

VALIDAÇÃO DE MODELOS DE CÁLCULO POR COMPARAÇÃO COM MEDIÇÕES “IN SITU” – CONDIÇÕES FRONTEIRA

DANIEL FILIPE PIRES GONÇALVES

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

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JUNHO 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.

Aos meus Pais

Ao meu irmão

À Daniela

Deus quer, o homem sonha, a obra nasce.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Apesar de esta dissertação ser apresentada como o resultado de um trabalho individual esta resultou, na realidade, do apoio de várias pessoas que contribuíram com um conjunto de ensinamentos, apoio informático ou com uma simples palavra de encorajamento.

Deste modo, fica o meu mais sincero agradecimento:

Ao meu orientador, o Prof. Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos, por toda a disponibilidade demonstrada ao longo desta jornada, quer em termos de esclarecimento de dúvidas quer em termos de aconselhamento sobre o rumo a seguir, não esquecendo todos os conhecimentos transmitidos e a simpatia com que sempre me atendeu.

Aos meus pais por todo o amor e dedicação que demonstraram ao longo dos anos e por todos os ensinamentos que me tornaram no homem que hoje sou.

Ao meu irmão por todo o companheirismo e amizade.

À Daniela por todo o seu apoio, não apenas no decorrer desta dissertação mas, durante todos estes anos maravilhosos em que sempre demonstrou o seu amor.

A toda a minha família.

Aos meus colegas, em primeiro lugar pela amizade demonstrada, e em segundo por toda a ajuda e apoio prestados.

A todos que anteriormente foram mencionados, e a todos aqueles que de alguma forma prestaram a sua ajuda na realização deste documento, o mais profundo obrigado.

RESUMO

A recente preocupação com conforto térmico e eficiência energética tem levado à utilização crescente de programas de simulação térmica. Torna-se assim necessário saber até que ponto este tipo de ferramentas produz resultados fiáveis e qual a influência que os dados climáticos utilizados produzem nos resultados.

O objectivo principal desta dissertação é o de validação de modelos de cálculo por comparação com medições “*in situ*”, incidindo sobre as condições fronteira, nomeadamente o clima.

Para atingir o objectivo principal foi escolhida uma poderosa ferramenta informática de cálculo higratérmico – EnergyPlus.

Numa primeira fase procedeu-se ao estudo da formulação matemática subjacente ao programa, nomeadamente a relacionada com parâmetros climáticos.

Para validação e exploração do programa EnergyPlus procedeu-se ao estudo do caso 920 da ASHRAE (método BESTEST).

Para realizar as simulações o programa utiliza um ficheiro climático. Normalmente são utilizados ficheiros TMY, ou seja ano meteorológico típico. Neste caso foi utilizado um ficheiro climático obtido através das medições da estação meteorológica do LFC-FEUP. Procedeu-se à comparação, dos parâmetros climáticos mais importantes utilizados pelo EnergyPlus, entre o TMY e os valores reais medidos pela estação do LFC-FEUP.

Para a validação do programa procedeu-se à comparação entre os resultados das simulações do programa e os resultados de medições “*in situ*” obtidas de sensores colocados na habitação em estudo.

Efectuou-se uma análise de sensibilidade através da alteração de parâmetros climáticos, presentes no ficheiro climático utilizado pelo programa. Esta permitiu aproximar os resultados das simulações aos resultados dos sensores e inferir a relevância, de cada parâmetro, nas simulações.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação térmica, EnergyPlus, Medições “*in situ*”, Condições fronteira, Estação meteorológica do LFC-FEUP.

ABSTRACT

The recent concern with thermal comfort and energy efficiency has led to increased use of thermal simulation programs. It thus becomes necessary to know how such tools produce reliable results and what influence has the weather data used in producing results.

The main objective of this thesis is the validation of model calculations by comparing with “in situ” measurements, focusing on the boundary conditions, mainly the weather.

To achieve the main objective was chosen a powerful tool to hygrothermal calculation - EnergyPlus.

As a first step it was performed a study of the mathematical formulation underlying the program, mainly related to climatic parameters.

For validation and exploration of the program EnergyPlus it was performed a study of the ASHRAE’s 920 case (BESTEST method).

To perform the simulations, the program uses a weather file. TMY files are regularly used, which means typical meteorological years. In this case it was used a weather file obtained through measurements of the meteorological station of LFC-FEUP. The author proceeded to the comparison of the most important climate parameters, used by EnergyPlus, between TMY and the actual values measured by the meteorological station of LFC-FEUP.

To validate the program the author compared the simulation results of the program and the results of measurements “in situ” obtained from the sensors placed in the study house.

A sensitivity analysis was carried out by changing climatic parameters, existing in the weather file used by the program. It allowed an approach of the simulation results to the results of the sensors and to conclude the importance of each parameter in the simulations.

KEYWORDS: Thermal simulation, EnergyPlus, “in situ” measurements, boundary conditions, meteorological station of LFC-FEUP.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2
 2. ENERGYPLUS – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO	 3
2.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA	3
2.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	5
2.2.1. CONCEITO DE ZONA	5
2.2.2. CONDUÇÃO ATRAVÉS DAS PAREDES	7
2.2.3. BALANÇO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE EXTERIOR	8
2.2.4. CÁLCULO DA TEMPERATURA DO CÉU	9
2.2.5. CÁLCULO DA TEMPERATURA LOCAL DO AR EXTERIOR	9
2.2.6. CÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTO LOCAL	10
2.2.7. VENTILAÇÃO	11
2.2.8. CONVECÇÃO EXTERIOR	11
2.2.9. BALANÇO TÉRMICO INTERIOR	11
2.2.10. MODELO DE RADIAÇÃO DO CÉU	12
2.2.11. MODELO DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA DO CÉU NUMA SUPERFÍCIE INCLINADA	13
2.2.12. SOMBREAMENTO DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA DO CÉU	14
2.2.13. DISTRIBUIÇÃO SOLAR	16
2.2.14. RADIAÇÃO SOLAR ABSORVIDA POR SUPERFÍCIES OPACAS INTERIORES	17
2.3. SÍNTESE DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS UTILIZADOS NO PROGRAMA	17
2.4. BESTEST	18
2.4.1. DESCRIÇÃO DO BESTEST	18
2.4.2. DESCRIÇÃO DO CASO BESTEST – 920	19

3. CLIMA EXTERIOR	27
3.1. DADOS CLIMÁTICOS	27
3.1.1. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO TMY	27
3.1.2. ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO LFC-FEUP	29
3.1.2.1 Criação do Ficheiro Climático	32
3.2. PARÂMETROS CLIMÁTICOS	33
3.2.1. TEMPERATURA EXTERIOR	33
3.2.2. HUMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO	36
3.2.3. RADIAÇÃO DIRECTA NORMAL	40
3.2.4. RADIAÇÃO HORIZONTAL DIFUSA	43
3.2.5. INTENSIDADE DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA HORIZONTAL DO CÉU	46
3.2.6. VELOCIDADE DO VENTO	48
4. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	51
4.1. TRABALHOS ANTERIORES	51
4.2. EDIFÍCIO	51
4.3. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	56
4.3.1. DESCRIÇÃO DAS PAREDES	56
4.3.1.1. Paredes Exteriores Piso 0	56
4.3.1.2. Paredes Exteriores Piso 1	57
4.3.1.3. Parede De Separação da Habitação Adjacente	58
4.3.1.4. Paredes Interiores	59
4.3.2. DESCRIÇÃO DOS PAVIMENTOS	59
4.3.3. DESCRIÇÃO DA COBERTURA	60
4.3.4. DESCRIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS	60
4.4. INTRODUÇÃO DOS DADOS NO ENERGY PLUS	62
4.4.1. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO [10]	62
4.4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO [10]	63
4.4.3. DEFINIÇÃO DE MATERIAIS OPACOS [10]	63
4.4.4. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS (GRUPO WINDOWMATERIAL:SIMPLEGLAZINGSYSTEM) [10]	63
4.4.5. DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS (GRUPO ZONE) [10]	63
4.4.6. DEFINIÇÃO DA VENTILAÇÃO (GRUPO ZONEVENTILATION) [10]	64
4.5. MEDIÇÕES “IN SITU”	64

4.5.1 DESCRIÇÃO DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO	64
4.5.2 COLOCAÇÃO DOS SENSORES	65
4.6. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	67
4.6.1. RESULTADOS DOS SENSORES DA ZONA 1 (PISO 0).....	67
4.6.2. RESULTADOS DOS SENSORES DA ZONA 2 (PISO 1).....	68
4.6.3. RESULTADOS DOS SENSORES DA ZONA 3 (QUARTO 5 – PISO 1).....	70
4.6.4. RESULTADOS DO SENSOR EXTERIOR.....	72
4.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	73
4.7.1. MODELO GEOMÉTRICO	73
4.7.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	74
4.7.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	75
4.7.3.1 Simulação Vs Medição (Piso 0)	75
4.7.3.2 Simulação Vs Medição (Piso 1)	77
4.7.3.3 Simulação Vs Medição (Quarto 5)	78
 5. ESTUDO DE SENSIBILIDADE - CLIMA EXTERIOR	 81
5.1. SIMULAÇÕES	81
5.1.1. DIMINUIÇÃO DE TEMPERATURA DO FICHEIRO CLIMÁTICO	81
5.1.1.1. Zona 1	81
5.1.1.2. Zona 2	85
5.1.1.3. Zona 3	87
5.1.2. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO DIRECTA NORMAL NO FICHEIRO CLIMÁTICO	90
5.1.2.1. Zona 1	90
5.1.2.2. Zona 2	92
5.1.2.3. Zona 3	94
5.1.3. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO DIFUSA HORIZONTAL.....	96
5.1.3.1. Zona 1	96
5.1.3.2. Zona 2	97
5.1.3.3. Zona 3	98
5.1.4. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA	99
5.1.4.1. Zona 1	99
5.1.4.2. Zona 2	100
5.1.4.3. Zona 3	101

5.1.5. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO DIRECTA NORMAL E DIFUSA HORIZONTAL	102
5.1.5.1. Zona 1.....	102
5.1.5.2. Zona 2.....	105
5.1.5.3. Zona 3.....	108

6 CONCLUSÕES	117
6.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS	117
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	120
BIBLIOGRAFIA	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Diagrama de funcionamento do EnergyPlus [adaptado de 3]	4
Fig.2 – Esquema de organização interna do EnergyPlus [adaptado de 3].....	4
Fig.3 – Funcionamento em cada zona térmica do edifício [adaptado de 5]	5
Fig.4 – Exemplo de modelo a dois nós [4]	8
Fig.5 – Diagrama de controlo de volume de balanço térmico exterior [adaptado de 4]	8
Fig.6 – Diagrama de controlo de volume de balanço térmico interior [adaptado de 4]	11
Fig.7 – Vista esquemática do céu mostrando a distribuição de radiação solar como uma combinação de três componentes: Cúpula com radiação isotrópica, brilho circumsolar representado por uma origem de um ponto no sol, brilho do horizonte representado por uma origem de linha no horizonte [adaptado de 4].....	13
Fig.8 – Representação do Esquema Geral de Sombreamento [4]	15
Fig.9 – Representação da Posição Solar [4].....	15
Fig.10 – Secção vertical de dum edifício dividido em duas zonas, Z1 e Z2, ilustrando a transmissão dos raios solares [4]	17
Fig.11 – Caso 920 do BESTEST.....	20
Fig.12 – Energia de Aquecimento Anual – Comparação com os programas de referência [8].....	24
Fig.13 – Energia de Arrefecimento Anual – Comparação com os programas de referência [8]	25
Fig.14 – Potência de Pico de Aquecimento – Comparação com os programas de referência [8]	25
Fig.15 – Potência de Pico de Arrefecimento – Comparação com os programas de referência [8]	26
Fig.16 – Vista Geral da Estação Meteorológica do LFC-FEUP [14].....	29
Fig.17 – Sensor de temperatura e humidade relativa [14].....	29
Fig.18 – Piranómetro – Medição de radiação solar [14]	30
Fig.19 – Anemómetro – Medição da velocidade e/ou força do vento [14].....	30
Fig.20 – Cata-vento – Medição da orientação do vento [14]	30
Fig.21 – Pirgeómetro – Medição de radiação terrestre e atmosférica [14].....	31
Fig.22 – Pluviómetro – Medição de precipitação [14]	31
Fig.23 – Sistema de aquisição de dados – Guarda a informação registada pela estação [14].....	31
Fig.24 – Temperatura de bolbo seco do ficheiro TMY do Porto	33
Fig.25 – Temperatura de bolbo seco para estação do LFC-FEUP, TMY e sensor 15 (exterior)	34
Fig.26 – Temperatura de bolbo seco para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).....	35
Fig.27 – Temperatura de bolbo seco para estação do LFC-FEUP para os dias 6,7 e 8 de Dezembro (período frio).....	36

Fig.28 – Humidade relativa anual do TMY do Porto	36
Fig.29 – Temperatura de Ponto de Orvalho anual do TMY do Porto.....	37
Fig.30 – Humidade relativa para estação do LFC-FEUP, TMY e sensor 15 (exterior).....	38
Fig.31 – Temperatura de ponto de orvalho para estação do LFC-FEUP e TMY.....	39
Fig.32 – Radiação directa normal anual do TMY do Porto	40
Fig.33 – Radiação directa normal para estação do LFC-FEUP e TMY	41
Fig.34 – Radiação directa normal para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).	42
Fig.35 – Radiação directa normal para estação do LFC-FEUP para os dias 6,7 e 8 de Dezembro (período frio).	42
Fig.36 – Radiação Horizontal Difusa anual do TMY do Porto.....	43
Fig.37 – Radiação Horizontal Difusa para estação do LFC-FEUP e TMY.....	44
Fig.38 – Radiação Horizontal Difusa para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).	45
Fig.39 – Radiação Horizontal Difusa para estação do LFC-FEUP para os dias 6,7 e 8 de Dezembro (período frio).	45
Fig.40 – Intensidade de radiação infravermelha horizontal do céu para o TMY do Porto	46
Fig.41 – Intensidade de radiação infravermelha horizontal do céu para estação da FEUP e TMY	47
Fig.42 – Intensidade de radiação infravermelha horizontal do céu para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).....	48
Fig.43 – Velocidade do vento – TMY anual do Porto.....	48
Fig.44 – Velocidade do vento para estação do LFC-FEUP e TMY.....	49
Fig.45 – Planta geral da distribuição das moradias	51
Fig.46 – Planta Piso -1	52
Fig.47 – Planta Piso 0.....	52
Fig.48 – Planta piso 1	53
Fig.49 – Planta da cobertura	53
Fig.50 – Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste	53
Fig.51 – Corte da Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste	54
Fig.52 – Corredor de acesso às moradias	54
Fig.53 – Fachada de Sudeste	55
Fig.54 – Fachada Noroeste	55
Fig.55 – Fachada Nordeste	55
Fig.56 – Fachada Nordeste - corte.....	56
Fig.57 – Parede de Tipo 1 – Fachada Sudeste.....	56

Fig.58 – Parede de Tipo 2 – Fachada Noroeste	57
Fig.59 – Parede de Tipo 3 – Fachada Nordeste	57
Fig.60 – Parede de Tipo 4 – Fachadas Sudoeste, Nordeste e Noroeste	57
Fig.61 – Parede de Tipo 5 – Parede exterior inclinada rectangular.....	58
Fig.62 – Parede de Tipo 5 – Parede exterior inclinada triangular.....	58
Fig.63 – Parede de Tipo 6 – Parede de separação das habitações.....	59
Fig.64 – Parede de Tipo 7 – Parede Interior.....	59
Fig.65 – Pavimento	60
Fig.66 – Cobertura	60
Fig.67 – Envidraçados sala	61
Fig.68 – Envidraçados do piso 0	61
Fig.69 – Envidraçado da sala situa a Nordeste	61
Fig.70 – Pormenor de espaço exterior – Entrada de luz na sala e cave	62
Fig.71 – Clarabóia triangular e rectangular	62
Fig.72 – Zona térmica 1 [10]	63
Fig.73 – Zonas térmicas 2 e 3 [10].....	64
Fig.74 – Abertura para ventilação natural	64
Fig.75 – Sensor HOBO	65
Fig.76 – Colocação dos sensores no piso 0 – zona térmica 1 [10]	65
Fig.77 – Colocação dos sensores no piso 1 – zonas térmicas 1 e 2 [10].....	65
Fig.78 – Colocação do sensor 5 no piso 1	66
Fig.79 – Colocação do sensor 15 no exterior	67
Fig.80 – Temperatura do piso 0 medida pelos sensores.....	68
Fig.81 – Temperatura média dos sensores do piso 0.....	68
Fig.82 – Temperatura da zona 2 medida pelos sensores.....	69
Fig.83 – Temperatura média dos sensores da zona 2.....	70
Fig.84 – Humidade Relativa medida pelo sensor 1	70
Fig.85 – Temperatura da zona térmica 3 (quarto 5 – piso1).....	71
Fig.86 – Temperatura do quarto 5 e do quarto intermédio (sensor 5).....	71
Fig.87 – Temperatura das três zonas térmicas.....	72
Fig.88 – Temperatura exterior medida pelo sensor 15	72
Fig.89 – Humidade Relativa exterior medida pelo sensor 15	73
Fig.90 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Sudoeste.....	74

Fig.91 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Nordeste.....	74
Fig.92 – Temperatura das três zonas térmicas, obtida pela simulação do EnergyPlus	75
Fig.93 – Comparação de temperatura da simulação e da média dos sensores – Piso 0.....	76
Fig.94 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 0	76
Fig.95 – Comparação de temperatura da simulação e da média dos sensores – Piso 1.....	77
Fig.96 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 1	77
Fig.97 – Comparação de humidade relativa da simulação e do sensor 1 – Piso 1	78
Fig.98 – Comparação de temperatura da simulação e do sensor 12 – Quarto 5	78
Fig.99 – Frequências acumuladas da temperatura para o quarto 5	79
Fig.100 – Temperatura da zona 1 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático	81
Fig.101 – Temperatura da zona 1 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático.....	82
Fig.102 – Frequências acumuladas – Zona 1	82
Fig.103 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total–Zona1.....	83
Fig.104–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 1.....	83
Fig.105–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 1.....	84
Fig.106 – Frequências acumuladas – Zona 1 – diminuição dos máximos de temperatura.....	84
Fig.107 – Temperatura da zona 2 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático.....	85
Fig.108 – Frequências acumuladas – Zona 2	85
Fig.109 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona2	86
Fig.110–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 2.....	86
Fig.111–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 2.....	86
Fig. 112–Temperatura da zona 3 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático.....	87
Fig.113 – Frequências acumuladas – Zona 3	87
Fig.114– Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona3	88
Fig.115–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 3.....	88
Fig.116–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 3.....	88
Fig.117 – Frequências acumuladas – Zona 1	91

Fig.118 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona1	91
Fig.119 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 - Zona1	92
Fig.120 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 - Zona1	92
Fig.121 – Frequências acumuladas – Zona 2.....	92
Fig.122 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona2	93
Fig.123–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 2	93
Fig.124–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 2	94
Fig.125 – Frequências acumuladas – Zona 3.....	94
Fig.126– Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona3	95
Fig.127–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 3	95
Fig.128–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 3	95
Fig.129 – Frequências acumuladas – Zona 1.....	96
Fig.130– Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona1	97
Fig.131 – Frequências acumuladas – Zona 2.....	97
Fig.132 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona2	98
Fig.133 – Frequências acumuladas – Zona 3.....	98
Fig.134 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona3	99
Fig.135 – Frequências acumuladas – Zona 1.....	99
Fig.136 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona1	100
Fig.137 – Frequências acumuladas – Zona 2.....	100
Fig.138 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona2	101
Fig.139 – Frequências acumuladas – Zona 3.....	101
Fig.140 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona3	102

