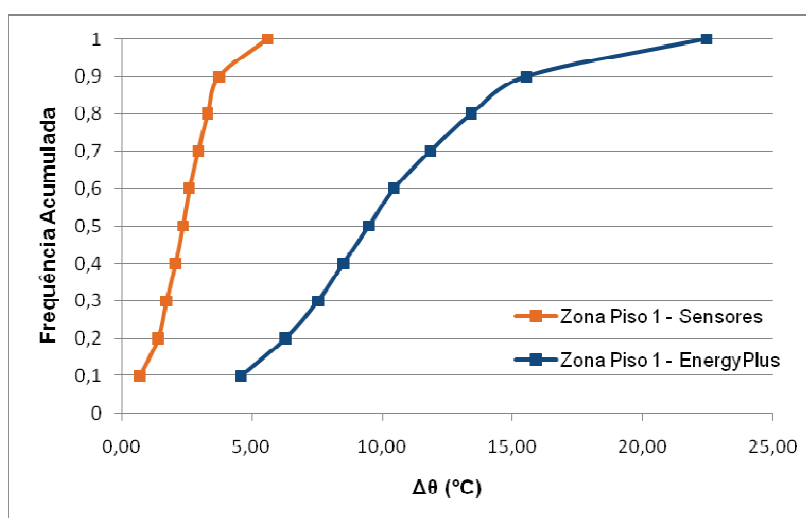


Fig. 100 – Frequências acumuladas das diferenças de temperaturas interiores e exteriores

Através da análise da Fig. 100, conclui-se, mais uma vez, que há uma grande disparidade entre os valores recolhidos pelos sensores e os obtidos pela simulação. Os mínimos e os máximos não são próximos, e a média não atinge valores comuns.

6.3.3. HUMIDADES RELATIVAS INTERIORES E EXTERIORES

A opção pelos registos das humidades relativas interiores e exteriores, é no sentido de proporcionar mais uma ferramenta de análise comparativa entre as medições dos sensores e os resultados da simulação.

Antes de mais, é necessário explicar a ausência de alguns registos do sensor 1. Essa ausência só foi notada aquando a realização dos cálculos finais da presente dissertação, pelo que a explicação de tal sucedido se deve a motivos alheios ao autor.

Na figura seguinte observam-se os registos de humidade interior recolhidos pelo sensor 1 e os obtidos pelo EnergyPlus.

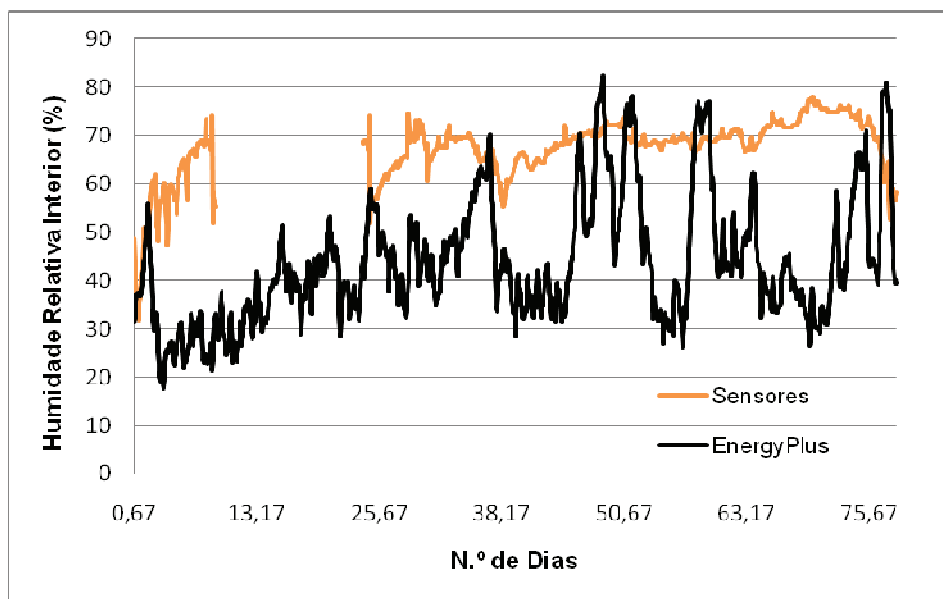


Fig. 101 – Humidades Relativas Interiores

Comparando os valores da humidade relativa interior, registados pelo sensor 1, e os obtidos pelo EnergyPlus, observa-se uma substancial diferença entre os valores.

Observando os valores mínimos e os máximos, concluiu-se que de acordo com os sensores é atingido, aproximadamente, 30 e 80% de humidade relativa interior, respectivamente. Com o EnergyPlus, o valor mínimo ronda os 20% e o máximo os 80%. Conclui-se, assim, que os máximos e os mínimos obtidos, quer pelos sensores quer pelo EnergyPlus, encontram-se próximos.

As humidades relativas exteriores podem ser observadas na figura seguinte.

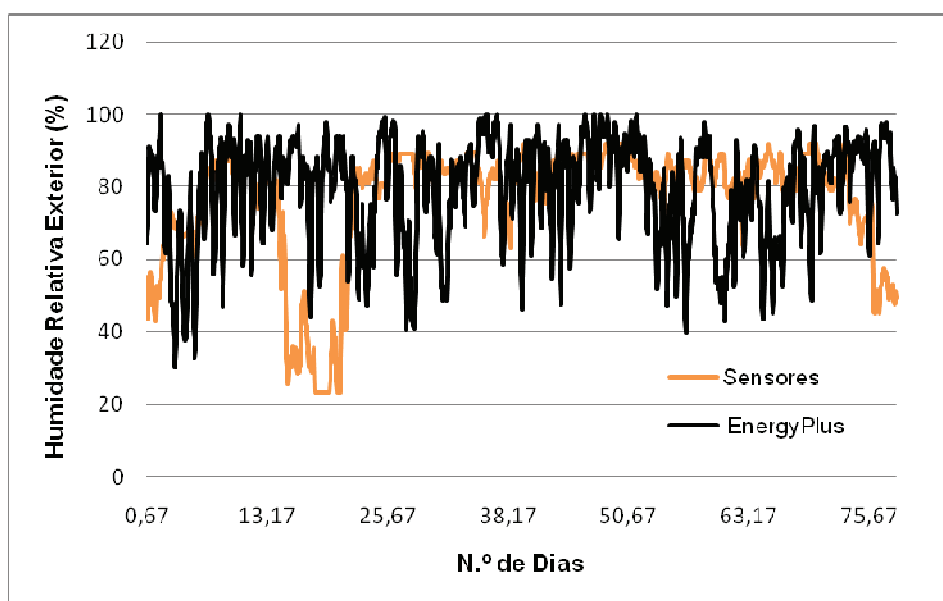


Fig. 102 – Humidades Relativas Exteriores

Relativamente às humidades relativas exteriores, registadas pelo sensor 15, e as obtidas pelo EnergyPlus, volta a notar-se uma certa diferença, embora não tão acentuada com a das humidades relativas interiores. Conclui-se que o período de medições foi mais húmido do que aquele previsto pelo ficheiro climático.

Como as temperaturas registadas pelos sensores e as obtidas pelo EnergyPlus resultaram em valores diferentes, já era de esperar que as humidades relativas seguissem o mesmo efeito. Para tal, e para melhor interpretação de resultados, decidiu-se calcular as pressões de vapor de água (P).

A pressão parcial do vapor de água é a pressão que este teria se ocupasse individualmente o volume ocupado pela mistura de ar considerada [31].

Sabendo que a humidade relativa é a razão entre a pressão de vapor e a pressão saturada, e que a pressão satura pode ser obtida pela expressão (11), considerando os valores das temperaturas e das humidades relativas, interiores e exteriores, obtiveram-se os resultados apresentados na Fig. 103, e na Fig. 104.

$$P_s = 611 \cdot e^{\left(\frac{a \cdot t}{t' + t}\right)} \quad (11)$$

Em que:

a = 22,44 ; t' = 272,44 °C – para t < 0°C

a = 17,08 ; t' = 234,18 °C – para t ≥ 0°C

e: número de Nepper ≈ 2,718

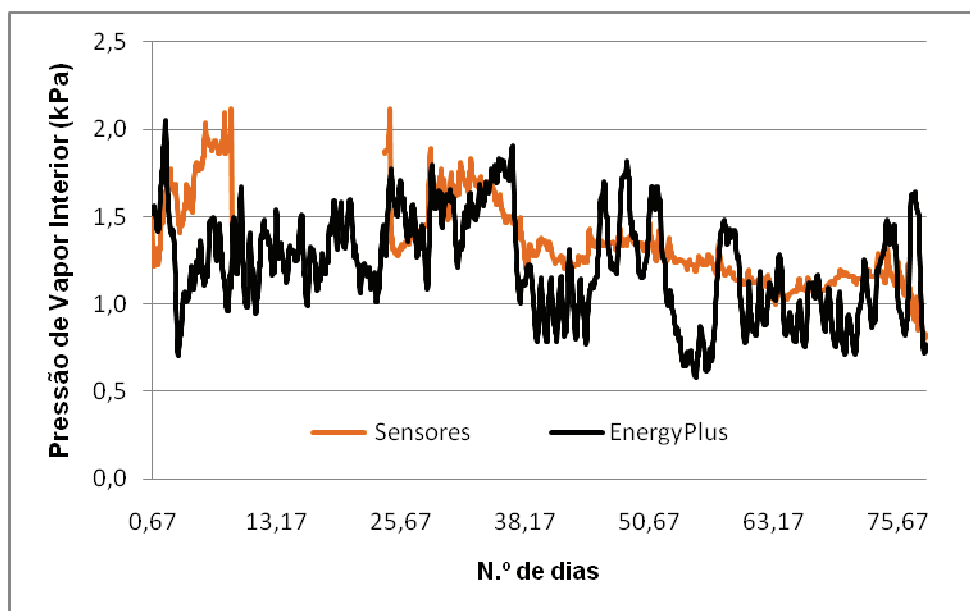


Fig. 103 – Pressão de Vapor Interior

Observa-se uma semelhança gráfica entre a Fig. 103, e a Fig. 101, estes resultados da pressão de vapor encontram-se mais próximos o que pode levar a concluir que o balanço higríco está a ser calculado de uma forma aceitável.

Na figura seguinte ilustram-se os resultados da pressão de vapor exterior.

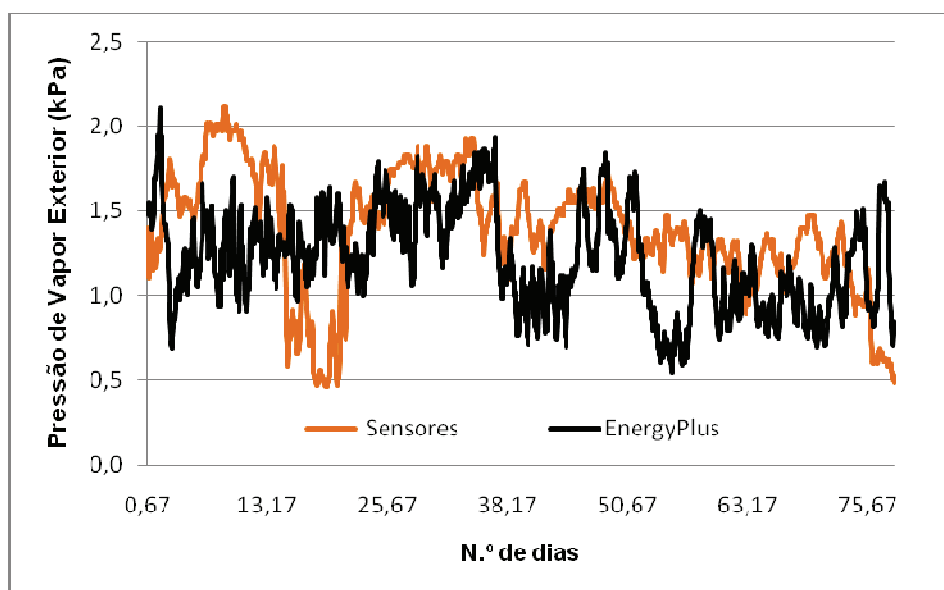


Fig. 104 – Pressão de Vapor Exterior

Observando a Fig. 104, e a Fig. 102, observam-se, também, semelhanças gráficas, mas, assim como aconteceu nas pressões de vapor interiores, os resultados das exteriores aproximam-se, indicando, mais uma vez, que o balanço hídrico considerado pelos sensores e pelo EnergyPlus é considerado de forma análoga.

Elaborou-se, ainda, a diferença de pressão de vapor interior e exterior para os sensores e para o EnergyPlus. Estes resultados são apresentados na figura seguinte.