Fig.141 – Frequências acumuladas do período total – Zona 1	102
Fig.142 – Frequências acumuladas do período 1 – Zona 1	103
Fig.143 – Frequências acumuladas do período 2 – Zona 1	103
Fig.144 – Temperatura da zona 1 – Diminuição de radiação directa e difusa no ficheiro climático ...	104
Fig.145 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona1	104
Fig.146–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 1.....	105
Fig.147–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 1.....	105
Fig.148 – Frequências acumuladas do período total – Zona 2	105
Fig.149 – Frequências acumuladas do período 1 – Zona 2.....	106
Fig.150 – Frequências acumuladas do período 2 – Zona 2.....	106
Fig.151 – Temperatura da zona 2 – Diminuição de radiação directa e difusa no ficheiro climático ...	107
Fig.152 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona2	107
Fig.153–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 2.....	108
Fig.154–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 2.....	108
Fig.155 – Frequências acumuladas do período total – Zona 3.....	108
Fig.156 – Frequências acumuladas do período 1 – Zona 3.....	109
Fig.157 – Frequências acumuladas do período 2 – Zona 3.....	109
Fig.158 – Temperatura da zona 3 – Diminuição de radiação directa e difusa no ficheiro climático ...	110
Fig.159 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona3	110
Fig.160–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 3.....	111
Fig.161–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 3.....	111
Fig.162 - Temperatura da zona 1 – Aumento de 2°C de temperatura exterior e diminuição de 80% de radiação directa e difusa no ficheiro climático.....	113
Fig.163 - Temperatura da zona 2 – Aumento de 2°C de temperatura exterior e diminuição de 50% de radiação directa e difusa no ficheiro climático.....	114
Fig.164 - Temperatura da zona 3 - Aumento de 2°C de temperatura exterior e diminuição de 50% de radiação directa e difusa no ficheiro climático.....	114

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Localização e caracterização do clima	20
Quadro 2 – Constituição das paredes (Construção pesada) [8].....	21
Quadro 3 – Constituição do Pavimento (Construção pesada) [8].....	21
Quadro 4 – Constituição do Tecto (Construção leve) [8].....	21
Quadro 5 – Características dos envidraçados [8].....	22
Quadro 6 – Outras características do caso 920 [8].....	22
Quadro 7 – Resultados da simulação do EnergyPlus para o caso 920.....	23
Quadro 8 – Comparação com os resultados de outros programas [8]	24
Quadro 9 – Parâmetros presentes no EPW / Parâmetros utilizados pelo EnergyPlus [12]	27
Quadro 10 – Temperaturas mensais – ficheiro TMY	34
Quadro 11 – Temperatura máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP, TMY e sensor	35
Quadro 12 – Humidade Relativa mensal – ficheiro TMY	37
Quadro 13 – Temperatura de Ponto de Orvalho mensal – ficheiro TMY.....	37
Quadro 14 – Humidade relativa máxima, mínima e média da estação da FEUP, TMY e sensor, no período total.....	38
Quadro 15 – Temperatura de ponto de orvalho máxima, mínima e média da estação da FEUP e TMY	39
Quadro 16 – Radiação directa normal mensal – ficheiro TMY	40
Quadro 17 – Radiação horizontal difusa máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP e TMY	41
Quadro 18 – Radiação horizontal difusa mensal – ficheiro TMY	43
Quadro 19 – Radiação horizontal difusa máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP e TMY	44
Quadro 20 – Radiação infravermelha horizontal do céu – ficheiro TMY	46
Quadro 21 – Radiação infravermelha horizontal máxima, mínima e média da estação da FEUP e TMY	47
Quadro 22 – Velocidade do vento – ficheiro TMY	49
Quadro 23 – Velocidade do vento máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP e TMY	49
Quadro 24 – Diferença, entre as várias simulações e o sensor, de Média, P90 e P10 para as três zonas	89
Quadro 25 – Diferença, entre as várias simulações e o sensor, de Média, P90 e P10 para as três zonas	112
Quadro 26 - Diferença, entre as novas simulações e o sensor, de Média, P90 e P10 para as três zonas	115

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

λ	– Condutibilidade térmica [W/m.K]
U	– Coeficiente de transmissão térmica [W/m ² .K]
R	– Resistência térmica [m ² .K/W]
C _p	– Calor específico [J/kg.K]
e	– Espessura [m]
ρ	– Densidade [kg/m ³]
RPH	– Taxa de Renovação Horária [h ⁻¹]
HR	– Humidade Relativa [%]
P _s	– Pressão de Saturação [Pa]
P _v	– Pressão de Vapor [Pa]
T	– Temperatura [°C]
T _d	– Temperatura Ponto de Orvalho [°C]
I _i	– Intensidade da Radiação Directa Normal [Wh/m ²]
I _{gh}	– Intensidade da Radiação Global em Superfície Horizontal [Wh/m ²]
I _{dh}	– Intensidade da Radiação Difusa em Superfície Horizontal [Wh/m ²]
g	– Factor Solar
h_i	- Coeficiente de troca de calor por convecção;
A _i	– Área da superfície
T_{si}	- Temperatura da superfície i
T_z	- Temperatura da zona
m	– fluxo de massa;
T_∞	- Temperatura exterior;
C_p	- Calor específico;
T_{zi}	- Temperatura da zona i
q''	- Fluxo de calor
i	- Elemento interior da construção
o	- Elemento exterior da construção
t	– Passo de tempo actual
X e Y	– Factores de resposta
X _j	- Coeficiente exterior de CTF, j=0,1,...nz;
Y _j	- Coeficiente de atravessamento de CTF, j=0,1...nz;

Z_j - Coeficiente interior de CTF, $j=0,1,\dots,nz$;

ϕ_j - Coeficiente de fluxo de CTF, $j=1,2,\dots,nq$;

T_i - Temperatura da face interior;

T_o - Temperatura da face exterior;

q_{ko}'' - Fluxo de calor por condução na face exterior;

q_{ki}'' - Fluxo de calor por condução na face interior;

$q_{\alpha sol}''$ - Fluxo de calor da radiação solar directa e difusa absorvida (de onda curta);

q_{LWR}'' - Troca de fluxo por radiação de onda longa entre o ar e o ambiente;

q_{conv}'' - Troca de fluxo por convecção com o ar exterior;

q_{ko}'' - Fluxo de calor através da parede por condução.

T_{surf} - Temperatura da superfície exterior;

T_{gnd} - Temperatura da superfície do solo;

T_{sky} - Temperatura do céu;

T_{air} - Temperatura do ar.

T_{sky} - Temperatura radiativa do céu {C};

Horizontal_IR – Intensidade da radiação infravermelha horizontal {Wh/m²} (ficheiro climático);

Temperature_kelvin - Conversão de temperatura de Kelvin para C, ou seja, 273.15.

T_z - Temperatura do ar à altitude z ;

T_b - Temperatura do ar na base da camada, ou seja, ao nível do solo para a troposfera;

L - Gradiente de temperatura do ar, igual a -0.0065 K/m na troposfera;

H_b - Offset igual a zero para a troposfera;

H_z - Altitude Geopotencial

$T_{z,met}$ - Temperatura do ar do ficheiro climático (medida pela estação meteorológica);

Z_{met} - Altura acima do solo do sensor de temperatura do ar na estação meteorológica;

z – Altitude, altura acima do solo;

V_z - Velocidade do vento à altitude z ;

α – Perfil expoente da velocidade do vento no local;

δ – Perfil da espessura da camada fronteira, da velocidade do vento no local;

Z_{met} - Altura acima do solo do sensor de temperatura do ar na estação meteorológica;

V_{met} - Velocidade do vento medida na estação meteorológica;

α_{met} - Perfil expoente da velocidade do vento na estação meteorológica;

δ_{met} - Perfil da espessura da camada fronteira, da velocidade do vento na estação meteorológica.

T_{odb} – Temperatura exterior de bolbo seco local;

WindSpeed – Velocidade do vento local.

Q_c – Taxa de transferência de calor por convecção exterior;

$h_{c,ext}$ - Coeficiente de convecção exterior;

T_{surf} – Temperatura da superfície;

T_{air} - Temperatura do ar exterior.

q_{LWX}'' – Troca de fluxo por radiação de onda longa entre as superfícies da zona;

q_{SW}'' – Fluxo de radiação de onda curta para a superfície devido a fontes de iluminação;

q_{LWS}'' – Fluxo por radiação de onda longa devido ao equipamento na zona;

q_{ki}'' – Fluxo por condução através da parede;

q_{sol}'' - Fluxo por radiação solar transmitida absorvido na superfície;

q_{conv}'' - Fluxo de calor por convecção para o ar da zona.

$I_{horizon}$ – Irradiância numa superfície pelo horizonte do céu;

I_{dome} – Irradiância numa superfície pela cúpula do céu;

$I_{circumsolar}$ – Irradiância numa superfície pela região circumsolar.

I_h - Irradiância solar horizontal (W/m^2);

S - Inclinação da superfície;

F_1 - Coeficiente de brilho circumsolar;

F_2 - Coeficiente brilho do horizonte;

Z – ângulo zénite do sol (radianos).

m – Massa óptica relativa do ar;

I_o – Irradiação extraterrestre (valor médio anual de $1353W/m^2$).

I – Irradiância solar directa normal;

$k = 1.041$ para z em radianos.

α – Coeficiente de absorção solar da superfície;

θ – Ângulo de incidência dos raios solares;

S – área da superfície;

S_s – Área iluminada pelo sol;

I_b - Intensidade do feixe solar de radiação directa;

I_s - Intensidade de radiação difusa do céu;

I_g - Intensidade de radiação difusa reflectida pelo solo;

F_{ss} - Factor angular entre a superfície e o céu;

F_{sg} - Factor angular entre a superfície e o solo.

QS(ZoneNum) – Irradiância difusa de onda curta da zona;

AbsIntSurf(SurfNum) – Absortividade solar da superfície interior;

AlSurf(SurfNum) – Factor de irradiância de raio solar da superfície interior;

BeamSolarRad – Irradiância de raio solar normal exterior [W/m²].

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

EPW – Ficheiro climático utilizado pelo EnergyPlus

TMY – Typical Meteorological Year

DOE – The Department of Energy

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

BESTEST – Building Energy Simulation Test

IEA – International Energy Agency

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

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Nos dias que correm vivemos numa sociedade cada vez mais marcada por maiores exigências ao nível de conforto e qualidade. Os projectos de edifícios devem acompanhar esta mudança e promoverem cada vez mais qualidade e conforto térmico. O conforto térmico é uma condição necessária para obter o bem-estar e melhores condições de saúde. Neste sentido foi criado o RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) [1], que considera o conforto térmico como um direito das pessoas, estabelecendo então os valores mínimos que devem ser atingidos em todos os edifícios. Mais recentemente foi criada a certificação energética de edifícios [2], que procura quantificar o consumo de energia necessário à obtenção do conforto térmico, existindo um valor máximo autorizado.

Esta recente preocupação com a optimização energética tem provocado uma crescente utilização de ferramentas de simulação térmica, com o objectivo de controlar vários aspectos dos projectos, cumprir os regulamentos e proporcionar o maior conforto térmico possível, conjugado com a melhor solução em termos económicos conseguida, por exemplo, através de simulação de vários tipos de isolamentos térmicos.

Este tipo de ferramentas informáticas permite prever temperaturas interiores, cargas térmicas, consumos de energia, etc. Estas previsões, efectuadas normalmente para um ano típico de clima de um local, revelam-se muitas vezes fundamentais, principalmente nas decisões iniciais de projecto.

Torna-se então necessário saber até que ponto este tipo de ferramentas produz resultados fiáveis e qual a influência que os dados climáticos utilizados produzem nos resultados.

1.2. OBJECTIVOS

O principal objectivo desta dissertação é a validação de modelos de cálculo (programa EnergyPlus) por comparação com medições “*in situ*”, estudando a influência das condições fronteira, nomeadamente o clima.

Para atingir esse objectivo, foram definidos vários objectivos parciais:

- Estudo do programa de simulação higratérmica EnergyPlus;
- Estudo da formulação matemática subjacente ao programa, nomeadamente a relacionada com os parâmetros climáticos;
- Indagação sobre os parâmetros climáticos utilizados pelo programa;

- Exploração do programa EnergyPlus através da aplicação ao caso 920 da ASHRAE (método BESTEST);
- Validação do programa, através da aplicação do método BESTEST, por comparação com os programas de referência do método;
- Descrição do clima típico anual do Porto (TMY), através dos parâmetros climáticos utilizados pelo programa;
- Comparação entre os parâmetros climáticos obtidos da estação do LFC-FEUP e os obtidos pelo TMY;
- Comparação entre simulação efectuada pelo programa e as medições “in situ”;
- Tentativa de aproximação aos valores medidos pelos sensores, efectuando novas simulações, através de alteração de parâmetros climáticos;
- Inferir a relevância dos parâmetros climáticos mais importantes, nas simulações do EnergyPlus.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação divide-se em seis capítulos:

- O capítulo 1 introduz a presente dissertação e indica os objectivos subjacentes;
- O capítulo 2 apresenta o programa, de simulação numérica do comportamento térmico, EnergyPlus. Procede-se à apresentação resumida da formulação matemática, subjacente ao programa, relativamente a parâmetros climáticos importantes ao desenvolvimento desta dissertação. Em seguida é apresentado o método BESTEST, o qual é destinado ao teste de programas de simulação térmica de edifícios, por comparação com programas de referência e respectivo diagnóstico de erros;
- O capítulo 3 corresponde à descrição do clima exterior. Em primeiro lugar é introduzido o conceito de TMY (*Typical Meteorological Year* – Ano Meteorológico Típico) que é um ficheiro climático anual representativo de um dado local. Seguidamente é descrita a estação meteorológica do LFC-FEUP, indicando os parâmetros medidos. Por último procede-se à descrição dos parâmetros climáticos, nomeadamente temperatura exterior, humidade relativa, temperatura de ponto de orvalho, radiação directa normal, radiação difusa horizontal, intensidade de radiação infravermelha e velocidade do vento. Para estes parâmetros, é apresentado o TMY do Porto anual. É igualmente apresentada a comparação entre o TMY, os dados reais medidos pela estação do LFC-FEUP e os dados dos sensores (este último apenas para a temperatura exterior e humidade relativa exterior), no período em estudo, ou seja, 28 de Setembro a 10 de Dezembro de 2009;
- No capítulo 4 é tratada a descrição do edifício em estudo. Trata-se de uma moradia unifamiliar situada na cidade do Porto. Em seguida são apresentados dados relativos a duas dissertações anteriores. Apresenta-se a introdução de alguns dados importantes no programa. Procede-se à descrição dos sensores colocados na moradia e apresentam-se os resultados das medições. Por último são apresentados os resultados da simulação do EnergyPlus e a comparação com os valores medidos pelos sensores;
- O capítulo 5 trata do estudo de sensibilidade do clima exterior. São efectuadas várias simulações com o EnergyPlus, em que são alterados parâmetros climáticos. Pretende-se, com isto, aproximar as simulações dos valores reais medidos pelos sensores e indagar sobre o real efeito produzido por cada parâmetro climático;
- O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas ao longo da dissertação.

2

ENERGYPLUS – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

2.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

O programa EnergyPlus tem as suas raízes nos programas BLAST e DOE-2 [3]. Estes dois programas foram desenvolvidos e lançados no fim da década de setenta e início da década de oitenta, como ferramentas de simulação energética. Estes programas foram criados devido às preocupações ligadas à crise petrolífera do início da década de setenta e ao reconhecimento da importância do consumo de energia nos edifícios. Tal como os programas que levaram à sua criação, o EnergyPlus é um programa de análise de energia e simulação térmica.

Mais detalhadamente pode-se afirmar que o EnergyPlus é uma colecção de muitos módulos de programas (desenvolvidos em todo o mundo) que trabalham em conjunto para calcular a energia necessária para aquecer e arrefecer um edifício, usando uma variedade de sistemas e fontes de energia [4].

A principal vantagem da estrutura modular é o facto de investigadores poderem desenvolver módulos sem interferirem com os outros módulos e sem ter de conhecer profundamente toda a teoria subjacente ao programa, ou seja todos os módulos [3].

O diagrama da Fig.1 mostra como outros programas foram ligados ao EnergyPlus e uma visão geral de como o trabalho futuro pode ter impacto no programa.

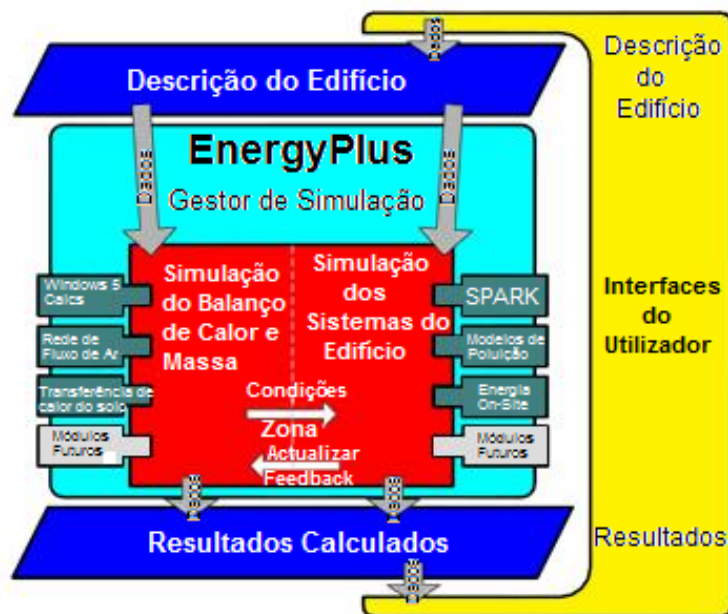


Fig.1 – Diagrama de funcionamento do EnergyPlus [adaptado de 3]

Outra vantagem do programa é o facto de este usar linguagem FORTRAN com código *open source*, ou seja o código do programa está aberto para revisão, inspecção, etc.

Um dos pontos fortes do EnergyPlus é a integração de todos os aspectos da simulação – cargas, sistemas e equipamentos. O *output* dos sistemas e das plantas tem impacto directo na resposta térmica do edifício em vez de, calcular primeiro todas as cargas térmicas e de seguida simular sistemas e plantas. A Fig.2 mostra a integração de elementos importantes da simulação energética de edifícios.

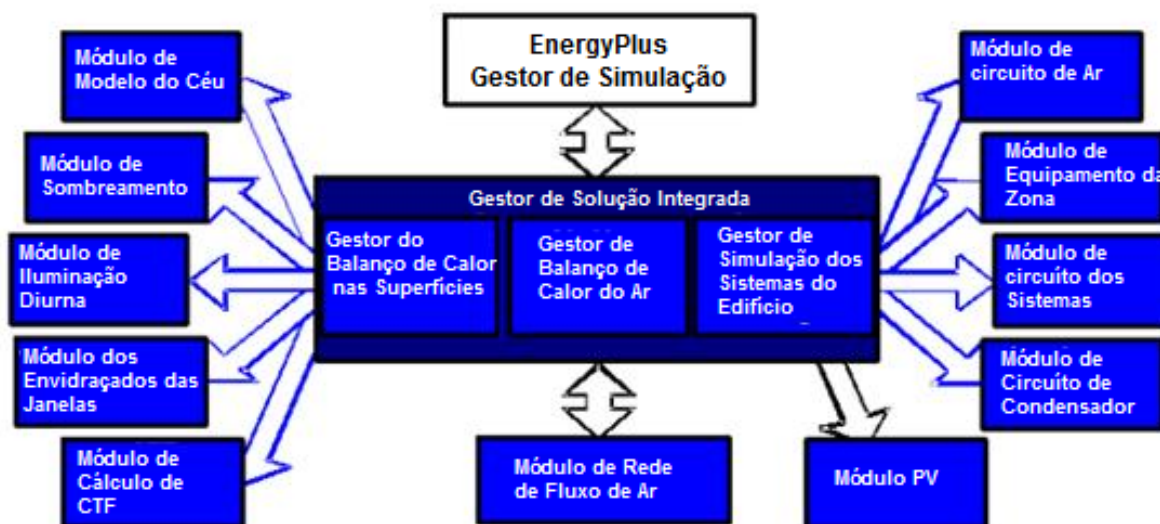


Fig.2 – Esquema de organização interna do EnergyPlus [adaptado de 3]

O programa EnergyPlus apresenta grande rigor e aplicabilidade a várias situações de simulação [3]:

- Solução integrada e simultânea de todas as componentes do edifício;
- Simulação em intervalos de tempo entre 10 minutos e 1 hora utilizando dados climáticos para cada hora de um ano representativo de clima local;
- Ficheiros de *input* e *output* em ASCII, facilmente editáveis;

Apresenta modelos detalhados de:

- Transferências radiativas e convectivas em superfícies exteriores e interiores;
- Sistemas de AVAC (elevada flexibilidade);
- Trocas de calor com o terreno implantação;
- Transferência de massa (absorção de humidade, produção no interior);
- Conforto térmico dos ocupantes;
- Modelo de céu anisotrópico;
- Simulação de sistemas de iluminação natural híbridos (controle automático);
- Simulação de estudos dos efeitos da estratificação interior (Displacement Ventilation);
- Simulação de temperaturas e caudais de ventilação natural e híbrida (*AirflowNetWork*).

2.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

2.2.1. CONCEITO DE ZONA

A estrutura base do código considera que cada volume interior se encontra perfeitamente misturado. Neste caso é suficiente um único ponto (modelo simplificado a um nó) para caracterizar a temperatura do ar no interior, ou seja da zona. (Fig.3).

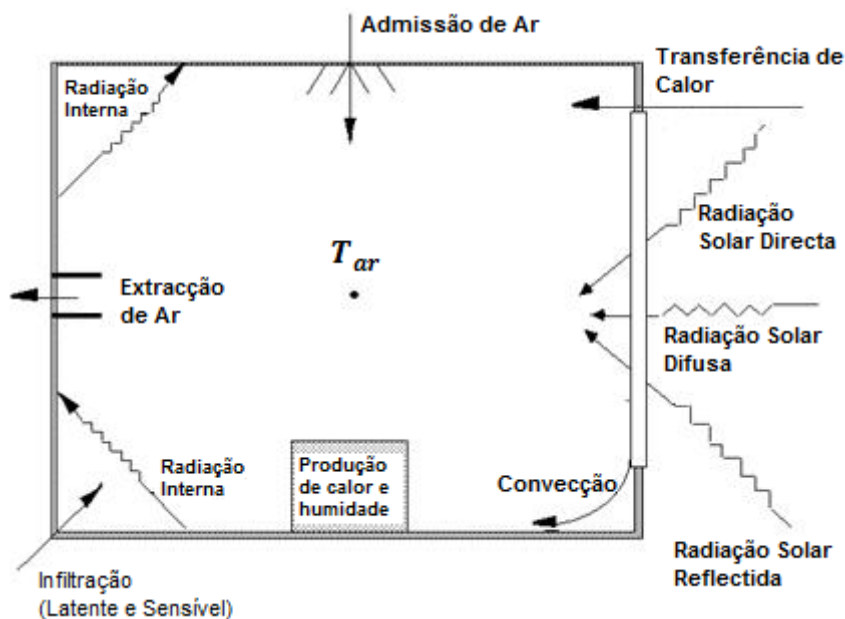


Fig.3 – Funcionamento em cada zona térmica do edifício [adaptado de 5]

O programa parte da equação de conservação de energia numa zona [4]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

- $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ - Somatório das cargas internas convectivas;
- $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ - Transferência de calor por convecção da superfície das zonas;
- h_i - Coeficiente de troca de calor por convecção;
- A_i - Área da superfície
- T_{si} - Temperatura da superfície i
- T_z - Temperatura da zona
- $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ - Transferência de calor devido a infiltração de ar exterior;
- m - fluxo de massa;
- T_{∞} - Temperatura exterior;
- C_p - Calor específico;
- $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ - Transferência de calor devido a mistura de ar entre zonas;
- T_{zi} - Temperatura da zona i
- $\dot{Q}_{sys}$ - Transferência de calor a partir de sistemas de climatização;
- $C_z \frac{dT_z}{dt}$ - Energia armazenada no ar de uma zona.

O programa utiliza a equação 2 [4] para o cálculo da temperatura da zona, obtida a partir da equação de conservação de energia (1):

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup ply} - \left(\frac{C_z}{\Delta t} \right) \left(-3T_z^{t-\Delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\Delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\Delta t} \right)}{\left(\frac{11}{6} \right) \frac{C_z}{\Delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C} \quad (2)$$

T_{∞} , presente nestas duas equações, representa a temperatura exterior

2.2.2. CONDUÇÃO ATRAVÉS DAS PAREDES

Para o cálculo de condução através das paredes o programa usa o modelo a dois nós (Fig.4).

A característica principal deste modelo é a existência de um nó, com uma equação de balanço térmico própria, que interage com todas as superfícies interiores. Para além deste nó, mantém-se o nó do ar com uma equação de equilíbrio semelhante à do modelo de nó único. [9]

A solução mais básica da série de tempos é a equação de factor de resposta que relaciona o fluxo de uma superfície de um elemento com uma série infinita de histórico de temperatura em ambas as faces como mostra a equação [4]:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (3)$$

- q'' - Fluxo de calor
- T - Temperatura
- i - Elemento interior da construção
- o - Elemento exterior da construção
- t - Passo de tempo actual
- X e Y - Factores de resposta

A nova solução contém elementos que são chamados CTFs (*Conduction Transfer Functions* – Funções de transferências por condução). A forma básica de CTF para equação de fluxo de calor interior é a seguinte [4]:

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (4)$$

Equação para fluxo de calor exterior ($q'' = q/A$) [4]:

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (5)$$

- X_j - Coeficiente exterior de CTF, $j=0,1,\dots,nz$;
- Y_j - Coeficiente de atravessamento de CTF, $j=0,1,\dots,nz$;
- Z_j - Coeficiente interior de CTF, $j=0,1,\dots,nz$;
- Φ_j - Coeficiente de fluxo de CTF, $j=1,2,\dots,nq$;
- T_i - Temperatura da face interior;
- T_o - Temperatura da face exterior;
- q''_{ko} - Fluxo de calor por condução na face exterior;
- q''_{ki} - Fluxo de calor por condução na face interior;

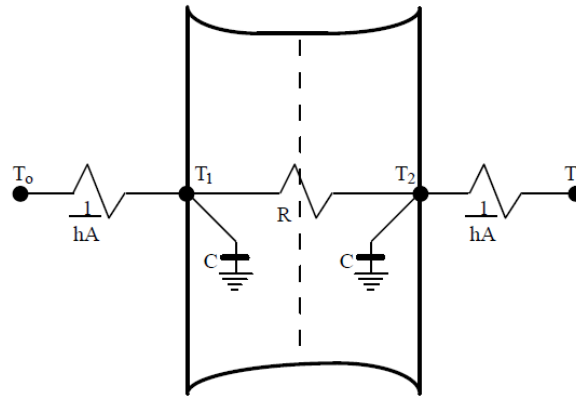


Fig.4 – Exemplo de modelo a dois nós [4]

2.2.3. BALANÇO TÉRMICO DA SUPERFÍCIE EXTERIOR

A Fig.5 apresenta o diagrama de balanço térmico exterior:

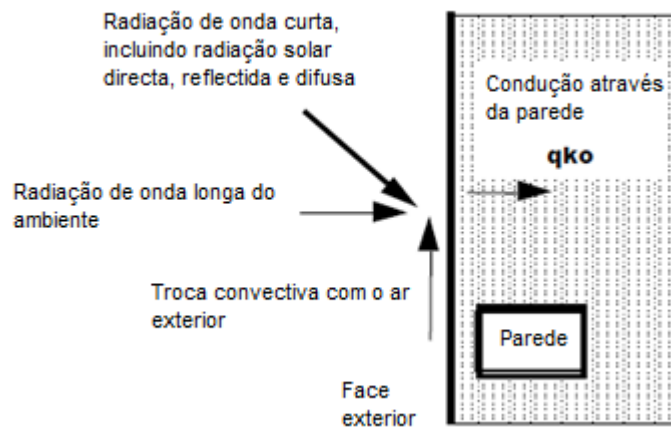


Fig.5 – Diagrama de controlo de volume de balanço térmico exterior [adaptado de 4]

O equilíbrio de calor na face exterior é igual a [4]:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} + q''_{ko} = 0 \quad (6)$$

- $q''_{\alpha sol}$ - Fluxo de calor da radiação solar directa e difusa absorvida (de onda curta);
- q''_{LWR} - Troca de fluxo por radiação de onda longa entre o ar e o ambiente;
- q''_{conv} - Troca de fluxo por convecção com o ar exterior;
- q''_{ko} - Fluxo de calor através da parede por condução.

Radiação de onda curta externa - $q''_{\alpha sol}$ inclui radiação solar directa e difusa absorvida pela superfície. É influenciada pela localização, ângulo da superfície, propriedade dos materiais da face da superfície, condições climáticas, etc.

Radiação de onda longa externa - q_{LWR}'' é uma formulação padrão de troca de radiação entre a superfície, o céu e o solo. O fluxo de calor por radiação é calculado a partir do coeficiente de absorção da superfície, das temperaturas da superfície, do céu e do solo e dos factores de forma do céu e solo.

O fluxo de calor total por radiação de onda longa é o somatório dos componentes relacionados com a troca de radiação com o solo, céu e ar, como mostra a equação [4]:

$$q_{LWR}'' = q_{gnd}'' + q_{sky}'' + q_{air}'' \quad (7)$$

São introduzidos coeficientes lineares de transferência de calor por radiação para tornar a equação anterior mais compatível com a formulação de equilíbrio de calor, resultando [4]:

$$q_{LWR}'' = h_{r,gnd} (T_{surf} - T_{gnd}) + h_{r,sky} (T_{surf} - T_{sky}) + h_{r,air} (T_{surf} - T_{air}) \quad (8)$$

- T_{surf} - Temperatura da superfície exterior;
- T_{gnd} - Temperatura da superfície do solo;
- T_{sky} - Temperatura do céu;
- T_{air} - Temperatura do ar.

2.2.4. CÁLCULO DA TEMPERATURA DO CÉU

A equação de cálculo da temperatura do céu é dada por [4]:

$$T_{sky} = \left(\frac{\text{Horizontal_IR}}{\text{Sigma}} \right)^{.25} - \text{Temperature}_{kelvin} \quad (9)$$

- T_{sky} - Temperatura radiativa do céu {C};
- Horizontal_IR - Intensidade da radiação infravermelha horizontal {Wh/m²} (ficheiro climático);
- $\text{Temperature}_{kelvin}$ - Conversão de temperatura de Kelvin para C, ou seja, 273.15.

O parâmetro Horizontal_IR, incluído na equação 9, representa a intensidade de radiação infravermelha do céu (Wh/m²) incluído no ficheiro climático.

2.2.5. CÁLCULO DA TEMPERATURA LOCAL DO AR EXTERIOR

A variação da temperatura do ar exterior é calculada usando o *U.S. Standard Atmosphere* (1976). Segundo este modelo, a relação entre a temperatura do ar e a altitude numa determinada camada da atmosfera é [4]:

$$T_z = T_b + L(H_z - H_b) \quad (10)$$

- T_z - Temperatura do ar à altitude z ;
- T_b - Temperatura do ar na base da camada, ou seja, ao nível do solo para a troposfera;
- L - Gradiente de temperatura do ar, igual a -0.0065 K/m na troposfera;
- H_b - Offset igual a zero para a troposfera;
- H_z - Altitude Geopotencial

Para efeitos de modelação de edifícios na troposfera, a altitude z refere-se à altura acima do nível do solo. A temperatura do ar ao nível do solo, T_b , deriva da temperatura do ar do ficheiro climático, invertendo a equação acima [4]:

$$T_b = T_{z,met} - L \left(\frac{E_{z,met}}{E + z_{met}} - H_b \right) \quad (11)$$

- $T_{z,met}$ - Temperatura do ar do ficheiro climático (medida pela estação meteorológica);
- Z_{met} - Altura acima do solo do sensor de temperatura do ar na estação meteorológica;

$T_{z,met}$ representa a temperatura do ar disponível no ficheiro climático.

2.2.6. CÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTO LOCAL

A velocidade do vento medida na estação meteorológica é extrapolada para outras altitudes com a equação seguinte [4]:

$$V_z = V_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{Z_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (12)$$

- z – Altitude, altura acima do solo;
- V_z - Velocidade do vento à altitude z ;
- α – Perfil expoente da velocidade do vento no local;
- δ – Perfil da espessura da camada fronteira, da velocidade do vento no local;
- Z_{met} - Altura acima do solo do sensor de temperatura do ar na estação meteorológica;
- V_{met} - Velocidade do vento medida na estação meteorológica;
- α_{met} - Perfil expoente da velocidade do vento na estação meteorológica;
- δ_{met} - Perfil da espessura da camada fronteira, da velocidade do vento na estação meteorológica.

V_{met} representa a velocidade do vento (m/s) medida na estação meteorológica.

2.2.7. VENTILAÇÃO

Ventilação é o fluxo propositado de ar, do ambiente exterior directamente para uma zona térmica, a fim de oferecer uma quantidade de arrefecimento não-mecânico. A equação básica usada pelo EnergyPlus para o cálculo da ventilação é [4]:

$$Ventilation = (V_{design}) (F_{schedule}) [A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)] \quad (13)$$

- T_{odb} – Temperatura exterior de bolbo seco local;
- WindSpeed – Velocidade do vento local.

A temperatura exterior de bolbo seco local depende dos valores da temperatura presente no ficheiro climático e o seu cálculo está indicado nas equações 10 e 11. O cálculo da velocidade do vento local está indicado na equação 12, dependendo este da velocidade do vento presente no ficheiro climático.

2.2.8. CONVECÇÃO EXTERIOR

A transferência de calor devida à convecção exterior é modelada usando a formulação clássica [4]:

$$Q_c = h_{c,ext} A (T_{surf} - T_{air}) \quad (14)$$

- Q_c – Taxa de transferência de calor por convecção exterior;
- $h_{c,ext}$ - Coeficiente de convecção exterior;
- A – Área da superfície;
- T_{surf} – Temperatura da superfície;
- T_{air} - Temperatura do ar exterior.

2.2.9. BALANÇO TÉRMICO INTERIOR

A Fig.6 apresenta o diagrama de balanço térmico interior:

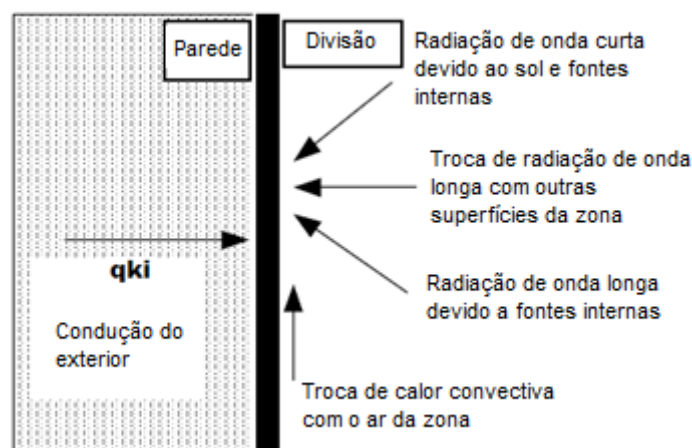


Fig.6 – Diagrama de controlo de volume de balanço térmico interior [adaptado de 4]

O equilíbrio de calor interno envolvendo as faces interiores das superfícies das zonas é o coração do método de equilíbrio de calor. Este equilíbrio de calor é geralmente modelado por quatro componentes de transferência de calor conjugados [4]:

- Condução através do elemento do edifício;
- Convecção para o ar;
- Absorção e reflexão de radiação solar de onda curta;
- Intercâmbio de radiação de onda longa.

A radiação de onda curta é devida à radiação solar que entra na zona através das janelas e à emissão de fontes internas como lâmpadas. O intercâmbio de radiação de onda longa inclui a absorção e emissão de fontes de radiação de baixa temperatura, como todas as superfícies das outras zonas, equipamentos e pessoas.

O equilíbrio de calor na face interior pode ser escrito da seguinte maneira [4]:

$$q_{LWX}'' + q_{SW}'' + q_{LWS}'' + q_{ki}'' + q_{sol}'' + q_{conv}'' = 0 \quad (15)$$

- q_{LWX}'' – Troca de fluxo por radiação de onda longa entre as superfícies da zona;
- q_{SW}'' – Fluxo de radiação de onda curta para a superfície devido a fontes de iluminação;
- q_{LWS}'' – Fluxo por radiação de onda longa devido ao equipamento na zona;
- q_{ki}'' – Fluxo por condução através da parede;
- q_{sol}'' – Fluxo por radiação solar transmitida absorvido na superfície;
- q_{conv}'' – Fluxo de calor por convecção para o ar da zona.

2.2.10. MODELO DE RADIAÇÃO DO CÉU

No EnergyPlus o cálculo da radiação solar difusa do céu incidente sobre uma superfície exterior tem em conta a distribuição anisotrópica de radiação do céu.

A distribuição de radiação do céu é baseada num modelo empírico baseado em medições reais de radiação do céu, como descrito em Perez et al., 1990 [4]. Neste modelo a radiação do céu é calculada por três distribuições que são combinadas (Fig.7):

- Uma distribuição isotrópica que abrange toda a cúpula do céu;
- Um brilho circumsolar centrado na posição do sol;
- Um brilho do horizonte.

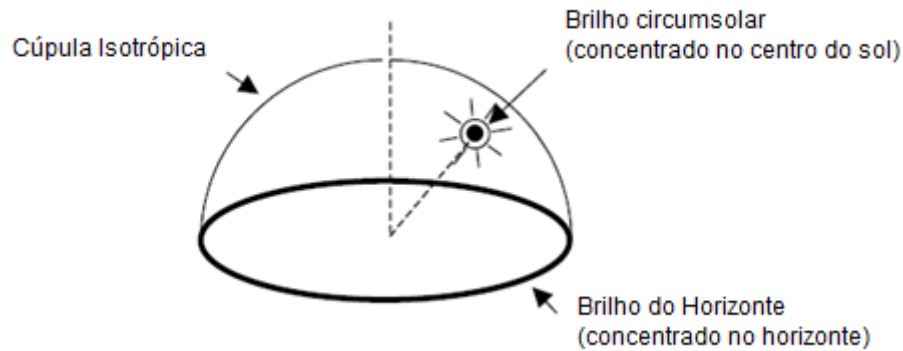


Fig.7 – Vista esquemática do céu mostrando a distribuição de radiação solar como uma combinação de três componentes: Cúpula com radiação isotrópica, brilho circumsolar representado por uma origem de um ponto no sol, brilho do horizonte representado por uma origem de linha no horizonte [adaptado de 4]

As proporções destas distribuições dependem do estado do céu, que é caracterizado por duas quantidades, factor de claridade (equação 20) e factor de brilho (equação 19), que são determinados pela posição do sol e pelas quantidades de energia solar disponíveis no ficheiro climático.

2.2.11. MODELO DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA DO CÉU NUMA SUPERFÍCIE INCLINADA

Na ausência de sombreamento, a formulação do céu descrita, fornece a seguinte expressão para a irradiação difusa do céu, I_{sky} , numa superfície inclinada [4]:

$$I_{sky} = I_{horizon} + I_{dome} + I_{circumsolar} \quad (16)$$

- $I_{horizon}$ – Irradiância numa superfície pelo horizonte do céu $= I_h F_2 \sin S$;
- I_{dome} – Irradiância numa superfície pela cúpula do céu $= I_h (1 - F_1)(1 + \cos S)/2$;
- $I_{circumsolar}$ – Irradiância numa superfície pela região circumsolar $= I_h F_1 a / b$.

Onde:

- I_h - Irradiância solar horizontal (W/m^2);
- S - Inclinação da superfície;
- a – $\text{Max}(0, \cos \alpha)$;
- b – $\text{Max}(0.087, \cos Z)$;
- F_1 - Coeficiente de brilho circumsolar;
- F_2 - Coeficiente brilho do horizonte;
- Z – ângulo zénite do sol (radianos).

Os coeficientes de brilho são função das condições do céu e são dados por [4]:

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)Z \quad (17)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)Z \quad (18)$$

Onde Δ é o factor de brilho do céu [4]:

$$\Delta = I_h m / I_o \quad (19)$$

- m – Massa óptica relativa do ar;
- I_o – Irradiação extraterrestre (valor médio anual de 1353W/m²).

O factor de claridade do céu é dado por [4]:

$$\varepsilon = \frac{(I_h + I) / I_h + kZ^3}{1 + kZ^3} \quad (20)$$

- I – Irradiância solar directa normal;
- $k = 1.041$ para z em radianos.