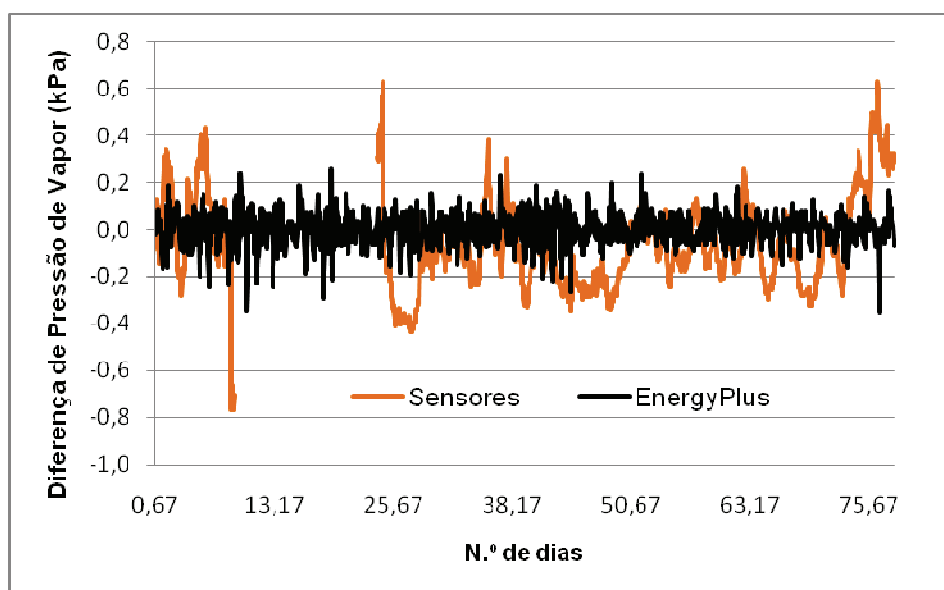


Fig. 105 – Diferença de pressões de vapor

Observando a Fig. 105, conclui-se que as diferenças de pressão, interior e exterior, relativas ao EnergyPlus são muito baixas, o que pode indicar que a humidade relativa, prevista pelo programa, deve-se apenas à influência da temperatura.

No que diz respeito aos sensores, observa-se que a diferença de pressão de vapor interior e exterior é mais acentuada, pelo que a humidade relativa foi menos influenciada pela temperatura.

7

CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

O trabalho desenvolvido na presente dissertação permitiu concluir que, de acordo com as comparações das medições “*in situ*” e dos resultados do RCCTE, o EnergyPlus é uma ferramenta de simulação térmica e energética útil e eficiente.

Os objectivos parciais, estabelecidos na fase de planeamento do presente trabalho, foram sucessivamente alcançados, permitindo deduzir-se algumas das principais conclusões da presente dissertação.

A descrição tecnológica da habitação, das técnicas aplicadas e dos sistemas de climatização implementados, permitiram concluir o seguinte:

- A habitação em estudo é uma T5, com três pisos, situada na cidade do Porto a menos de 5 km da zona costeira;
- A fachada com maior área de envidraçado está orientada a Sudoeste e apenas existem elementos de sombreamento no piso 1;
- No rés-do-chão e no piso 1 foi implementado um pavimento radiante composto por placas metálicas de alumínio, emisoras de calor, que permitem a dissipação da temperatura, gerada pelo sistema, de uma forma constante;
- Existem três tipos de pavimentos radiantes instalados na habitação, dois do tipo seco (VH), instalados na sala e em todo o piso 1, e um do tipo húmido instalado na cozinha (VV);
- A ventilação é natural através de grelhas nos quartos e nos WC. Existe ainda um exaustor mecânico na cozinha;
- Foi implantado um sistema de captação de energia geotérmica, composto por uma bomba de calor de 12 kW associada a uma sonda vertical em duplo U, de 32 mm de diâmetro e 160 m de profundidade;
- Nas tubagens da sonda circula um líquido frigogénico (água + glicol), responsável pela troca de calor através do contacto com o solo. A circulação contínua deste líquido é garantida por uma bomba de circulação;

A simulação da habitação através do EnergyPlus permitiu concluir o seguinte:

- A simulação da habitação foi realizada usando um ficheiro climático fornecido pelo site do próprio programa. Esse ficheiro contém os dados climáticos referentes à cidade do Porto. Estes dados não correspondem a valores em tempo real, mas sim estatísticos, tomando como base registos de anos anteriores;

- O programa possui um conjunto de grupos, que o utilizador preenche com os dados do caso em estudo, tendo em foco os resultados que pretende obter. Estes grupos dividem-se em vários campos e estes campos, por sua vez, em objectos;
- A habitação foi dividida em três zonas, nomeadamente, Piso 0, Piso 1 e Quarto 5;
- Durante o processo de construção da simulação, houveram dados de que o autor não dispunha, pelo que se adoptaram os exemplos disponibilizados juntamente com o programa;
- Os resultados da simulação dependem dos objectivos propostos. Neste caso evidenciou-se as temperaturas e as humidades relativas, interiores e exteriores, na estação de aquecimento e arrefecimento;
- O programa, no final da simulação, demonstrou não ter havido má interpretação dos dados necessários a inserir, nem discrepâncias ou anomalias nos valores introduzidos;
- Concluiu-se que as temperaturas interiores, com o sistema de climatização ligado, atingem, aproximadamente, 15 e 38°C no mínimo e no máximo, respectivamente. Isto pode ser indicativo da sensibilidade da simulação aos dados introduzidos, relativos ao sistema de climatização, ou ainda, subentender que houve erro na indicação dos resultados pretendidos;
- A zona Quarto 5 é a que atinge temperaturas interiores mais baixas, o que pode ser devido a esta zona ter uma área de envidraçado, consideravelmente mais pequena que as outras zonas, conduzindo a menores ganhos solares. Além disto, ainda se pode concluir, que a potência do sistema, nesta zona, é insuficiente. Relativamente às zonas Piso 0 e Piso 1, observam-se temperaturas aproximadamente de 20 °C na estação de aquecimento. Na estação de arrefecimento as temperaturas interiores são consideravelmente elevadas, o que pode ser causado por uma ineficiência do sistema face aos elevados ganhos solares;
- Elaborou-se uma simulação com os equipamentos desligados e concluiu-se que a temperatura mínima atinge os 10°C e a máxima, quase, 40°C;
- As humidades relativas interiores nunca atingem valores superiores a 85% nem inferiores a 10%;
- No decorrer da elaboração da simulação houve várias dúvidas relativamente aos dados necessários a introduzir, à interpretação do manual e, ainda, na definição, no próprio programa, dos resultados que deveriam ser disponibilizados. Por tudo isto, conclui-se que pode ter havido algum erro ou omissão na simulação apresentada, e o aprofundamento e estudo desta, seria um desenvolvimento futuro bastante interessante;
- Esta ferramenta de simulação, apesar de complexa e de difícil compreensão, é um instrumento muito completo e, apoiado por uma boa formação, o utilizador consegue obter resultados credíveis e bastante favoráveis a qualquer estudo térmico ou energético.

No Capítulo 4 foram desenvolvidas as folhas de cálculo que fazem parte do modelo de cálculo do RCCTE, donde se obteve os seguintes resultados:

- A zona climática de Inverno, da habitação em estudo, é a I_2 , e a de Verão a V_1 ;
- O número de graus-dias de aquecimento, que caracterizam a severidade do clima, é igual a 1610 °C.dias;
- As necessidades nominais de energia obtidas, não ultrapassam os limites máximos admissíveis, validando a conformidade da habitação com a regulamentação;
- As necessidades nominais de energia útil de aquecimento obtidas são iguais a 64,38 kWh/(m².ano), as de arrefecimento 13,45 kWh/(m².ano), as para produção de águas quentes sanitárias 284,67 kWh/(m².ano) e, finalmente, as de energia primária iguais a 24,70 kWh/(m².ano).

O planeamento da recolha de medições “*in situ*” e os correspondentes registos, foram tratados no Capítulo 5 donde se pode tirar as seguintes conclusões:

- Durante o período em que os sensores registaram as medições da habitação (28 de Setembro a 15 de Dezembro), esta encontrava-se em fase de acabamentos, não havendo elementos de sombreamento colocados, electricidade (sem ganhos internos) ou sistemas de climatização ligados. Esta situação é de extrema importância para a análise e interpretação dos resultados;
- Utilizaram-se sensores HOB0 de dois tipos, um que registou apenas valores de temperaturas e outro de registou temperaturas e humidades relativas. Na totalidade foram colocados 7 sensores na habitação, um deles no exterior e os restantes distribuídos pelas 3 zonas em estudo, nomeadamente, nos quartos onde o conforto térmico é imposto;
- A instalação dos sensores passou por várias fases, uma delas a colocação. A habitação encontrava-se, ainda, em fase final de construção, pelo que se teve de optar por locais onde os trabalhos não fossem perturbados e onde os valores não fossem facilmente corrompidos. Além disto, os sensores não ficaram expostos à radiação solar directa;
- Os sensores foram programados para registar valores de 15 em 15 minutos. Foram feitas recolhas periódicas das medições e no final de cada recolha, era verificada a bateria de cada um e depois programado um novo lançamento;
- Os equipamentos de medição foram disponibilizados pelo Laboratório de Física das Construções e vieram acompanhados do respectivo software. Este software (BoxCar) é o que permite trabalhar com os sensores, lançando-os e recolhendo os vários registos. O BoxCar permite extrair os resultados para o Excel o que possibilitou o tratamento dos mesmos;
- Os resultados das medições permitiram concluir que as temperaturas interiores são maiores no piso 1, chegando a atingir valores superiores aos 30°C. No piso 0 as temperaturas registadas foram de 28°C;
- Relativamente às humidades relativas interiores, estas nunca chegaram a atingir os 80%;
- O sensor colocado no exterior registou temperaturas máximas de 23°C e mínimas, de aproximadamente, 5°C, no mês de Dezembro. A humidade relativa chegou a valores na ordem dos 90%.

A análise de resultados, apresentada no Capítulo 6, evidenciou os seguintes pontos:

- Os graus-dias do EnergyPlus, para a simulação anual, são iguais a 1650. Os do RCCTE são iguais a 1610, pelo que devido à proximidade entre estes dois valores se concluiu que ambos, o EnergyPlus e o RCCTE, consideram uma severidade de clima semelhante na estação de aquecimento;
- Comparando as necessidades nominais de energia útil de aquecimento ($N_{i,c}$), obtidas pelo EnergyPlus e pelo RCCTE, observou-se que são semelhantes. Ainda assim, os resultados da simulação mostram que as temperaturas interiores no Quarto 5 não atingem a temperatura de base, o que pode ser devido a uma insuficiência de potência do sistema ou, a alguma definição mal introduzida relativa a esta zona;
- Sabendo que as necessidades nominais de energia útil de arrefecimento ($N_{v,c}$) são a razão entre a quantidade total de energia de arrefecimento necessária, por ano, e a área útil de pavimento, obteve-se um valor de 18,57 kWh/(m².ano). Este valor é um pouco maior do que o obtido pelo RCCTE, o que não invalida a simulação, uma vez que no regulamento é dito que as necessidades nominais de energia obtidas através do seu método, não representam necessariamente o consumo real do edifício [30];

- Como as medições “*in situ*” correspondem a uma fase da habitação em que não há elementos de sombreamento, ganhos internos ou sistemas de climatização activos, elaborou-se uma nova simulação, no EnergyPlus, para um estado passivo da habitação. Esta simulação permitiu obter valores comparáveis com os registos dos sensores;
- Considerando, aproximadamente, os 79 dias de medições, calcularam-se os graus-dias dos sensores e do EnergyPlus, para esse período de tempo. Os resultados foram 331 e 526, respectivamente, o que significa que o EnergyPlus considera uma maior severidade do clima, para a estação de aquecimento, do que a verificada no período de medição;
- Observando as diferenças de temperaturas, interior e exterior, dos sensores e do EnergyPlus, conclui-se que os valores registados pelos sensores correspondem a um comportamento mais linear da habitação. Os obtidos para o EnergyPlus mostram maior oscilação para dias consecutivos;
- A discrepância entre os valores registados pelos sensores e os obtidos pela simulação pode advir de propriedades da habitação inseridas que não correspondem à realidade, tal como, as renovações horárias, a forma como se simulou a cave, a influência da sujidade dos vidros no factor solar ou até, alguma inconformidade na constituição de um elemento;
- Analisando a frequência acumulada, da média das diferenças entre a temperatura interior e a exterior, conclui-se, mais uma vez, que há uma grande disparidade dos valores registados pelos sensores e os obtidos pela simulação, o que pode ser devido ao definido na simulação passiva. O desenvolvimento futuro desta simulação poderá trazer conclusões bastante interessantes e favoráveis ao estudo;
- Observando os valores das humidades relativas e das pressões de vapor, deduz-se que o balanço hídrico é considerado da mesma forma quer para os sensores, quer para o EnergyPlus.