2.2.12. SOMBREAMENTO DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA DO CÉU

A irradiância difusa do céu total na superfície com sombreamento é dada por [4]:

$$I'_{sky} = R_{horizon} I_{horizon} + R_{dome} I_{dome} + R_{circumsolar} I_{circumsolar} \quad (21)$$

- $R_{horizon|dome|circumsolar} = \frac{\text{Irradiância do horizon|dome|circumsolar com obstruções}}{\text{Irradiância do horizon|dome|circumsolar sem obstruções}}$

Cálculo de áreas expostas ao sol e áreas sombreadas

No cálculo de ganhos solares em edifícios, devidos a radiação solar, é necessário saber que quantidade de cada parte do edificio está à sombra e que quantidade está a receber luz directa do sol. Como exemplo, a Fig.8 mostra uma cobertura plana, de uma estrutura em L com janelas em todas as faces visíveis. Naquele momento o sol está à direita o que faz com que as paredes 1 e 3 e as janelas a e c estejam completamente sombreadas e a parede 4 e janela d estejam completamente expostas ao sol. A parede 2 e a janela b estão parcialmente sombreadas. A área de cada superfície exposta ao sol muda com a alteração de posição do sol ao longo do dia. A finalidade do algoritmo de sombreamento do EnergyPlus é modelar as áreas expostas ao sol.

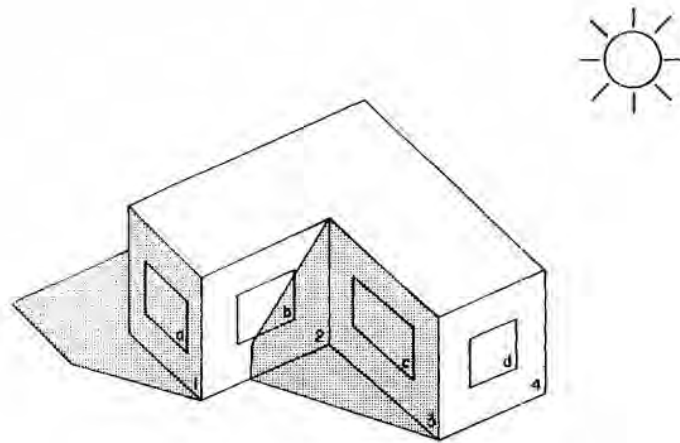


Fig.8 – Representação do Esquema Geral de Sombreamento [4]

O posicionamento solar está representado na Fig.9. O ângulo de altitude solar (β) é o ângulo do sol acima da horizontal (graus). O ângulo de azimute solar (ϕ) é medido a partir do norte (sentido dos ponteiros do relógio) e é expresso em graus.

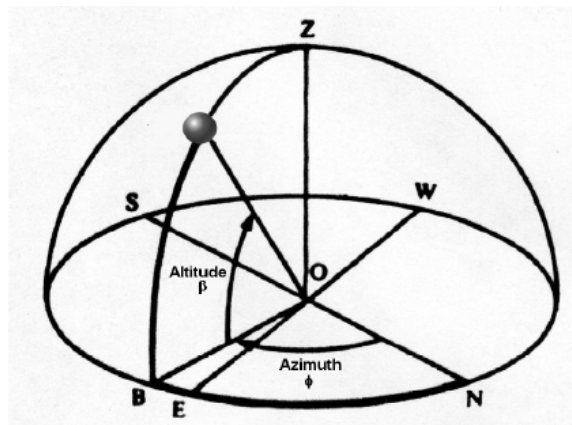


Fig.9 – Representação da Posição Solar [4]

Ganhos Solares

O total de ganhos solares, numa superfície exterior, é uma combinação de absorção de radiação solar directa e difusa [4]:

$$Q_{so} = \alpha \cdot \left(I_b \cdot \cos \theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg} \right) \quad (22)$$

- α – Coeficiente de absorção solar da superfície;
- θ – Ângulo de incidência dos raios solares;
- S – área da superfície;
- S_s – Área iluminada pelo sol;

- I_b - Intensidade do feixe solar de radiação directa;
- I_s - Intensidade de radiação difusa do céu;
- I_g - Intensidade de radiação difusa reflectida pelo solo;
- F_{ss} - Factor angular entre a superfície e o céu $F_{ss} = (1 + \cos\phi)/2$;
- F_{sg} - Factor angular entre a superfície e o solo $F_{sg} = (1 - \cos\phi)/2$.

I_b representa a intensidade de radiação solar directa em superfície normal

I_s representa a intensidade de radiação solar difusa em superfície horizontal

2.2.13. DISTRIBUIÇÃO SOLAR

Este campo determina como o EnergyPlus trata a radiação solar que entra numa zona através de janelas exteriores. Há cinco opções: *MinimalShadowing*, *FullExterior*, *FullInteriorAndExterior*, *FullExteriorWithReflections*, e *FullInteriorAndExteriorWithReflections* [4].

MinimalShadowing

Neste caso não há sombreamento exterior, exceptuando as padieiras e ombreiras de portas e janelas. Assume-se que os feixes de radiação solar incidem todos no pavimento, onde são absorvidos de acordo com o coeficiente de absorção do pavimento. Qualquer reflexão pelo pavimento é adicionada à radiação difusa transmitida, a qual é assumida como sendo uniformemente distribuída por todas as superfícies interiores. Se não existe pavimento na zona, a radiação solar incidente é absorvida por todas as superfícies interiores de acordo com os seus coeficientes de absorção. O balanço térmico da zona é então aplicado a todas as superfícies e no ar da zona com a radiação absorvida tratada como um fluxo na superfície.

FullExterior

O mesmo que o *MinimalShadowing*, com a excepção de serem modelados os padrões de sombra em superfícies exteriores causados por palas, superfícies de sombreamento, ou qualquer superfície exterior.

FullExteriorWithReflections

Este caso é igual ao anterior em termos de distribuição interior mas acrescenta reflexões exteriores.

FullInteriorAndExterior

É o mesmo que *FullExterior* exceptuando o facto de, em vez de assumir que toda radiação solar incide no pavimento, o programa calcular a quantidade de feixes solares incidente em cada superfície da zona, incluindo pavimento, paredes e janelas, projectando os raios solares através das janelas exteriores, tendo em conta o efeito de superfícies de sombreamento exteriores e dispositivos de sombreamento das janelas.

Nesta opção o programa calcula que quantidade de radiação, incidente numa janela interior, é absorvida pela janela, que quantidade é reflectida para a zona e que quantidade é transmitida para a zona adjacente (Assume-se que as janelas interiores não têm dispositivo de sombreamento).

Nesta opção, o programa também calcula que quantidade de radiação incidente na parte interior de uma janela exterior (através de outras janelas da zona) é absorvida pela janela, que quantidade é

reflectida para a zona e que quantidade é transmitida para o exterior. Neste cálculo é acautelada a existência de dispositivos de sombreamento interiores ou exteriores.

FullInteriorAndExteriorWithReflections

Este caso é igual ao anterior em termos de distribuição interior mas acrescenta reflexões exteriores.

2.2.14. RADIAÇÃO SOLAR ABSORVIDA POR SUPERFÍCIES OPACAS INTERIORES

A radiação de onda curta absorvida na face interior de uma superfície opaca (pavimento, parede ou tecto) é dada por [4]:

$$Q_{RadSWInAbs}(SurfNum) = QS(ZoneNum) * AbsIntSurf(SurfNum) + AISurf(SurfNum) * BeamSolarRad \quad (23)$$

- SurfNum – Número da superfície;
- ZoneNum – Número da zona à qual a superfície pertence;
- QS(ZoneNum) – Irradiância difusa de onda curta da zona;
- AbsIntSurf(SurfNum) – Absortividade solar da superfície interior;
- AISurf(SurfNum) – Factor de irradiância de raio solar da superfície interior;
- BeamSolarRad – Irradiância de raio solar normal exterior [W/m²].

A Fig.10 apresenta uma secção vertical de dum edifício dividido em duas zonas, Z1 e Z2, ilustrando a transmissão dos raios solares. Alguns dos raios solares que passam através da janela exterior EW são absorvidos pelo pavimento, D, pela parede interior, B, e pela janela interior, IW. Alguns são transmitidos pela janela interior, IW, para a zona adjacente, Z2. Aoverlap é a área da superfície irradiada projectada para o plano de EW. Os raios reflectidos por D, B e IW contribuem para o fluxo de radiação de onda curta em Z1.

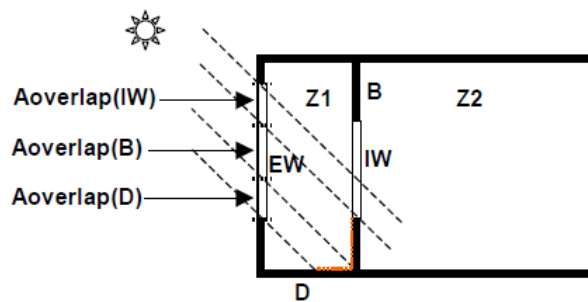


Fig.10 – Secção vertical de dum edifício dividido em duas zonas, Z1 e Z2, ilustrando a transmissão dos raios solares [4]

2.3. SÍNTESE DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS UTILIZADOS NO PROGRAMA

Os parâmetros mais relevantes, no âmbito desta dissertação, contidos nas equações anteriores são:

- T_{∞} - que representa a temperatura do ar exterior local, entra no cálculo da temperatura da zona (equação 2). T_{∞} é igual a T_z da equação 10 e é obtida através de $T_{z,met}$ (equações 10

- e 11); É também igual a T_{odb} (equação 13) contribuindo, então, para o cálculo da ventilação;
- $T_{z,met}$ representa a temperatura do ar disponível no ficheiro climático (equação 11). A Fig.24 (capítulo 3) representa o gráfico de temperatura disponível no ficheiro TMY do porto, ao longo do ano;
 - $q_{\alpha sol}''$ inclui radiação solar directa e difusa absorvida pela superfície (equação 6);
 - A Intensidade de radiação infravermelha do céu (Wh/m^2) está incluída na equação (9). Este parâmetro está presente no ficheiro climático. A Fig.40 do capítulo 3 mostra a sua variação anual para a cidade do Porto (ficheiro TMY);
 - V_{met} representa a velocidade do vento (m/s) medida na estação meteorológica (equação 12). A sua variação anual para a cidade do Porto está representada na Fig.43 do capítulo 3. A partir dos seus valores é calculada a velocidade do vento local V_{met} (equação 12). Esta última entra na equação 13 com o nome de WindSpeed contribuindo, então, para o cálculo da ventilação.
 - I_b - representa a intensidade de radiação solar directa em superfície normal (equação 22). A Fig.32 apresenta a radiação directa do TMY do porto;
 - I_s - representa a intensidade de radiação solar difusa em superfície horizontal (equação 22). A Fig.36 apresenta a radiação directa do TMY do porto;

2.4. BESTEST

2.4.1. DESCRIÇÃO DO BESTEST

O BESTEST (*Building Energy Simulation Test*) foi criado pela Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*), pelo seu grupo de Modelos de Avaliação e Melhorias [6].

O projecto BESTEST é um método que foi desenvolvido para testar, sistematicamente, programas de simulação térmica de edifícios e diagnosticar os parâmetros causadores de “maus” resultados.

Os primeiros testes do método foram conduzidos com um conjunto de programas de “referência”, seleccionados pelos participantes, para representar com melhor detalhe o estado de arte da capacidade de simulação disponível nos Estados Unidos e na Europa. Os programas considerados inicialmente foram o Blast, DOE2, ESP, SERIRES, S3PAS, TASE e TRNSYS [6].

O método consiste numa série de testes, especificados cuidadosamente, de casos de edifícios que, apresentam uma progressão sistemática do extremamente simples ao relativamente realístico. Os valores de output, dos vários casos, como cargas anuais, temperaturas máximas e mínimas anuais, cargas de pico anuais, são comparados e usados em conjunto com a lógica de diagnóstico para determinar os algoritmos responsáveis por diferenças.

Os resultados gerados pelos programas de referência têm a finalidade de serem úteis na avaliação de outros programas, simples ou detalhados, de simulação energética de edifícios. A experiência demonstrou que, quando um programa apresenta grande desacordo com os programas de referência, o problema deve-se a um *bug*, um algoritmo em falta, ou problemas de documentação [6].

Uma vantagem do BESTEST é o facto de um programa ser examinado segundo uma vasta gama de interacções paramétricas, baseado numa variedade de tipos de *output*, minimizando a possibilidade de encobrimento de problemas, por compensação de erros. A aplicação do BESTEST conduziu a melhorias em todos os programas usados inicialmente (programas de referência). A maioria dos erros encontrados nestes programas era devida a implementação de código incorrecto [6].

Testar um programa de simulação energética de edifícios, com o BESTEST, requer 2 a 5 dias, enquanto a maioria dos programas demoraram muitos anos a ser produzidos. O método oferece uma maneira económica e eficiente de avaliação dos programas.

O método BESTEST pode ser usado de diferentes maneiras por Engenheiros, Arquitectos, desenvolvedores de programas e investigadores, que incluem [6]:

- Comparação dos resultados de um programa com os programas de referência;
- Comparação de vários programas para determinar a divergência entre eles;
- Diagnosticar os problemas de algoritmos, através de diferenças de resultados entre vários programas;
- Verificação de um programa em relação a uma sua versão anterior, depois de uma alteração do código interno, para assegurar que só as mudanças intencionais tiveram efeito.
- Verificação de um programa em relação a ele próprio, depois de uma alteração de um único algoritmo, para perceber a sensibilidade entre algoritmos.

O método BESTEST foi adoptado pela ASHRAE Standard 140 (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) como norma para a validação dos programas de simulação térmica. A norma apresenta a descrição detalhada dos vários casos do método e apresenta os resultados obtidos por diversos programas [7].

Os casos presentes na norma estão distribuídos em 4 grupos [7]:

- *Low Mass* (Construções Leves);
- *High Mass* (Construções pesadas);
- *Free-Float* (sem sistemas mecânicos de aquecimento/arrefecimento do ar);
- *In-Depth* (análise mais aprofundada do comportamento térmico do edifício).

Cada Grupo é ainda dividido em vários casos de acordo com a alteração de determinados parâmetros [8]:

- Elementos de sombreamento (palas horizontais/verticais);
- Mudança de orientação dos envidraçados;
- Acréscimo de uma zona térmica;
- Ventilação nocturna.

O clima escolhido para a simulação dos casos do BESTEST foi o clima de Denver (Colorado – Estados Unidos da América), que apresenta Verões quentes e secos, Invernos frios e secos e grandes variações diárias de temperatura [6].

2.4.2. DESCRIÇÃO DO CASO BESTEST – 920

O caso em estudo é constituído por uma única zona rectangular (8 metros de largura, 6 metros de comprimento e 2,7 metros de altura), sem divisões interiores e com duas janelas de 6 m² colocadas a este e a oeste conforme representado na figura 11.

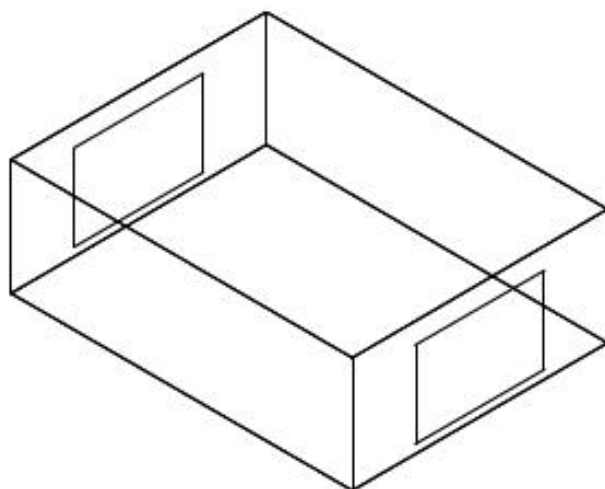


Fig.11 – Caso 920 do BESTEST

O ficheiro climático utilizado pelo método BESTEST corresponde a Denver. Denver apresenta um Verão quente e seco, Inverno frio e seco e grandes variações diárias de temperatura. O quadro seguinte apresenta diversos parâmetros para melhor caracterizar o clima de Denver [6].

Quadro 1 – Localização e caracterização do clima

Tipo de clima	Invernos frios e secos / Verões quentes e secos
Formato do ficheiro climático	TMY
Latitude	39.8° Norte
Longitude	104.9° Oeste
Altitude	1609 m
Fuso horário	7
Reflectividade do Solo	0.2
Terreno	Plano, sem obstáculos, localizado exactamente na estação meteorológica
Velocidade média anual do vento	4.02 m/s
Temperatura do solo	10°C
Temperatura ambiente média anual de bolbo seco	9.71°C
Temperatura mínima anual de bolbo seco	-24.39°C
Temperatura máxima anual de bolbo seco	35°C
Velocidade máxima anual do vento	14.89 m/s

Graus dias de aquecimento (base 18.3°C)	3636.2°C-dias
Graus dias de arrefecimento (base 18.3°C)	487.1°C-dias
Temperatura média anual de ponto de orvalho	-1.44°C
Taxa de humidade média anual	0.0047
Radiação solar horizontal global anual	1831.82 kWh/m ² - ano
Radiação solar directa normal anual	2353.58 kWh/m ² ano
Radiação solar directa horizontal	1339.48 kWh/m ² - ano
Radiação solar difusa horizontal	492.34 kWh/m ² - ano

Este caso representa uma construção *High Mass* (construção pesada).

Os quadros seguintes apresentam a constituição das paredes, pavimento, tecto e características dos envidraçados.

Quadro 2 – Constituição das paredes (Construção pesada) [8]

Elemento	λ (W/m.K)	Espessura (m)	R (m ² .K/W)	Densidade (Kg/m ³)	Cp (J/Kg.K)
Alvenaria de blocos de betão	0.510	0.100	0.196	1400	1000
Isolamento Térmico	0.040	0.0615	1.537	10	1400
Revestimento em madeira	0.140	0.009	0.064	530	900

Quadro 3 – Constituição do Pavimento (Construção pesada) [8]

Elemento	λ (W/m.K)	Espessura (m)	R (m ² .K/W)	Densidade (Kg/m ³)	Cp (J/Kg.K)
Laje de Betão Armado	1.130	0.080	0.071	1400	1000
Isolamento Térmico	0.040	1.007	25.175		

Quadro 4 – Constituição do Tecto (Construção leve) [8]

Elemento	λ (W/m.K)	Espessura (m)	R (m ² .K/W)	Densidade (Kg/m ³)	Cp (J/Kg.K)
Placas de Gesso Cartonado	0.160	0.010	0.063	950	840
Isolamento Térmico	0.040	0.1118	2.794	12	840
Revestimento em Madeira	0.140	0.019	0.136	530	900

Quadro 5 – Características dos envidraçados [8]

Propriedades dos Envidraçados	
Coeficiente de Extinção	0.0196/mm
Número de Vidros	2
Espessura do Vidro	3.175 mm
Espaço de Ar entre Vidros	13 mm
Índice de Refracção	1.526
Transmissão Normal da Radiação Directa Através de um Vidro	0,86156
Condutibilidade Térmica do Vidro	1.06 W/m.K
Condutância de cada Vidro	333 W/m².K
Coeficiente Combinado de Transferência por Radiação e Convecção da Caixa-de-ar	6,297 W/m².K
Coeficiente de Transferência Exterior Combinado	21.00 W/m².K
Coeficiente de Transferência Interior Combinado	8,29 W/m².K
U – Coeficiente de Transmissão Térmica	3.0 W/m².K
Emitância do Vidro	0.9
Densidade do Vidro	2500 Kg/m³
Calor Específico	750 J/Kg.K
Dispositivo de Sombreamento Interior	Nenhum
Sombreamento do Vidro Duplo para Incidência Normal	0.907
Factor Solar do Vidro	0.789

O quadro 6 apresenta outras características importantes para a simulação do caso 920.

Quadro 6 – Outras características do caso 920 [8]

Especificidades do caso 920	
Infiltração	0.5 renovações por hora
Cargas internas	200 W em contínuo
	60% radiativa
	40% convectiva
	100% sensível
Sistema Mecânico	Sistema de ar 100% convectivo
	Eficiência de 100% sem perdas e sem limite de capacidade
	Termóstato com setpoint de tipo não proporcional com deadband

Aquecimento < 20°C, Arrefecimento > 27°C	
Temperatura do solo	10°C (Contínua)

Em seguida procede-se à apresentação dos resultados obtidos e comparação com os resultados da *Development Team*, do EnergyPlus, e destes últimos com os programas de referência.

2.4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

No caso 920 são simulados os valores de Energia de Aquecimento Anual (MWh), a Energia de Arrefecimento Anual (MWh), a Potência de Pico de Aquecimento (KW) e a Potência de Pico de Arrefecimento (KW).

O quadro 7 apresenta os resultados obtidos para a simulação do caso 920 e a comparação com os resultados obtidos pela *Development Team* do EnergyPlus.

Observa-se que os resultados obtidos estão muito próximos dos resultados obtidos pela *Development Team*. A pequena diferença registada deve-se ao facto de não haver informação sobre alguns dos parâmetros que é necessário introduzir no EnergyPlus, optando-se por deixar os valores por defeito. A *Development Team* deve ter tomado outras opções na introdução desses parâmetros.

Quadro 7 – Resultados da simulação do EnergyPlus para o caso 920

Parâmetro	Resultados Obtidos	Resultados da Development Team
Energia de Aquecimento Anual (MWh)	3.075	3.087
Energia de Arrefecimento Anual (MWh)	2.705	2.683
Potência de Pico de Aquecimento (KW)	3.454	3.453
Potência de Pico de Arrefecimento (KW)	2.847	2.835

O Quadro 8 apresenta a comparação entre os resultados obtidos, os resultados da *Development Team* e os resultados máximo, mínimo e Médio dos programas de referência do BESTEST. Indica-se ainda se os resultados obtidos e os resultados da *Development Team* se encontram dentro do intervalo de valores dos programas de referência.

Quadro 8 – Comparação com os resultados de outros programas [8]

Parâmetro	BESTEST			Development Team	EnergyPlus		
	Mínimo	Máximo	Médio		Dentro do Intervalo	Resultado Obtido	Dentro do Intervalo
Energia de Aquecimento Anual (MWh)	3.261	4.300	3.828	3.087	Não	3.075	Não
Energia de Arrefecimento Anual (MWh)	1.840	3.313	2.684	2.683	Sim	2.705	Sim
Potência de Pico de Aquecimento (KW)	3.308	4.061	3.738	3.453	Sim	3.454	Sim
Potência de Pico de Arrefecimento (KW)	2.385	3.505	3.123	2.835	Sim	2.847	Sim

Verifica-se que os resultados obtidos e os resultados da *Development Team* não se encontram dentro do intervalo de valores dos programas de referência, no caso da Energia de Aquecimento Anual, encontrando-se abaixo do mínimo destes que é de 3.261 MWh.

A figura seguinte apresenta a comparação entre os resultados do EnergyPlus obtidos pela *Development Team* e os resultados obtidos pelos programas de referência para a Energia de Aquecimento Anual.

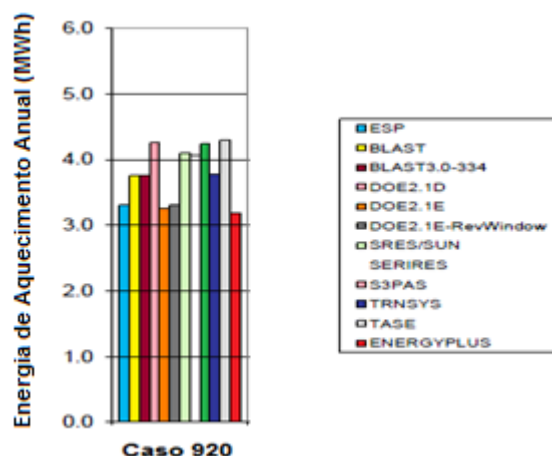


Fig.12 – Energia de Aquecimento Anual – Comparação com os programas de referência [8]

Considerando a Energia de Arrefecimento Anual verifica-se que os resultados obtidos e os resultados da *Development Team* se encontram dentro do intervalo de referência, aproximando-se bastante do valor médio de referência.

A figura seguinte apresenta a comparação entre os resultados do EnergyPlus obtidos pela *Development Team* e os resultados obtidos pelos programas de referência para a Energia de Arrefecimento Anual.

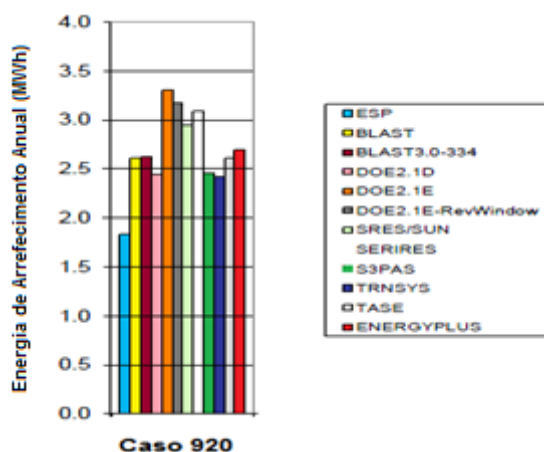


Fig.13 – Energia de Arrefecimento Anual – Comparação com os programas de referência [8]

No caso da Potência de Pico de Aquecimento verifica-se que os resultados obtidos e os resultados da *Development Team* se encontram dentro do intervalo de referência.

A figura seguinte apresenta a comparação entre os resultados do EnergyPlus obtidos pela *Development Team* e os resultados obtidos pelos programas de referência para a Potência de Pico de Aquecimento.

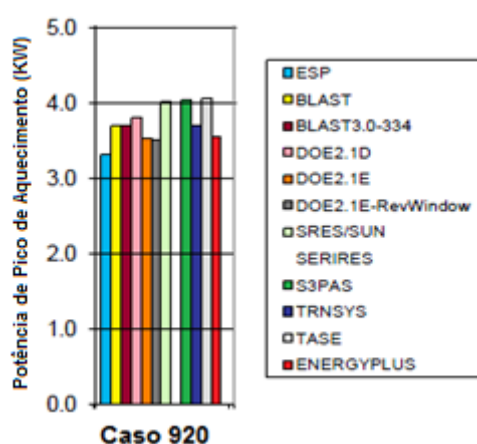


Fig.14 – Potência de Pico de Aquecimento – Comparação com os programas de referência [8]

Considerando a Potência de Pico de Arrefecimento verifica-se que os resultados obtidos e os resultados da *Development Team* se encontram dentro do intervalo de referência.

A figura seguinte apresenta a comparação entre os resultados do EnergyPlus obtidos pela *Development Team* e os resultados obtidos pelos programas de referência para o Potência de Pico de Arrefecimento.

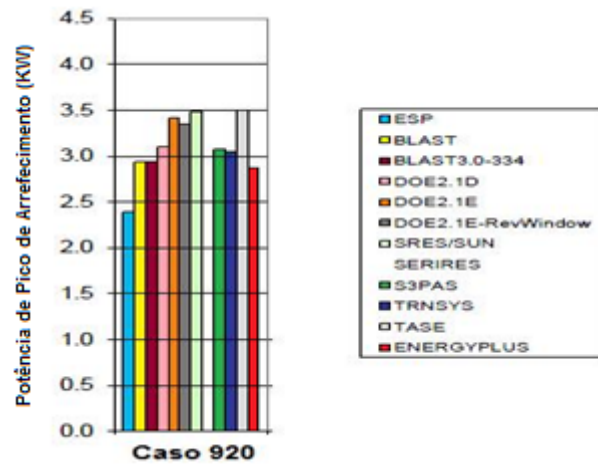


Fig.15 – Potência de Pico de Arrefecimento – Comparação com os programas de referência [8]

3

CLIMA EXTERIOR

3.1. DADOS CLIMÁTICOS

3.1.1. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO TMY

Para efectuar simulações, o programa EnergyPlus utiliza um ficheiro climático. É possível descarregar do site do programa [15] o ficheiro climático TMY do Porto.

O formato TMY significa *Typical Meteorological Year*, ou seja, Ano Meteorológico Típico. Consiste num conjunto de dados, de hora a hora, de valores de radiação solar e outros elementos meteorológicos para um período de 1 ano. Trata-se de uma selecção de meses, a partir de anos individuais, compilados de forma a completar um ano [11].

O TMY foi criado pelo *Sandia National Laboratories*. O método Sandia consiste numa abordagem empírica que selecciona meses individuais de diferentes anos do período considerado. Por exemplo, no caso de considerar um período de 30 anos de dados, todos os 30 Janeiros são examinados e o considerado mais representativo é seleccionado para incluir no TMY. Os outros meses do ano são tratados da mesma maneira, compilando então, os 12 meses típicos seleccionados formando um ano completo [11].

O TMY não é necessariamente um bom indicador das condições do ano seguinte ou mesmo dos próximos 5 anos. Em vez disso, representa as condições julgadas típicas para um longo período de tempo, como por exemplo 30 anos [11].

Como representa condições típicas, em vez de condições extremas, não é aconselhável para dimensionamento de sistemas de climatização, sendo no entanto, aconselhável para estimativas de consumos de energia [12].

O TMY é utilizado pelo EnergyPlus num ficheiro do tipo EPW.

O quadro 9 indica os parâmetros contidos no EPW (ficheiro climático utilizado pelo EnergyPlus) e os parâmetros realmente utilizados no cálculo pelo EnergyPlus.

Quadro 9 – Parâmetros presentes no EPW / Parâmetros utilizados pelo EnergyPlus [12]

Parâmetro	Unidades do EPW	EnergyPlus
Ano	-	Não
Mês	-	Sim
Dia	-	Sim

Hora	-	Sim
Minuto	-	Não
Fonte de dados	-	Não
Temperatura de Bolbo Seco	C	Sim
Temperatura de Ponto de Orvalho	C	Sim
Humidade Relativa	%	Sim
Pressão Atmosférica	Pa	Sim
Radiação Horizontal Extraterrestre	Wh/m ²	Não
Radiação Directa Normal Extraterrestre	Wh/m ²	Não
Intensidade de Radiação Infravermelha do Céu	Wh/m ²	Sim
Radiação Global Horizontal	Wh/m ²	Não
Radiação Directa Normal	Wh/m ²	Sim
Radiação Difusa Horizontal	Wh/m ²	Sim
Iluminância Global Horizontal	Lux	Não
Iluminância Directa Normal	Lux	Não
Iluminância Difusa Horizontal	Lux	Não
Luminância Zenital	Lux	Não
Direcção do Vento	Graus	Sim
Velocidade do Vento	m/s	Sim
Cobertura do Céu (Quantidade de Nuvens)	tenths	Não
Cobertura do Céu Opaco	tenths	Não
Visibilidade	Km	Não
Altura da Base das Nuvens	m	Não
Observações do Tempo Presente	-	Sim
Códigos do Tempo Presente	-	Sim
Precipitação	mm	Não
Profundidade óptica do aerosol	thousandths	Não
Espessura de Neve	cm	Sim
Dias desde a última queda de neve	-	Não
Albedo	-	Não
Espessura líquida precipitada	mm	Sim
Rácio de precipitação líquida	hora	Não

3.1.2. ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO LFC-FEUP

Com o objectivo de ter valores reais utilizaram-se valores da estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções da FEUP, transformando-as para o formato EPW utilizado pelo EnergyPlus.

A estação do LFC-FEUP mede as seguintes grandezas físicas [13]:

- Temperatura do ar [°C];
- Humidade relativa [%];
- Velocidade do vento [m/s];
- Direcção do vento [graus]. O Norte corresponde a 0° e aumenta no sentido dos ponteiros do relógio;
- Radiação solar [W/m²];
- Pressão atmosférica [bar];
- Precipitação [mm].

A estação está colocada na cobertura do edifício onde funciona o Departamento de Engenharia Civil, na Faculdade Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) [14], indicada na figura seguinte:



Fig.16 – Vista Geral da Estação Meteorológica do LFC-FEUP [14]

Apresentam-se as figuras seguintes para melhor descrever a estação do LFC-FEUP.



Fig.17 – Sensor de temperatura e humidade relativa [14]



Fig.18 – Piranômetro – Medição de radiação solar [14]



Fig.19 – Anemômetro – Medição da velocidade e/ou força do vento [14]



Fig.20 – Cata-vento – Medição da orientação do vento [14]



Fig.21 – Pirgeómetro – Medição de radiação terrestre e atmosférica [14]



Fig.22 – Pluviómetro – Medição de precipitação [14]



Fig.23 – Sistema de aquisição de dados – Guarda a informação registada pela estação [14]

3.1.2.1 Criação do Ficheiro Climático

Para efectuar simulações no EnergyPlus com os dados do LFC-FEUP é necessário criar um ficheiro climático que possa ser utilizado pelo programa.

Para criar o ficheiro climático utiliza-se o ficheiro TMY do Porto, introduzindo neste os valores medidos pela estação do LFC-FEUP.

O programa utiliza dois parâmetros que estão em falta nos dados fornecidos pelo laboratório de física das construções (LFC) que são:

- *Dew Point Temperature*, que é a Temperatura de Ponto de Orvalho;
- *Direct Normal Radiation*, que é a Radiação Directa Normal.

Para calcular a Temperatura de Ponto de Orvalho é necessário possuir valores de Humidade Relativa (HR) e Temperatura. A Temperatura de Ponto de Orvalho é calculada através da fórmula seguinte [16]:

$$T_d = \frac{b \times \gamma(T, HR)}{a - \gamma(T, HR)} \quad (24)$$

Onde:

$$\gamma(T, HR) = \frac{a \times T}{b - T} + \ln\left(\frac{HR}{100}\right) \quad (25)$$

$$a = 17,271$$

$$b = 237,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sendo esta fórmula válida para as condições seguintes:

- $0^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$;
- $1\% < HR < 100\%$;
- $0^\circ\text{C} < T_d < 50^\circ\text{C}$.

Seguidamente, procede-se ao cálculo da Intensidade de Radiação Directa Normal (I_i). Para o seu cálculo é necessário possuir os dados seguintes:

- Intensidade da Radiação Difusa em Superfície Horizontal (I_{dh});
- Intensidade de Radiação Global em Superfície Horizontal (I_{gh});
- Altura solar (h).

A Intensidade de Radiação Directa Normal é calculada pela fórmula seguinte [9]:

$$I_i = \frac{I_{gh} - I_{dh}}{\text{sen}(h)} \quad (26)$$

Depois de calculados os dados em falta, procede-se à introdução dos dados da estação do LFC-FEUP no ficheiro TMY do Porto.

Os parâmetros seguintes são substituídos, no ficheiro, pelos da estação do LFC-FEUP:

- Temperatura;
- Humidade Relativa;
- Temperatura de Ponto de Orvalho;
- Intensidade de Radiação Directa Normal;
- Intensidade de Radiação Difusa Horizontal.

Os restantes dados do ficheiro TMY mantêm-se inalterados, pois têm pouca influência na simulação, uma vez que usam valores de referência da cidade do Porto e, outros como a localização, não podem ser alterados. O mais importante é ter dados reais de temperatura, radiação solar e humidade relativa que são os valores que mais influenciam a simulação.

3.2. PARÂMETROS CLIMÁTICOS

Neste capítulo aparece a descrição dos parâmetros que entram no ficheiro climático e que têm influência nas equações apresentadas no capítulo anterior.

3.2.1. TEMPERATURA EXTERIOR

A figura seguinte representa o gráfico de temperatura de bolbo seco disponível no ficheiro TMY do porto, ao longo do ano.

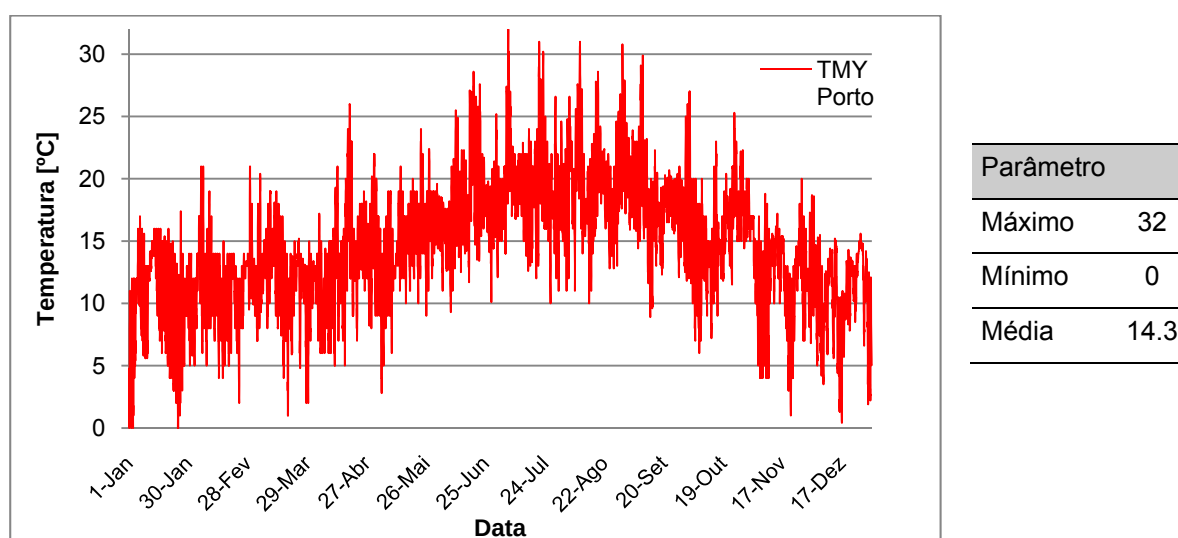


Fig.24 – Temperatura de bolbo seco do ficheiro TMY do Porto

Verifica-se a existência de um período mais quente, o qual inclui os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro. Para uma melhor descrição da temperatura ao longo do ano, apresenta-se o quadro 10, o qual, apresenta o valor máximo, mínimo e médio de temperatura em cada mês, do ficheiro TMY do Porto.

Quadro 10 – Temperaturas mensais – ficheiro TMY

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	17.4	21	21	26	24	28.6	32	31	29.9	27	20	18.7
Mínimo	0	2	1	5	2.8	9.3	10	10	8.9	6	1	0.4
Média	9.4	10.7	11.6	13.2	14.5	17.8	19.0	19.4	18.0	15.5	12.2	10.3

Dos sensores instalados no local havia um destinado a medir a temperatura e humidade relativa exteriores designado por sensor 15. Na Fig.25 procede-se à comparação dos valores de temperatura da estação do LFC-FEUP, TMY do Porto e sensor 15.

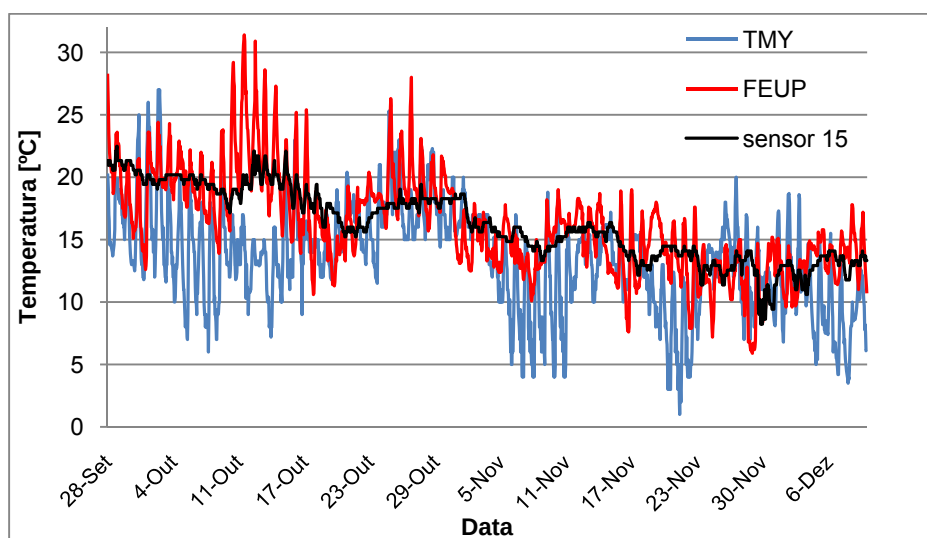


Fig.25 – Temperatura de bolbo seco para estação do LFC-FEUP, TMY e sensor 15 (exterior)

Considerando a curva representativa da estação do LFC-FEUP, verifica-se que as temperaturas são mais altas no início, nomeadamente em Setembro e Outubro, e diminuem significativamente a partir de Novembro. Podemos considerar então, a existência de dois períodos distintos, designando o primeiro por período 1 (período mais quente) e o segundo por período 2 (período mais frio). Durante o desenvolvimento do capítulo vai-se designar o período mais quente, simplesmente, por período quente ou período 1. Da mesma forma, vai-se designar o período mais frio, simplesmente, por período frio ou período 2.