Como conclusão final, observou-se que o EnergyPlus possibilita um estudo mais real que permite complementar qualquer análise. Esta ferramenta de optimização faculta, não só, o cálculo das necessidades energéticas, como também, o estudo das temperaturas, das condições de conforto, da eficiência dos sistemas de climatização, dos caudais de infiltração, etc. Reunindo toda a informação que o programa permite obter, o utilizador possui condições para um estudo detalhado podendo alcançar conclusões e decisões importantes, no sentido do controlo dos gastos energéticos, indo, assim, ao encontro das medidas da sustentabilidade do meio ambiente.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para continuidade do trabalho desenvolvido seria interessante o seguinte:

- Prolongar o intervalo de tempo das medições “*in situ*”, na presente moradia, para que fosse possível o estudo na estação de arrefecimento e com os equipamentos ligados;
- Estudar mais aprofundadamente a ferramenta EnergyPlus, no que diz respeito, nomeadamente, a sistemas de climatização e a energia geotérmica;
- Elaborar análises de sensibilidade, que permitissem comparar a influência dos vários dados a introduzir no programa e investigar as diferenças nos resultados que se viesse a obter;
- Explorar as potencialidades do EnergyPlus relativamente aos resultados que este disponibiliza;
- Estudar outros potenciais casos de sistemas de climatização com captação geotérmica e analisar os consumos energéticos;

- Utilizar outra ferramenta de simulação dinâmica para comparar resultados com a realizada, no âmbito do presente trabalho;
- Explorar o ficheiro climático e elaborar simulações com base em dados meteorológicos em tempo real.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AdePorto (<http://www.adeporto.eu/noticias/detalhes.php?id=28>). Janeiro de 2010.
- [2] RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 80, 4 de Abril de 2006
- [3] Melo, A. P., Lamberts, R. *Análise da Influência do Desempenho Térmico dos Fechamentos Opacos através do Balanço Térmico*. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia civil – LabEEE. Brasil, 2008.
- [4] EnergyPlus Development Team. EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-200, 2009.
- [5] Scarduelli, F. A., Westphal, F. S., Lamberts, R. *Aplicação do Método Bestest no EnergyPlus para Treinamento em Simulação do Desempenho Térmico de Edificações*. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia civil – LabEEE. Brasil, 2005.
- [6] Google Earth (earth.google.com/intl/pt/). Novembro de 2009
- [7] Alufloor (http://www.pyd.de/en_alufloor_trocken.phtml). Novembro de 2009.
- [8] Freitas, V. P. *Ventilação de Edifícios de Habitação*. LFC-FEUP, Porto.
- [9] NP1037-1: Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás, Parte 1: Edifícios de Habitação, Ventilação natural, Instituto Português da Qualidade. Portugal, 2002.
- [10] RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Anexo IV, Ventilação natural, Decreto-Lei n.º 80, 4 de Abril de 2006.
- [11] NIBE (<http://www.nibe.eu/Domestic-heatingcooling/Ground-source-heat-pumps/>). Novembro de 2009.
- [12] PYD – Thermosystem, In *Alufloor Dry*, pp. 23-28, Germany, 2008.
- [13] Disciplina de Térmica de Edifícios, Apontamentos da memória descritiva tipo para uma habitação unifamiliar, Comportamento Térmico, DEC-FEUP, 2009.
- [14] Santos, C., Matias, L. *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, ITE 50. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2006.
- [15] ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook – Fundamentals, pp. 39.1 a 39.4, Atlanta, 2005.
- [16] The Engineering Tool Box (www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html). Setembro de 2009.
- [17] www.vidromax.pt. Novembro de 2009.
- [18] Lusoduplo (www.lusoduplo.com.pt/vd-lusoclima). Novembro de 2009.
- [19] Saint – Gobain Glass (<http://pt.saint-gobain-glass.com/b2b/default.asp?nav1=pr&index=3>). Novembro de 2009.
- [20] EnergyPlus Energy Simulation Software (<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>). Setembro de 2009.

- [21] EnergyPlus Energy Simulation Software – Weather Data: Portugal (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal). Outubro de 2009.
- [22] Input/Output Reference, In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 156 a 291, 2009.
- [23] RCCTE, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Quadro IV.3, Decreto-Lei n.º 80, 4 de Abril de 2006.
- [24] Input/Output Reference, In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 487 a 505, 2009.
- [25] Input/Output Reference, In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 1240 a 1257, 2009.
- [26] Input/Output Reference, In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 531 a 654, 2009.
- [27] Input/Output Reference, In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 1455 a 1477, 2009.
- [28] Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (http://www.labeee.ufsc.br/pos-graduacao/ecv_4202/ecv4202_doc.html). Outubro 2009
- [29] Bryan, W. data logger guide series. In *Essentials for Building Commissioning*, Onset Computer Corporation, Welsh Commissioning Group, Inc., 2007.
- [30] RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Anexo V, Ventilação natural, Decreto-Lei n.º 80, 4 de Abril de 2006.
- [31] Freitas, V. P., LFC – NIT: 002 Permeabilidade ao vapor de materiais de construção – Condensações internas. Porto, 1998.