Comparando as três curvas, observa-se que, a estação meteorológica do LFC-FEUP é a que apresenta, em geral, resultados mais elevados, enquanto o TMY do Porto apresenta resultados menores e o sensor 15 resultados intermédios. Verifica-se que o sensor 15 registou valores com menor variação de amplitude. Isto deve-se ao facto de o sensor estar protegido, ou seja, não estava nas condições reais de espaço exterior.

No quadro 11 apresentam-se os valores de máximo, mínimo e média para a estação do LFC-FEUP, TMY do Porto e sensor, considerando o período total, o período 1 e o período 2.

Quadro 11 – Temperatura máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP, TMY e sensor

Parâmetro	Temperatura (°C)		
	Período total	Período 1	Período 2
FEUP	Máximo	31.4	31.4
	Mínimo	5.9	10.6
	Média	16.2	13.6
TMY	Máximo	27	27
	Mínimo	1	6
	Média	13.5	15.6
Sensor	Máximo	22.5	22.5
	Mínimo	8.2	15.2
	Média	16.2	18.8

Para facilitar a apresentação dos dados da estação meteorológica do LFC-FEUP, apresentam-se duas figuras em que se consideram apenas três dias. Na Fig.26 apresentam-se os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro, ou seja, período quente. Na Fig.27 apresentam-se os dias 6,7 e 8 de Dezembro, ou seja, período frio.

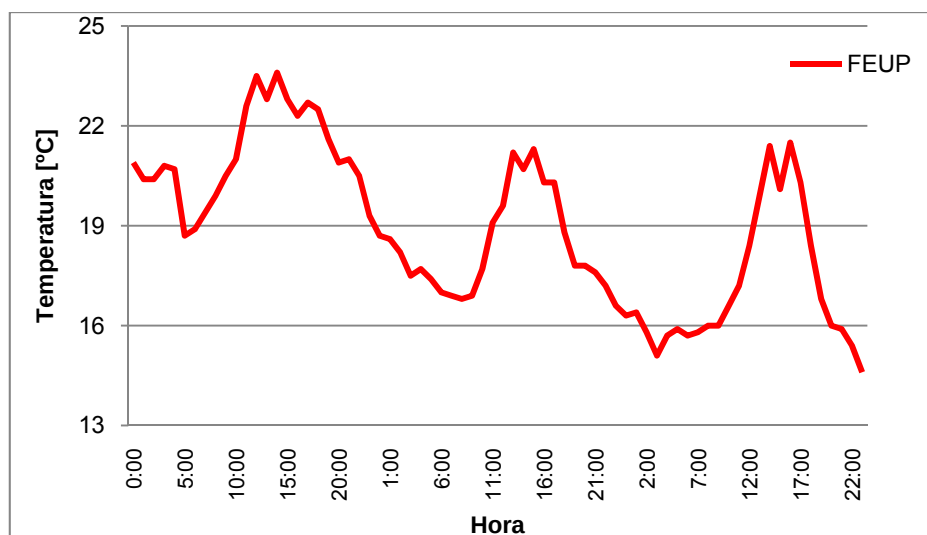


Fig.26 – Temperatura de bolbo seco para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).

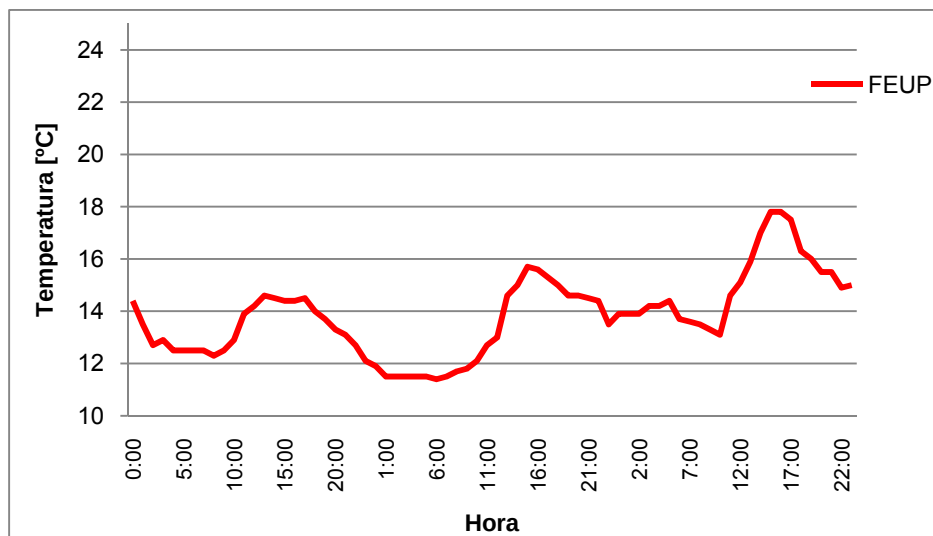


Fig.27 – Temperatura de bolbo seco para estação do LFC-FEUP para os dias 6,7 e 8 de Dezembro (período frio).

Verifica-se que as temperaturas são mais altas no primeiro caso, isto é, no período quente, como seria de esperar. No primeiro caso a média é de 18,9°C, enquanto no segundo é de 13,9°C.

3.2.2. HUMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO

Neste ponto vai-se proceder à apresentação de humidade relativa e temperatura de ponto de orvalho, do TMY do Porto, estação meteorológica do LFC-FEUP e sensor.

A figura 28 apresenta os valores de humidade relativa anual do TMY do Porto.

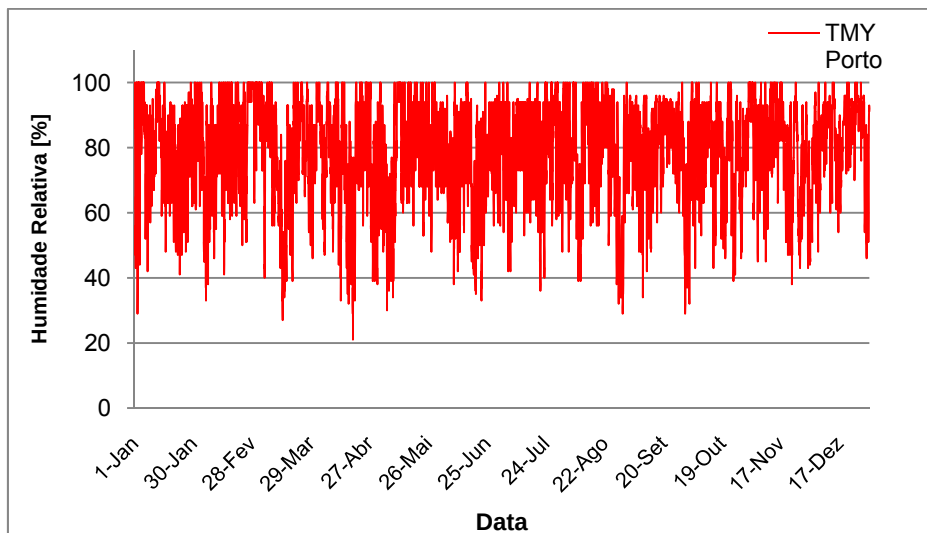


Fig.28 – Humidade relativa anual do TMY do Porto

O quadro 12 apresenta o valor máximo, mínimo e média de humidade relativa em cada mês, do ficheiro TMY do Porto.

Quadro 12 – Humidade Relativa mensal – ficheiro TMY

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mínimo	29	33	27	21	30	33	36	29	34	29	38	43
Média	80.2	81.1	78.1	77.0	78.2	75.5	80.0	76.5	81.9	76.5	81.0	82.0

Através da Fig.28 e do quadro 12, verifica-se que não há uma grande variação da humidade relativa média mensal.

A Fig.29 apresenta os valores de temperatura de ponto de orvalho anual do TMY do Porto.

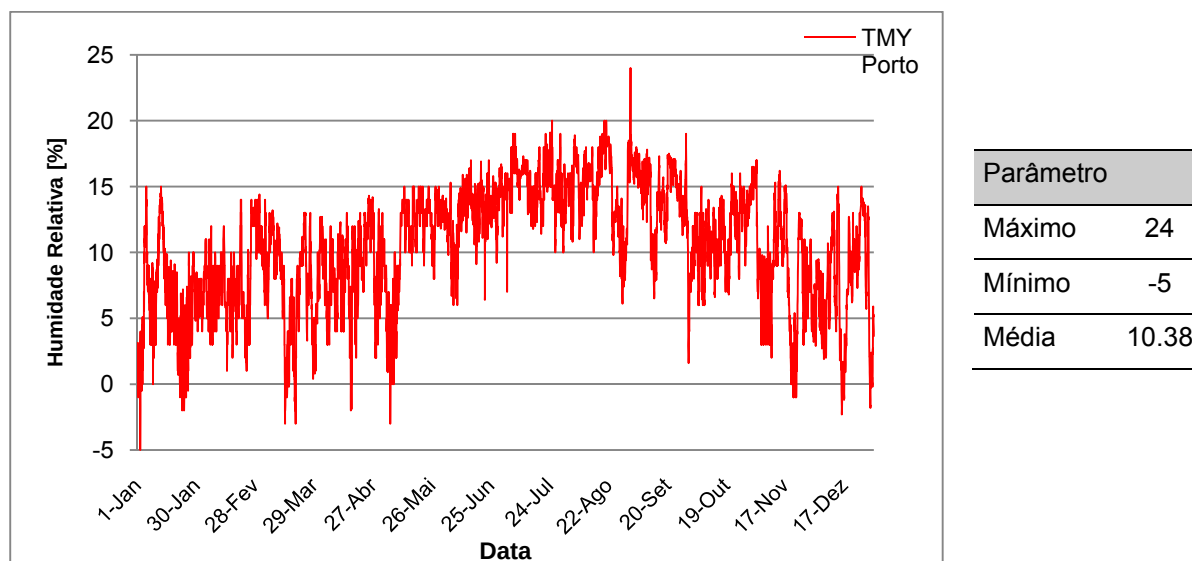


Fig.29 – Temperatura de Ponto de Orvalho anual do TMY do Porto

O quadro 13 apresenta o valor máximo, mínimo e média de temperatura de ponto de orvalho em cada mês, do ficheiro TMY do Porto.

Quadro 13 – Temperatura de Ponto de Orvalho mensal – ficheiro TMY

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	15	14	14.4	14.3	15	17	20	20	24	16	17	15
Mínimo	-5	1	-3	-2	-3	6	7	6.1	6.5	1.6	-1	-2.3
Média	5.9	7.3	7.6	8.7	10.4	13.1	15.2	14.6	14.7	11.0	8.8	7.2

Observa-se que, a temperatura de ponto de orvalho é mais baixa nos meses frios, ou seja, Janeiro, Fevereiro, Março e Dezembro, período correspondente ao Inverno (início em 21 de Dezembro e fim em 20 de Março).

Na Fig.30 procede-se à apresentação dos valores de humidade relativa da estação do LFC-FEUP, TMY do Porto e sensor 15.

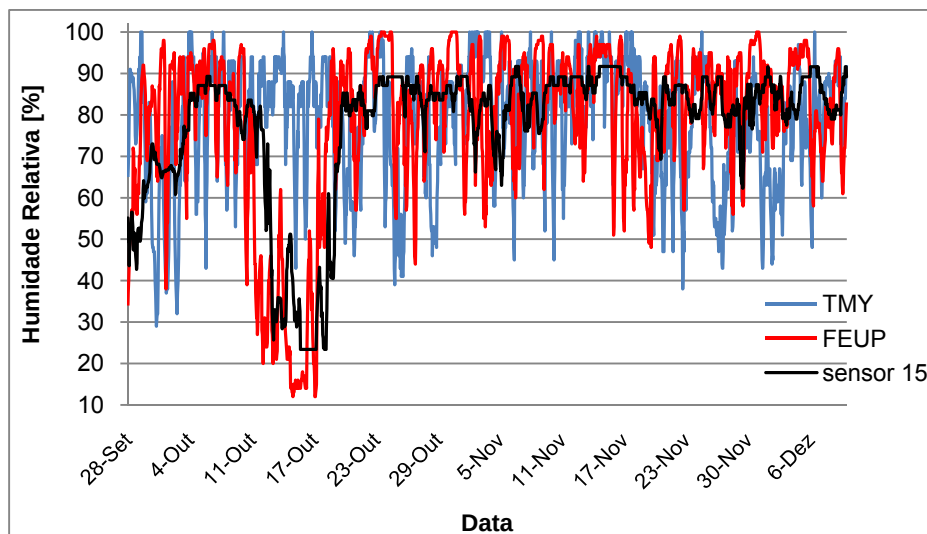


Fig.30 – Humidade relativa para estação do LFC-FEUP, TMY e sensor 15 (exterior)

Observando a Fig.30 verifica-se que, aproximadamente, no período de 10 a 20 de Outubro há um decréscimo significativo dos valores correspondentes à estação do LFC-FEUP e sensor 15, o que não se verifica para o TMY no qual não se vislumbram alterações significativas relativamente ao restante período.

No quadro 14 são apresentados os valores de máximo, mínimo e média da estação meteorológica do LFC-FEUP, TMY do Porto e sensor, no período em estudo.

Quadro 14 – Humidade relativa máxima, mínima e média da estação da FEUP, TMY e sensor, no período total.

	Parâmetro	Humidade Relativa (%)
FEUP	Máximo	100
	Mínimo	12
	Média	78.3
TMY	Máximo	100
	Mínimo	29
	Média	78.4
Sensor	Máximo	91.7
	Mínimo	23.4
	Média	77.7

A Fig.31 apresenta a comparação entre os valores, de temperatura de ponto de orvalho, medidos pela estação do LFC-FEUP e os valores do TMY do Porto.

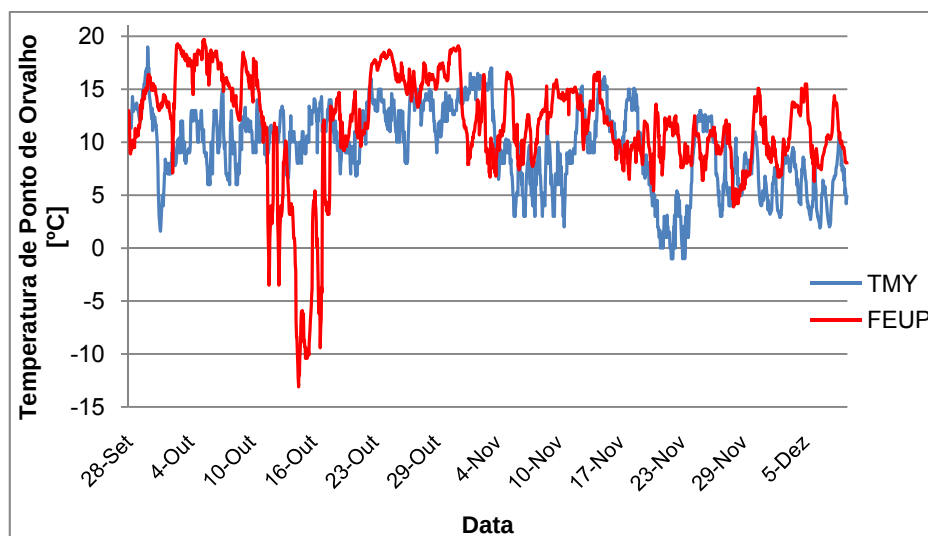


Fig.31 – Temperatura de ponto de orvalho para estação do LFC-FEUP e TMY

No quadro 15 são apresentados os valores de máximo, mínimo e média, de temperatura de ponto de orvalho, da estação meteorológica do LFC-FEUP e TMY do Porto, no período em estudo.

Quadro 15 – Temperatura de ponto de orvalho máxima, mínima e média da estação da FEUP e TMY

	Parâmetro	Temperatura de Ponto de Orvalho (°C)
FEUP	Máximo	19.7
	Mínimo	-13.1
	Média	11.6
TMY	Máximo	19
	Mínimo	-1
	Média	9.5

Considerando a estação meteorológica do LFC-FEUP, presente na Fig.31, observa-se que os valores crescem até, aproximadamente, 10 de Outubro, sofrendo nessa altura uma descida abrupta que se prolonga aproximadamente até 20 de Outubro. Em seguida os valores voltam a subir para depois decrescerem de forma gradual, pouco acentuada, até ao fim do período. No período em que os valores da estação do LFC-FEUP descem abruptamente, os valores do TMY não sofrem grandes alterações. Neste período a estação do LFC-FEUP registou valores de -13.1°C o que deve ter-se devido a algum erro de medição de Humidade relativa. Os valores de temperatura de ponto de orvalho não foram, na realidade, medidos pela estação do LFC-FEUP, mas sim calculados através dos seus valores de humidade relativa.

Na globalidade do período, sem considerar aquele período específico, a estação do LFC-FEUP apresenta, em geral, valores superiores ao TMY.

3.2.3. RADIAÇÃO DIRECTA NORMAL

Radiação directa normal é a quantidade de radiação solar em Wh/m^2 recebida, directamente do disco solar, numa superfície perpendicular aos raios solares, durante o número de minutos precedentes ao tempo indicado.

A Fig.32 apresenta a variação anual dos valores de Radiação Directa Normal (Wh/m^2) presentes no TMY do Porto.

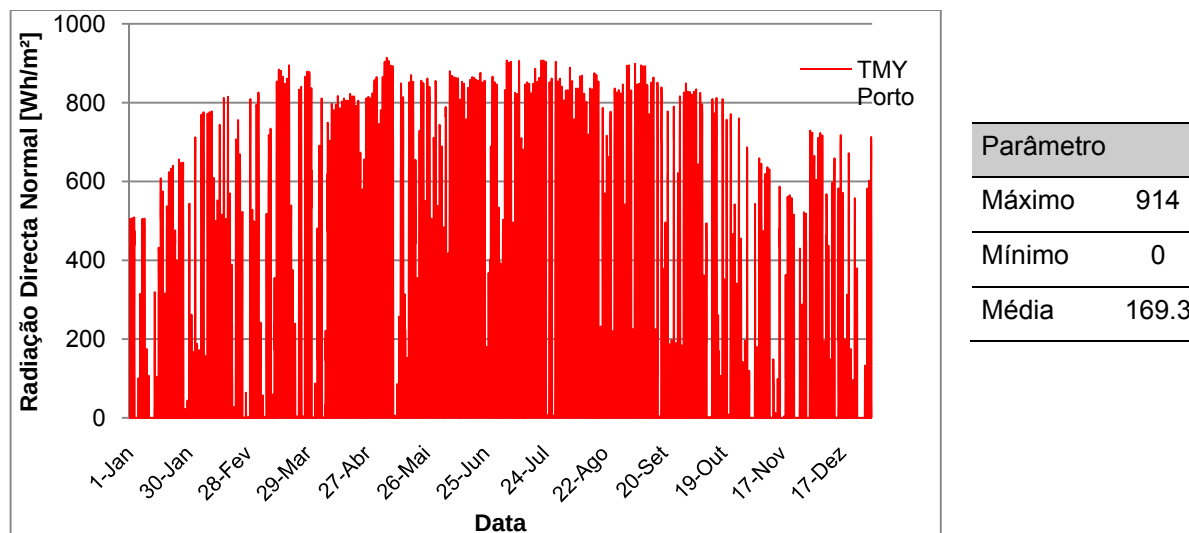


Fig.32 – Radiação directa normal anual do TMY do Porto

O quadro 16 apresenta o valor máximo, mínimo e média de radiação directa normal em cada mês, do ficheiro TMY do Porto.

Quadro 16 – Radiação directa normal mensal – ficheiro TMY

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	656	815	895	824	914	880	907	889	899	849	659	729
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Média	78.5	116.9	173.9	205.5	227.5	261.6	253.9	236.0	183.3	144.0	67.1	80.0

A Fig.33 apresenta a comparação entre os valores medidos pela estação do LFC-FEUP e os valores do TMY do Porto.

Considerando os dados da estação do LFC-FEUP, verifica-se que os valores são significativamente superiores, em média, no início, ou seja no período quente.