ANEXO

A1 – FOLHAS DE CÁLCULO UTILIZANDO O RCCTE

Folha de Cálculo FCIV.1a
Perdas associadas à Envolvente Exterior

Paredes Exteriores	Área (m ²)	U (W/m ² .°C)	U.A (W/°C)
Noroeste - Piso 0	15,93	0,644	10,26
Sudeste - Piso 0	19,85	0,707	14,03
Nordeste - Piso 0	31,85	0,654	20,83
Noroeste - Piso 1	21,9	0,769	16,84
Sudoeste - Piso 1	27,21	0,769	20,92
Nordeste - Piso 1	43,81	0,769	33,69
Sudoeste - Quarto 5	5,62	0,769	4,32
Nordeste - Quarto 5	9,77	0,769	7,51
		TOTAL	128,41

Pavimentos Exteriores	Área (m ²)	U (W/m ² .°C)	U.A (W/°C)
Pavimento - Quarto 5	20,7	0,82	16,97
		TOTAL	16,97

Coberturas Exteriores	Área (m ²)	U (W/m ² .°C)	U.A (W/°C)
Cobertura	98,5	0,376	37,04
		TOTAL	37,04

Paredes e pavimentos em contacto com o solo	Perímetro B (m)	ψ (W/m.°C)	ψ.B (W/°C)
			0,00
		TOTAL	0,00

Pontes térmicas lineares	Comp. B (m)	ψ (W/m.°C)	ψ.B (W/°C)
Ligações entre:			
Parede Noroeste/solo	6,2	0,40	2,48
Fachada com pavimento (espaço não aquecido)	23,7	0,80	18,96
Fachada com pavimento (espaço não aquecido)	7,4	0,60	4,44
Fachada com pavimento (espaço não aquecido)	12,2	0,50	6,10
Fachada com pavimentos intermédios	33,6	0,50	16,80
Fachada com cobertura inclinada ou terraço	33,6	0,55	18,49
Fachada com cobertura inclinada ou terraço	7,4	0,75	5,55
Fachada com corpo balançado	7,4	0,45	3,33
Duas paredes verticais	14,7	0,50	7,35
Fachada com padieira, ombreira ou peitoril		0,00	0,00
		TOTAL	83,50

**Perdas pela envolvente exterior
da Fracção Autónoma**

(W/°C) **TOTAL** **265,92**

Folha de Cálculo FCIV.1b
Perdas associadas à Envolvente Interior

Paredes em contacto com espaços não-úteis ou edifícios adjacentes	Área (m²)	U (W/m².°C)	τ (-)	τ.U.A (W/°C)
Sudeste - Quarto 5	27,3	0,485	0,6	7,94
			TOTAL	7,94

Pavimentos sobre espaços não-úteis	Área (m²)	U (W/m².°C)	τ (-)	τ.U.A (W/°C)
Pavimento - Piso 0	80,9	0,544	0,5	22,00
			TOTAL	22,00

Coberturas Interiores (tectos sob espaços não-úteis)	Área (m²)	U (W/m².°C)	τ (-)	τ.U.A (W/°C)
				0,00
			TOTAL	0,00

Vãos envidraçados em contacto com espaços não-úteis	Área (m²)	U (W/m².°C)	τ (-)	τ.U.A (W/°C)
				0,00
			TOTAL	0,00

Pontes térmicas (apenas para paredes de separação para espaços não-úteis com τ>0,7)	Comp. B (m)	ψ (W/m.°C)	τ (-)	τ.ψ.B (W/°C)
				0,00
			TOTAL	0,00

Perdas pela envolvente interior da Fracção Autónoma

(W/°C)

TOTAL	29,95
--------------	--------------

Incluir obrigatoriamente os elementos que separam a Fracção Autónoma dos seguintes espaços:
Zonas comuns em edifícios com mais de uma Fracção Autónoma;
Edifícios anexos;
Garagens, armazéns, lojas e espaços não-úteis similares;
Sotãos não-habitados.

Folha de Cálculo FCIV.1c
Perdas Associadas aos Vãos Envidraçados Exteriores

Vãos envidraçados exteriores	Área (m ²)	U (W/m ² .°C)	U.A (W/°C)
Verticais:			
Env Sala 1	6,98	2,8	19,54
Env Sala 2	6,98	2,8	19,54
Env Sala 3	6,98	2,8	19,54
Env Sala 4	6,98	2,8	19,54
Env Quarto 1	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 2	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 3	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 4	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 5	4,15	2,8	11,62
Horizontais:			
Claraboia 1	0,25	5,7	1,43
Claraboia 2	0,25	5,7	1,43
Claraboia 3	0,84	5,7	4,79
Claraboia 4	0,25	5,7	1,43
Claraboia 5	0,36	5,7	2,05
Claraboia 6	0,36	5,7	2,05
Claraboia 7	0,25	5,7	1,43
		TOTAL	150,87

Folha de Cálculo FC IV.1d
Perdas associadas à Renovação de Ar

Área Útil de Pavimento	179,4	(m ²)
Pé-direito médio	2,45	(m)
	=	
Volume interior (V)	439,53	(m ³)

VENTILAÇÃO NATURAL (Quadro a considerar sempre que o único dispositivo de ventilação mecânica existente seja o exaustor da cozinha)

Cumprir a NP 1037-1? (S ou N) se SIM: RPH =

Se NÃO:

Classe da Caixilharia (s/c, 1, 2 ou 3)		Taxa de Renovação Nominal: Ver Quadro IV.1 RPH=
Caixas de Estore (S ou N)		
Classe de Exposição (1, 2, 3 ou 4)		
(Ver Quadro IV.2)		
Aberturas Auto-reguladas? (S ou N)		
Área de envidraçados > 15% Ap? (S ou N)		
Portas Exteriores bem vedadas? (S ou N)		

VENTILAÇÃO MECÂNICA (excluir exaustor da cozinha)

Caudal de Insuflação Vins - (m ³ /h)		Vf = 0,00
Caudal Extraído Vev - (m ³ /h)		
Diferença entre Vins e Vev (m ³ /h)	0,00	/
Infiltrações (Vent. Natural) Vx - (h ⁻¹)		V = 0 (volume int) RPH (**)
Recuperador de calor (S ou N)		se SIM, η = se NÃO, η = 0
Taxa de Renovação Nominal (mínimo: 0,6)	0,000	(Vf / V + Vx). (1-η)
Consumo de Electricidade para os ventiladores		(Ev=Pvx24x0,03xM(kWh))

Volume	439,53	
	x	
Taxa de Renovação Nominal	0,600	
	x	
	0,34	
	=	
TOTAL	89,66	(W/°C)

Folha de Cálculo FC IV.1e

Ganhos Úteis na Estação de Aquecimento (Inverno)

Ganhos Solares:

Orientação do vão envidraçado	Tipo (simples ou duplo)	Área A (m²)	Factor de orientação X (-)	Factor Solar do vidro g (-)	Factor de Obstrução Fs (-)	Fração Envidraçada Fg (-)	Factor de Sel. Angular Fw (-)	Área Efectiva Ae (m²)
Env Sala 1 - Sudoeste	Duplo	6.98	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	1.19
Env Sala 2 - Sudoeste	Duplo	6.98	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	1.19
Env Sala 3 - Sudoeste	Duplo	6.98	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	1.19
Env Sala 4 - Sudoeste	Duplo	6.98	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	1.19
Env Quarto 1 - Sudoeste	Duplo	4.15	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	0.71
Env Quarto 2 - Sudoeste	Duplo	4.15	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	0.71
Env Quarto 3 - Sudoeste	Duplo	4.15	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	0.71
Env Quarto 4 - Sudoeste	Duplo	4.15	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	0.71
Env Quarto 5 - Sudoeste	Duplo	4.15	0.84	0.75	0.43	0.7	0.9	0.71
Claraboia 1	Simples	0.25	0.89	0.81	1	0.7	0.9	0.11
Claraboia 2	Simples	0.25	0.89	0.81	1	0.7	0.9	0.11
Claraboia 3	Simples	0.84	0.89	0.81	1	0.7	0.9	0.38
Claraboia 4	Simples	0.25	0.89	0.81	1	0.7	0.9	0.11
Claraboia 5	Simples	0.36	0.89	0.81	1	0.7	0.9	0.16
Claraboia 6	Simples	0.36	0.89	0.81	1	0.7	0.9	0.16
Claraboia 7	Simples	0.25	0.89	0.81	1	0.7	0.9	0.11

Área efectiva total equivalente na orientação Sul (m²)

9.47

x

Radiação incidente num envidraçado a Sul (Gsol) na zona

12

 do Quadro III. 8 (Anexo III) - (kWh/m².mês)

93

x

Duração da estação de aquecimento - do Quadro III.1 (meses)

6.7

=

5900.15

Ganhos Solares Brutos (kWh/ano)

Ganhos Internos

Ganhos internos médios	(Quadro IV.3)	4	(W/m²)
Duração da Estação de Aquecimento	6.70	x	(meses)
Área Útil de pavimento	179.40	x	(m²)
	0.72	=	
Ganhos Internos Brutos	3461.70		(kWh/ano)

Ganhos Úteis Totais:

$$\gamma = \frac{\text{Ganhos Solares Brutos} + \text{Ganhos Internos Brutos}}{\text{Necessidades Brutas de Aquecimento (da FC IV.2)}}$$

Inércia do edifício:
(*I*h, *F*raca=1; *I*n, *M*édia=2; *I*n, *F*orte=3)

$$a = \frac{4.2}{(t)}$$

$$\gamma = 0.45$$

Factor de Utilização dos Ganhos Térmicos

0.98

x

Ganhos Solares Brutos + Ganhos Internos Brutos

9361.86

=

Ganhos Úteis Totais (kWh/ano)

9176.62

Cálculo Intermediário:

Se $\gamma = 1$ $\eta = 0.807692$

Se $\gamma \neq 1$ $\eta = 0.980214$

Folha de Cálculo FC IV.1f
Valor Máximo das Necessidades de Aquecimento (Ni)

Factor de forma		
De FCIV.1a e FCIV.1c:	(Áreas)	m ²
Paredes exteriores		175,94
Coberturas exteriores		98,5
Pavimentos exteriores		20,7
Envidraçados exteriores		51,23
De FCIV.1b:	(Áreas equivalentes, A . τ)	
Paredes interiores		27,3
Coberturas interiores		0
Pavimentos interiores		80,9
Envidraçados interiores		0
Área total:		454,57
		/
Volume (de FCIV.1d):		439,53
		=
FF		1,03

Graus-dias no local (°C.dia) (do Quadro III.1) 1610

Ni = 4,5 + 0,0395 GD	Para FF < 0,5	Auxiliar 68,095
Ni = 4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD	Para 0,5 < FF < 1	99,918
Ni = [4,5 + (0,021 + 0,037FF) GD] (1,2 - 0,2FF)	Para 1 < FF < 1,5	99,234
Ni = 4,05 + 0,06885 GD	Para FF > 1,5	114,899

Nec. Nom. de Aquec. Máximas - Ni (kWh/m2.ano) 99,23

Folha de Cálculo FC IV.2
Cálculo do Indicador Nic

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior (de FCIV.1a)	265,92
Envolvente Interior (de FCIV.1b)	29,95
Vãos Envidraçados (de FCIV.1c)	150,87
Renovação de Ar (de FCIV.1d)	89,66
	=
Coefficiente Global de Perdas (W/°C)	536,40
	x
Graus-dias no Local (°C.dia)	1610,00
	x
	0,024
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	20726,58
	+
Consumo de Electricidade para os ventiladores ($E_v = P_v \times 24 \times 0,03 \times M$ (kWh))	0
	-
Ganhos Totais Úteis (kWh/ano) (de FCIV.1e)	9176,62
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	11549,96
	/
Área Útil de Pavimento (m ²)	179,40
	=
Nec. Nominais de Aquecimento - Nic (kWh/m ² .ano)	64,38
	≤
Nec. Nominais de Aquec. Máximas - Ni (kWh/m ² .ano)	99,23

Verifica

O.K.

Nic/Ni = 64,88%

Folha de cálculo FCV.1a
Perdas

Perdas associadas às paredes exteriores (U.A)	(FCIV.1a)	128,41	(W/°C)
		+	
Perdas associadas aos pavimentos exteriores (U.A)	(FCIV.1a)	16,97	(W/°C)
		+	
Perdas associadas às coberturas exteriores (U.A)	(FCIV.1a)	37,04	(W/°C)
		+	
Perdas associadas aos envidraçados exteriores (U.A)	(FCIV.1c)	150,87	(W/°C)
		+	
Perdas associadas à renovação do ar	(valor final da FCIV.1d / (1-η))	89,66	(W/°C)
<i>(o efeito do recuperador de calor, caso exista, não deve ser considerado no Verão)</i>			
		=	
Perdas específicas totais	(Q1a)	422,95	(W/°C)

Temperatura interior de referência		25	(°C)
		-	
Temperatura média do ar exterior na estação de arrefecimento		19	(°C)
(Quadro III.9)		=	
Diferença de temperatura interior-exterior		6	
		x	
Perdas específicas totais	(Q1a)	422,95	(W/°C)
		x	
		2,928	
		=	
Perdas térmicas totais	(Q1b)	7430,42	(kWh)

Folha de Cálculo FC V.1b
Perdas associadas a Coberturas e Envidraçados Exteriores (Verão)

Perdas associadas às coberturas exteriores

Coberturas exteriores	Área (m ²)	U (W/m ² °C)	U.A (W/°C)
Cobertura	98,5	0,376	37,04
TOTAL			37,04