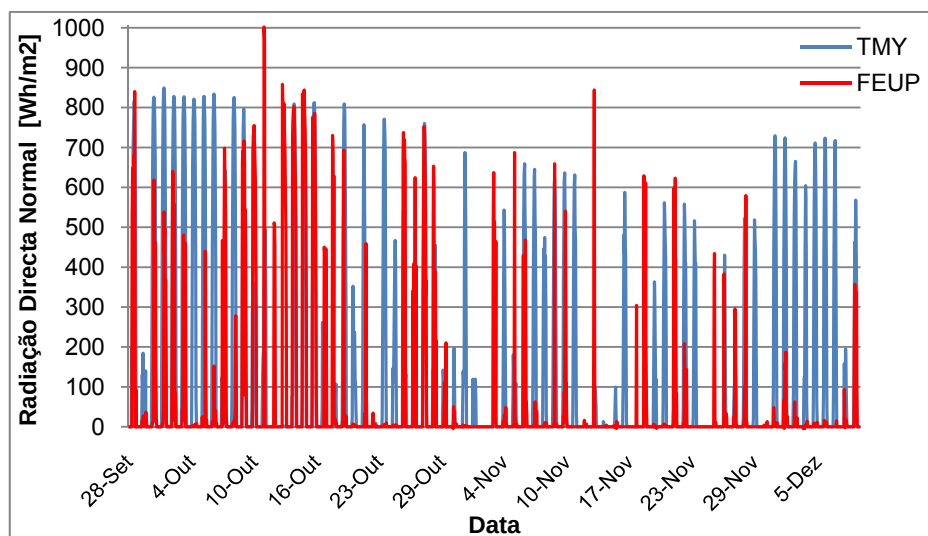


Fig.33 – Radiação directa normal para estação do LFC-FEUP e TMY

No quadro 17 são apresentados os valores de máximo, mínimo e média, de radiação directa normal, da estação meteorológica do LFC-FEUP e TMY do Porto, no período em estudo.

Quadro 17 – Radiação horizontal difusa máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP e TMY

Parâmetro		Radiação directa normal (Wh/m²)
FEUP	Máximo	1002
	Mínimo	0
	Média	55.9
TMY	Máximo	849
	Mínimo	0
	Média	113.2

Através do quadro, conclui-se que, os valores do TMY são superiores em média aos valores da estação meteorológica do LFC-FEUP.

A Fig.34 apresenta os valores de Radiação Directa normal (Wh/m²) medidos na estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente) e a Fig.35 apresenta os valores para os dias 6, 7 e 8 de Dezembro (período frio).

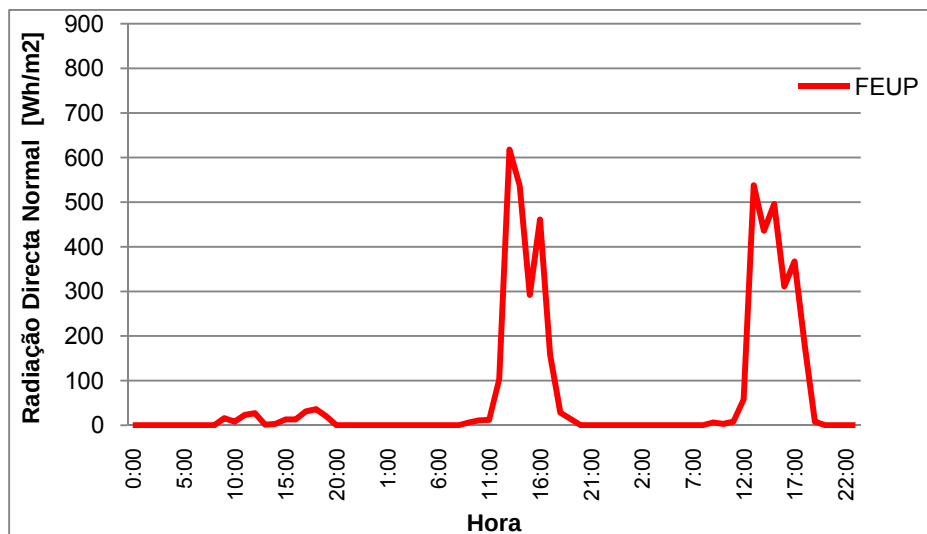


Fig.34 – Radiação directa normal para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).

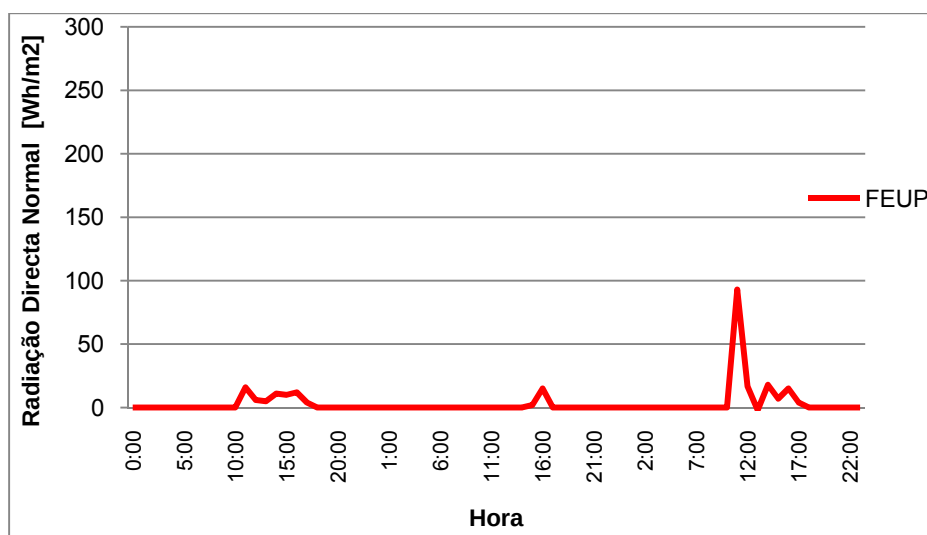


Fig.35 – Radiação directa normal para estação do LFC-FEUP para os dias 6,7 e 8 de Dezembro (período frio).

Observa-se que os valores correspondentes aos dias do período quente (Fig.34) são muito superiores aos do período frio (Fig.35).

Constata-se que os valores são aproximadamente zero das 20 horas às 7 horas, altura em que crescem até atingirem o máximo perto das 13 horas, decrescendo em seguida.

3.2.4. RADIAÇÃO HORIZONTAL DIFUSA

Radiação Horizontal Difusa é a quantidade de radiação solar em Wh/m^2 recebida do céu (excluindo o disco solar) numa superfície horizontal, durante o número de minutos precedentes ao tempo indicado.

A Fig.36 apresenta os valores de Radiação Horizontal Difusa (Wh/m^2) do TMY do Porto.

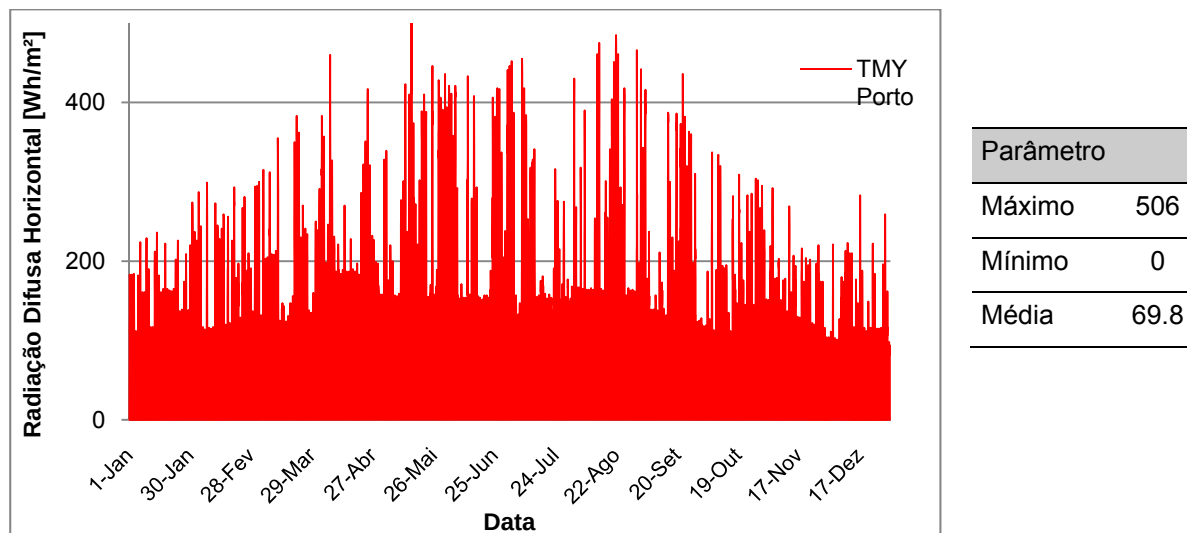


Fig.36 – Radiação Horizontal Difusa anual do TMY do Porto

O quadro 18 apresenta os valores de máximo, mínimo e média de radiação horizontal difusa em cada mês, do ficheiro TMY do Porto.

Quadro 18 – Radiação horizontal difusa mensal – ficheiro TMY

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	274	299	383	460	506	436	455	485	466	337	292	283
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Média	42.8	53.9	68.0	88.4	99.1	98.2	87.8	87.0	75.7	57.6	44.5	33.5

Observa-se que Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro são os meses que apresentam, em média, maior radiação horizontal difusa.

A Fig.37 apresenta a comparação entre os valores medidos pela estação do LFC-FEUP e os valores do TMY do Porto.

Verifica-se que os valores de Radiação Horizontal Difusa são superiores no início do período em estudo, ou seja no período quente.

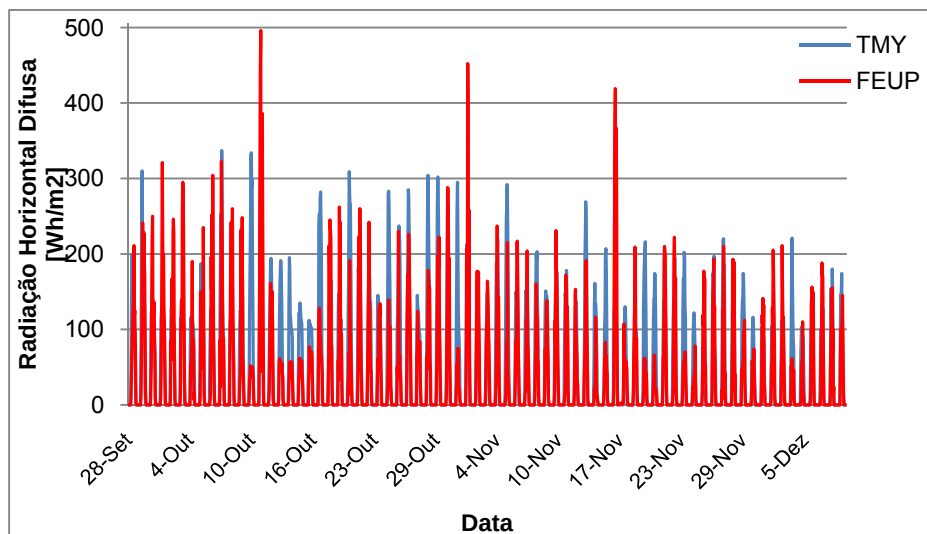


Fig.37 – Radiação Horizontal Difusa para estação do LFC-FEUP e TMY

No quadro 19 são apresentados os valores de máximo, mínimo e média, de radiação horizontal difusa, da estação meteorológica do LFC-FEUP e TMY do Porto, no período em estudo.

Quadro 19 – Radiação horizontal difusa máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP e TMY

Parâmetro		Radiação Horizontal Difusa (Wh/m²)
FEUP	Máximo	496
	Mínimo	0
	Média	38.2
TMY	Máximo	337
	Mínimo	0
	Média	49.3

Os valores do TMY do Porto são superiores, em média, aos da estação meteorológica do LFC-FEUP. Observa-se o facto de se terem registado, em determinados momentos, “picos” (valores muito elevados) na estação do LFC-FEUP. Assim, a estação do LFC-FEUP apresenta um máximo superior ao do TMY.

A Fig.38 apresenta os valores de Radiação Horizontal Difusa (Wh/m²) medidos na estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente) e a Fig.39 apresenta os valores para os dias 6, 7 e 8 de Dezembro (período frio).

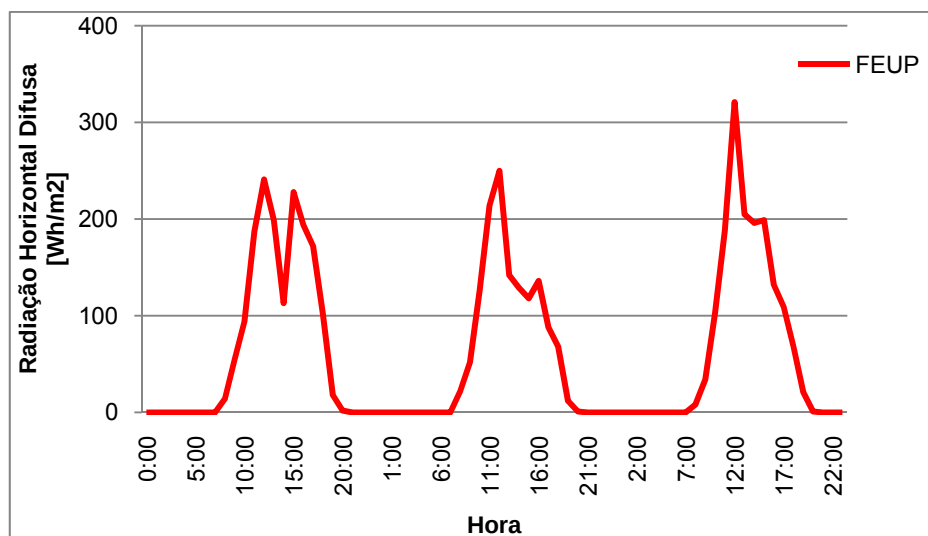


Fig.38 – Radiação Horizontal Difusa para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).

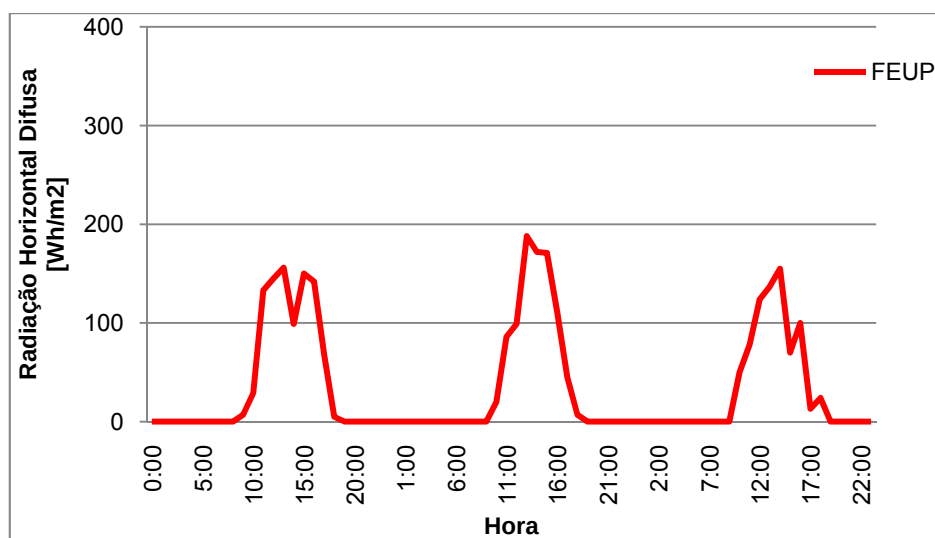


Fig.39 – Radiação Horizontal Difusa para estação do LFC-FEUP para os dias 6, 7 e 8 de Dezembro (período frio).

Pela análise das duas figuras, observa-se que os valores são superiores na Fig.38, ou seja, no período quente.

Diariamente observa-se que os valores crescem, em geral, das 7 horas até às 12 horas, altura em que atingem o máximo, decrescendo em seguida até às 20 horas, altura em que atinge o valor de 0 Wh/m^2 , que se mantém até às 7 horas.

3.2.5. INTENSIDADE DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA HORIZONTAL DO CÉU

A Fig.40 apresenta os valores de Intensidade de Radiação Infravermelha Horizontal do Céu (Wh/m^2) presentes no TMY do Porto.

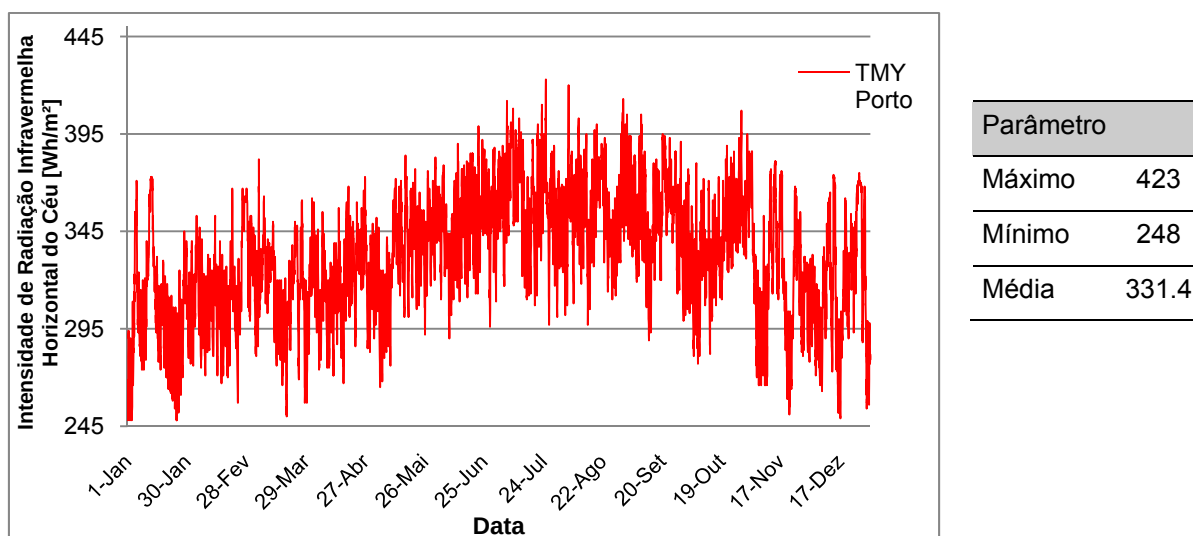


Fig.40 – Intensidade de radiação infravermelha horizontal do céu para o TMY do Porto

O quadro 20 apresenta os valores de máximo, mínimo e média de intensidade de radiação infravermelha horizontal, em cada mês, do ficheiro TMY do Porto.

Quadro 20 – Radiação infravermelha horizontal do céu – ficheiro TMY

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	373	367	382	373	384	399	423	420	413	407	395	375
Mínimo	248	257	250	267	265	290	297	297	289	277	251	249
Média	300.5	312.5	314.8	320.2	331.3	348.7	360.3	354.4	356.7	338.6	323.2	314.2

Verifica-se que, os meses que apresentam, em média, maior intensidade de radiação infravermelha horizontal são Junho, Julho, Agosto e Setembro.

A Fig.41 apresenta a comparação entre os valores medidos pela estação do LFC-FEUP e os valores do TMY.

Verifica-se que, os valores são superiores em média no início, ou seja, no período quente.