Perdas associadas aos envidraçados exteriores

Envidraçados Exteriores	Área (m ²)	U (W/m ² °C)	U.A (W/°C)
Env Sala 1	6,98	2,8	19,54
Env Sala 2	6,98	2,8	19,54
Env Sala 3	6,98	2,8	19,54
Env Sala 4	6,98	2,8	19,54
Env Quarto 1	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 2	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 3	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 4	4,15	2,8	11,62
Env Quarto 5	4,15	2,8	11,62
Claraboia 1	0,25	5,7	1,43
Claraboia 2	0,25	5,7	1,43
Claraboia 3	0,84	5,7	4,79
Claraboia 4	0,25	5,7	1,43
Claraboia 5	0,36	5,7	2,05
Claraboia 6	0,36	5,7	2,05
Claraboia 7	0,25	5,7	1,43
TOTAL			150,87

Folha de Cálculo FC V.1c
Ganhos Solares pela Envolvente Opaca

POR ORIENTAÇÃO E HORIZONTAL (inclui paredes e cobertura)

Orientação	NW-Piso0	SE-Piso0	NE-Piso0	NW-Piso1	SW-Piso1	NE-Piso1	SW-Quar5	NE-Quar5	Cobertura
Área, A (m²)	15,93	19,85	31,85	21,90	27,21	43,81	5,62	9,77	98,5
	x	x	x	x	x	x	x	x	x
U (W/m²°C)	0,644	0,707	0,654	0,769	0,769	0,769	0,769	0,769	0,376
	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4
	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	8,20	11,23	16,66	13,47	16,74	26,95	3,46	6,01	14,81
	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	300	430	300	300	430	300	430	300	730
	x	x	x	x	x	x	x	x	x
0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	=	=	=	=	=	=	=	=	=
Ganhos Solares pela Envolvente Opaca Exterior	98,45	193,11	199,97	161,67	287,92	323,42	59,47	72,13	432,58
	TOTAL								1828,72 (kWh)

Coefficiente de absorção, α (Quadro V.5)

α.U.A (W/°C)

Int. de rad. solar na estação de arrefec.
(kWh/m²) (Quadro III.9)

Folha de cálculo FC V.1e
Ganhos Internos

Ganhos Internos médios (W/m ²) (Quadro IV.3)	4	
	x	
Área Útil de Pavimento (m2)	179,4	
	x	
	2,93	
	=	
Ganhos internos Totais	2101,13	(KWh)

Folha de cálculo FC V.1f
Ganhos Totais na estação de arrefecimento (verão)

Ganhos Solares pelos Vãos Envidraçados Exteriores (FCV.1d)	4969,49	(KWh)
	+	
Ganhos Solares pela Envolvente Opaca Exterior (FCV.1c)	1828,72	(KWh)
	+	
Ganhos internos (FCV.1e)	2101,13	(KWh)
	=	
Ganhos Térmicos Totais	8899,34	(KWh)

Folha de cálculo FCV.1g
Valor das Necessidades Nominais de Arrefecimento (Nvc)

Ganhos Térmicos Totais (FCV.1f) 8899,34 (kWh)
/

Perdas Térmicas Totais (FCV.1a) 7430,42 (kWh)
=

Relação Ganhos-Perdas γ 1,20

Inércia do edifício (In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3) 3

Cálculo intermédio:
 $a = 4,2$
 $\gamma = 1 \quad \eta = 0,807692$
 $\gamma \neq 1 \quad \eta = 0,728793$

	1	
	-	
Factor de utilização dos ganhos, η (Gráfico IV.1)	0,73	
	=	
	0,27	
	x	
Ganhos Térmicos Totais (FCV.1f)	8899,34	(kWh)
	=	
Necessidades Brutas de Arrefecimento	2413,56	(kWh/ano)
	+	
Consumo dos ventiladores (se houver, exaustor da cozinha excluído)	0,00	(Ev=Pvx24x0,122(kWh))
	=	
TOTAL	2413,56	(kWh/ano)
	/	
Área Útil de Pavimento (m ²)	179,40	
	=	
Necessidades Nominais de Arrefecimento - Nvc	13,45	(kWh/m ² .ano)
	≤	
Necessidades Nominais de Arref. Máximas - Nv (Nº2 do Artigo 15º)	16	(kWh/m ² .ano)

Verifica O.K.

Nvc/Nv = 84,08%

Necessidades Globais de Energia Primária

Ni (kW.h/m ² .ano)	99,23
Ntc (kW.h/m ² .ano)	64,38
Nv (kW.h/m ² .ano)	16,00
Nvc (kW.h/m ² .ano)	13,45
Na (kW.h/m ² .ano)	366,5
Nac (kW.h/m ² .ano)	284,67
ηi	4,00
Art. 18.º - ponto 2	
nv	5,00
Art. 18.º - ponto 2	
F _{pai} (kgep/kW.h)	0,086
Art. 18º - ponto 1	
F _{pav} (kgep/kW.h)	0,290
Art. 18º - ponto 1	
F _{pua} (kgep/kW.h)	0,086
Art. 18º - ponto 1	

Necessidades nominais globais de energia primária, N_{ic}

24,70 (kgep/m².ano)

Valor máximo das nec. nominais globais de energia primária, N_t

54,57 (kgep/m².ano)

Ntc ≤ Nt? Verifica

Ntc/Nt = 45,26%

Cálculo das necessidades de energia para preparação de água quente sanitária

Nº de ocupantes (Quadro VI.1)	6,00	
Consumo médio diário de referência de AQS (M_{AQS}) (edifícios residenciais - 40 litros/ocupante)	2406,00	
Aumento de temperatura necessário (ΔT) (considerar igual a 45°C)	45,00	
Número anual de dias de consumo (n_d) (Quadro VI.2)	365,00	
Energia despendida com sistemas convencionais (Q_a)	45962,27	(kW.h/ano)
Eficiência de conversão do sistema de preparação de AQS (η_a) (Ponto 3 do Anexo VI)	0,90	
E_{solar}	0,00	Programa SOLTERM
E_{ren}	0,00	
Necessidades de energia para preparação de AQS, N_{ac}	284,67	(kW.h/m ² .ano)
Valor máximo para as nec. de energia para preparação de AQS, N_a	396,51	(kW.h/m ² .ano)

$N_{ac} \leq N_a$? Verifica

$N_{ac}/N_a = 71,79\%$