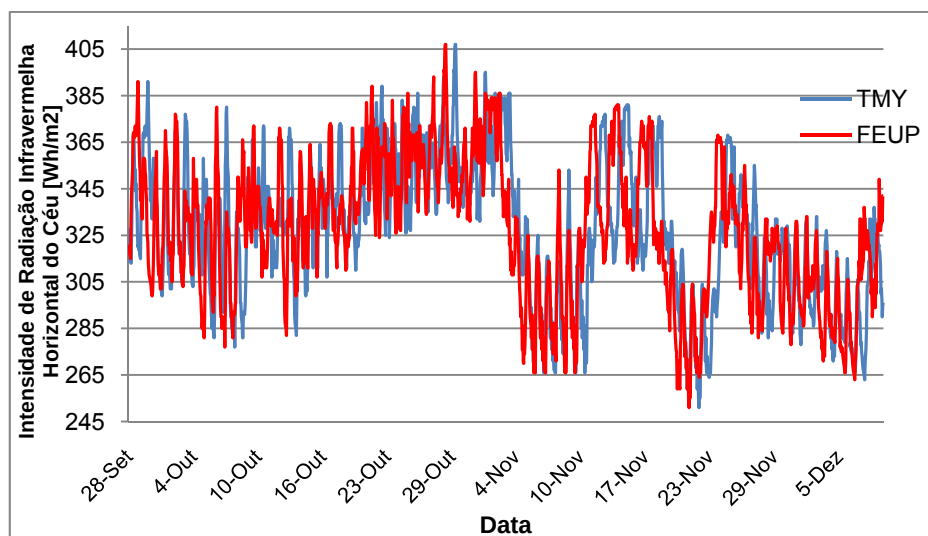


Fig.41 – Intensidade de radiação infravermelha horizontal do céu para estação da FEUP e TMY

No quadro 21 são apresentados os valores de máximo, mínimo e média, de intensidade de radiação infravermelha horizontal, da estação meteorológica do LFC-FEUP e TMY do Porto, no período em estudo.

Quadro 21 – Radiação infravermelha horizontal máxima, mínima e média da estação da FEUP e TMY

	Parâmetro	Intensidade de Radiação Infravermelha Horizontal (Wh/m²)
FEUP	Máximo	407
	Mínimo	251
	Média	327.3
TMY	Máximo	407
	Mínimo	251
	Média	327.5

Através da Fig.41 e quadro 21, é possível observar que os valores medidos pela estação meteorológica do LFC-FEUP e os valores do TMY do Porto são muito idênticos. O máximo e mínimo são iguais para os dois casos. A média também é idêntica para os dois casos.

A Fig.42 apresenta os valores de Intensidade de Radiação Infravermelha Horizontal do Céu (Wh/m²) medidos na estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).

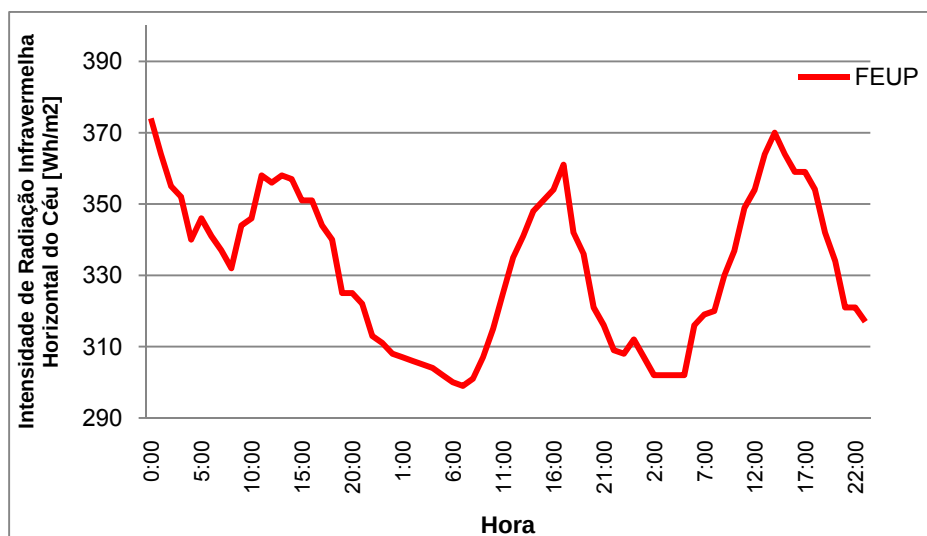
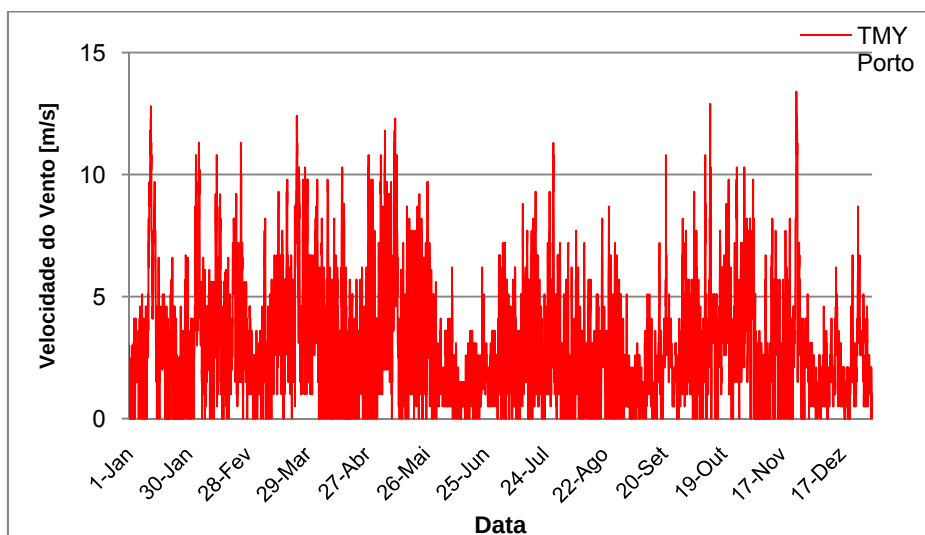


Fig.42 – Intensidade de radiação infravermelha horizontal do céu para estação do LFC-FEUP para os dias 29 e 30 de Setembro e 1 de Outubro (período quente).

Os valores, de intensidade de radiação infravermelha horizontal, atingem um máximo entre as 12 horas e as 17 horas. Seguidamente decrescem até atingir o mínimo entre as 4 horas e as 7 horas.

3.2.6. VELOCIDADE DO VENTO

A Fig.43 apresenta os valores de velocidade do vento (m/s) do ficheiro TMY do Porto.



Parâmetro	
Máximo	13.4
Mínimo	0
Média	2.95

Fig.43 – Velocidade do vento – TMY anual do Porto

O quadro 22 apresenta os valores de máximo, mínimo e média de velocidade do vento, em cada mês, do ficheiro TMY do Porto.

Quadro 22 – Velocidade do vento – ficheiro TMY

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	12.8	11.3	12.4	10.8	12.3	6.2	11.3	8.7	10.8	12.9	13.4	8.7
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Média	2.8	4.0	3.9	3.3	4.1	1.6	3.2	2.2	1.9	3.7	3.1	1.9

A Fig.44 apresenta a comparação entre os valores medidos pela estação do LFC-FEUP e os valores do TMY do Porto.

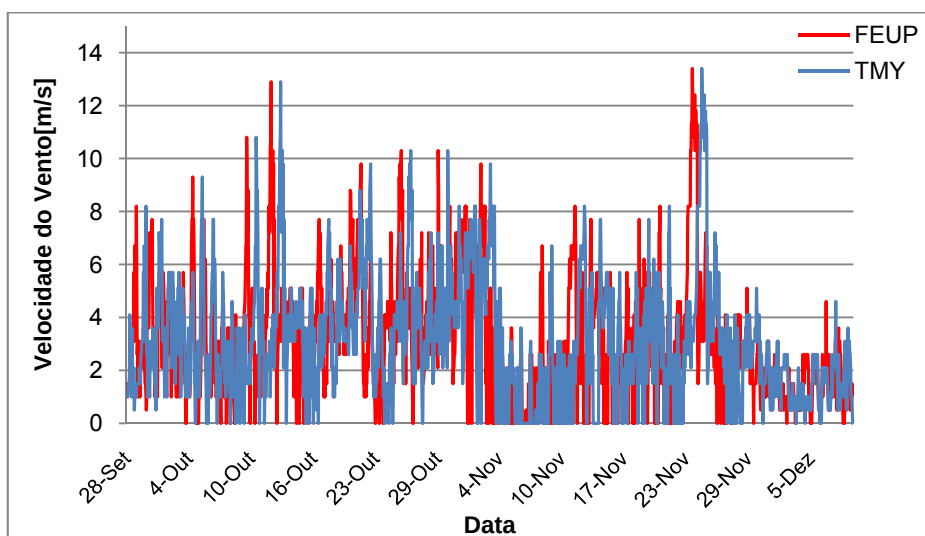


Fig.44 – Velocidade do vento para estação do LFC-FEUP e TMY

No quadro 23 são apresentados os valores de máximo, mínimo e média, de velocidade do vento, da estação meteorológica do LFC-FEUP e TMY do Porto, no período em estudo.

Quadro 23 – Velocidade do vento máxima, mínima e média da estação do LFC-FEUP e TMY

Parâmetro		Velocidade do vento (m/s)
FEUP	Máximo	13.4
	Mínimo	0
	Média	3.1
TMY	Máximo	13.4
	Mínimo	0
	Média	3.1

Verifica-se que os valores de velocidade do vento são praticamente idênticos para os casos da estação do LFC-FEUP e o TMY. A média resultou num valor de 3,1 m/s, igual para os dois casos.

4

APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

4.1. TRABALHOS ANTERIORES

Esta dissertação surge no seguimento de duas dissertações anteriores, as quais deram igualmente origem a outras duas dissertações desenvolvidas em paralelo com a actual. Na presente dissertação foi utilizado o modelo do EnergyPlus dos trabalhos anteriores, bem como as medições “*in situ*”.

4.2. EDIFÍCIO

O caso em estudo é uma moradia unifamiliar T5, geminada, integrada num complexo de moradias localizadas no Porto.

O complexo é constituído por doze moradias unifamiliares independentes, de três pisos cada, sendo um deles desenvolvido a nível inferior ao do arruamento. As moradias desenvolvem-se em dois conjuntos de seis, paralelas entre si e separadas por um corredor de acesso e circulação comum, ao nível do piso 0. Na Fig.45 é apresentada a planta do complexo, onde a moradia em estudo aparece destacada a vermelho e o jardim a verde.



Fig.45 – Planta geral da distribuição das moradias

O piso inferior ao arruamento (Piso -1) é constituído pela garagem, uma casa de banho de serviço, lavandaria e um compartimento técnico onde está colocada uma bomba de calor e termoacumulador. A planta do Piso -1 é indicada na Fig.46.



Fig.46 – Planta Piso -1

O piso 0, apresentado na Fig.47, é constituído por uma sala, cozinha, pátio de entrada e uma casa de banho de serviço. Na zona exterior existe um jardim.

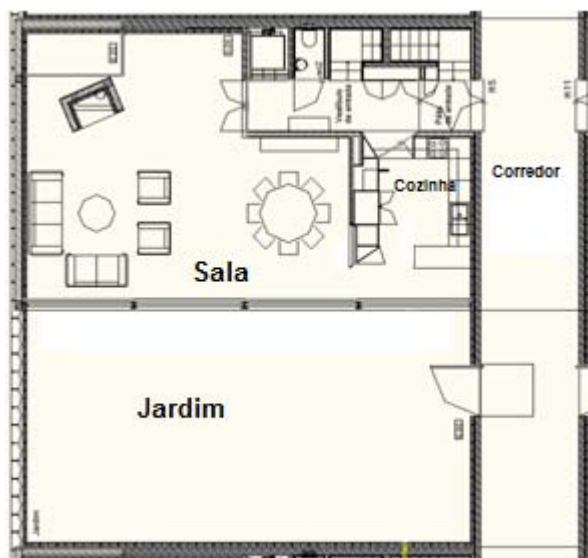


Fig.47 – Planta Piso 0

Na Fig.48 apresenta-se a planta do piso 1. Este é constituído por duas suites com quarto de vestir e por três quartos servidos por uma casa de banho.

A Fig.49 representa a planta da cobertura.

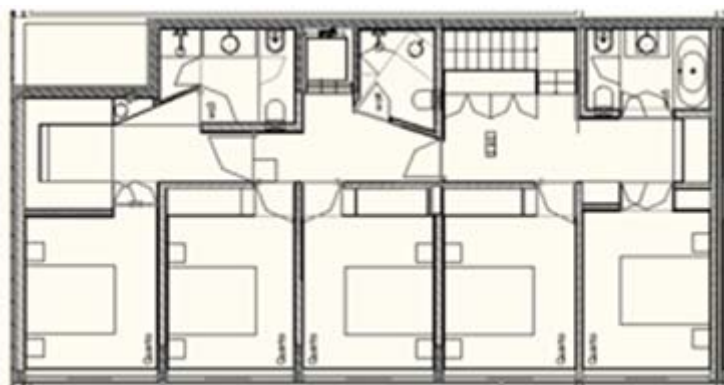


Fig.48 – Planta piso 1

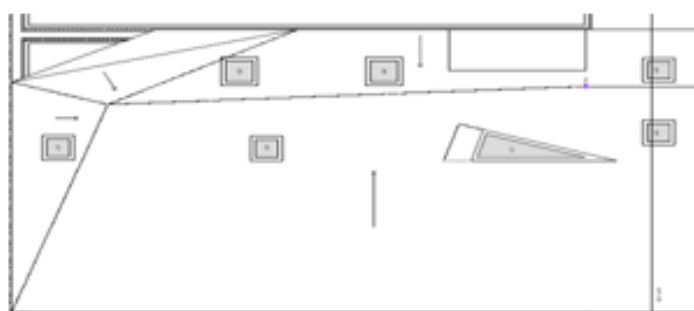


Fig.49 – Planta da cobertura

A fachada principal está orientada a Noroeste, a fachada posterior a Sudeste e as fachadas laterais orientadas a Sudoeste e Nordeste. A fachada com envidraçados está orientada a Sudoeste (Fig.50). O corte representativo desta fachada está indicado na Fig.51.



Fig.50 – Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste

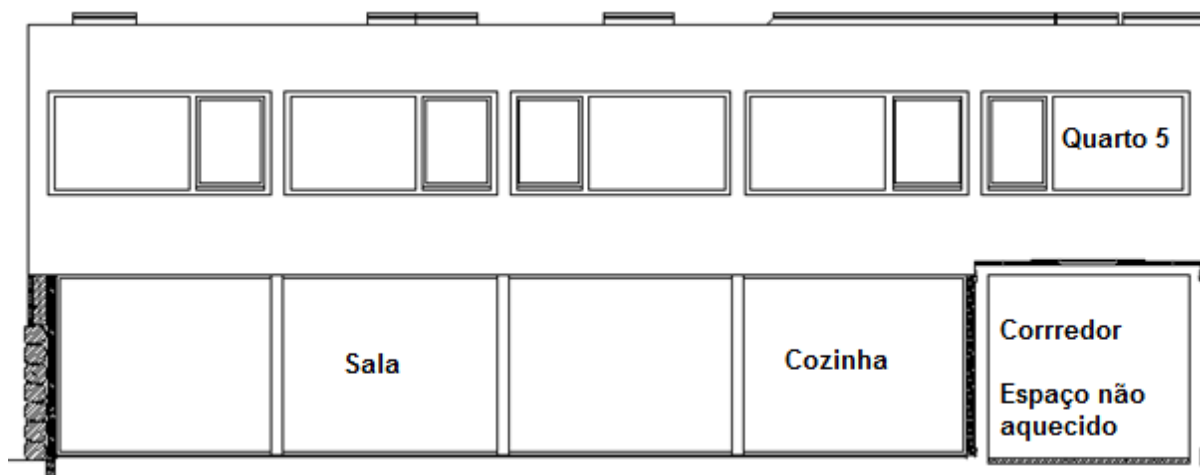


Fig.51 – Corte da Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste

Na Fig.51 está representado um corte dos pisos 0 e 1. O piso 0 contém quatro envidraçados, sendo que um deles pertence à cozinha e os outros à sala como está indicado na figura. Ao lado da cozinha existe um corredor de acesso às várias moradias representado na Fig.52.

O piso 1 contém cinco envidraçados pertencentes a quartos. O quarto do envidraçado colocado mais à direita (espaço aquecido) situa-se por cima do corredor de acesso (espaço não aquecido).

O piso -1, que não está representado no corte, é uma cave totalmente enterrada.



Fig.52 – Corredor de acesso às moradias

A fachada de Sudeste, situada no corredor de acesso comum, contém a porta de entrada para a moradia em estudo. Esta fachada está representada na figura seguinte:



Fig.53 – Fachada de Sudeste

A Fig.54 representa a fachada Noroeste.



Fig.54 – Fachada Noroeste

A fachada de Nordeste está representada na Fig.55 e Fig.56.



Fig.55 – Fachada Nordeste

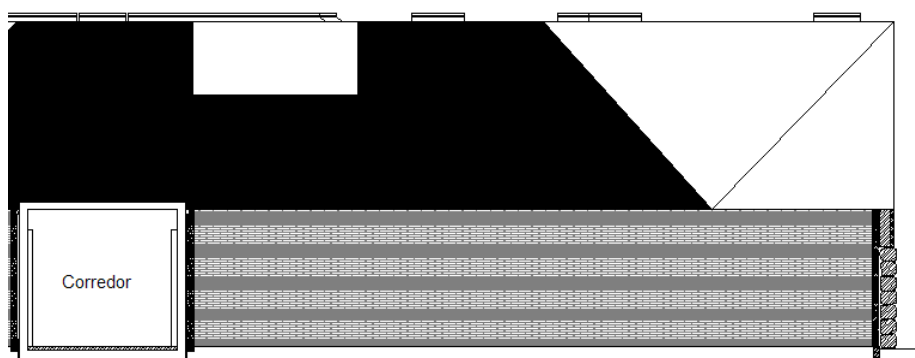


Fig.56 – Fachada Nordeste - corte

4.3. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Nesta secção precede-se à descrição dos elementos construtivos. Uma vez que a moradia ainda estava em fase de acabamentos durante o período de simulação, vão ser apenas considerados os materiais efectivamente colocados.

4.3.1. DESCRIÇÃO DAS PAREDES

Neste ponto serão descritas as várias paredes, exteriores e interiores, constituintes do edifício.

4.3.1.1. Paredes Exteriores Piso 0

Existem três tipos de paredes no piso 0:

- Tipo 1 – Fachada Sudeste;
- Tipo 2 – Fachada Noroeste;
- Tipo 3 – Fachada Nordeste.

A Fig.57 mostra um corte da parede de tipo 1 – Fachada de Sudeste

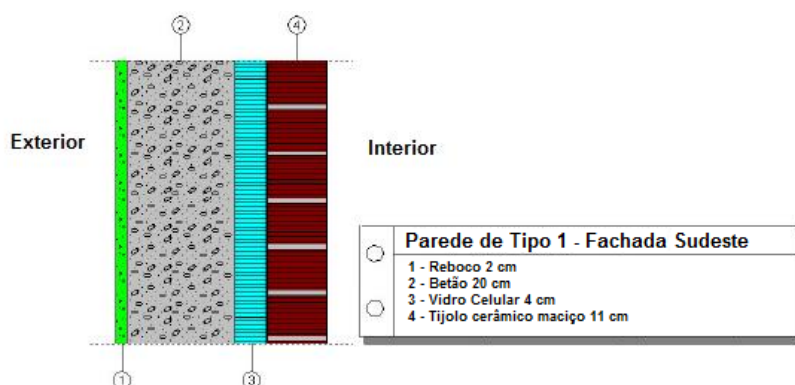


Fig.57 – Parede de Tipo 1 – Fachada Sudeste

A Fig.58 mostra um corte da parede de tipo 2 – Fachada Noroeste

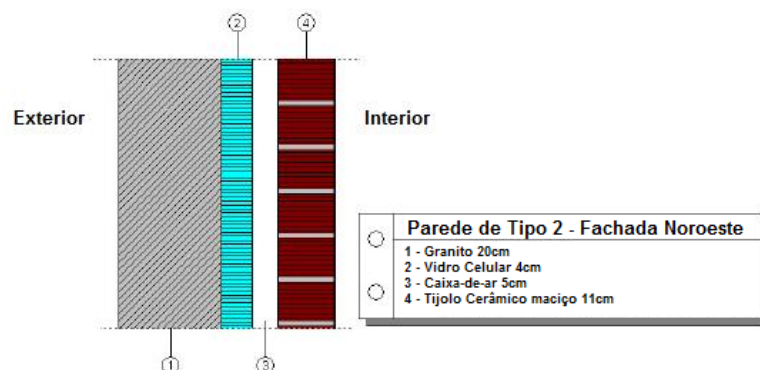


Fig.58 – Parede de Tipo 2 – Fachada Noroeste

A Fig.59 mostra um corte da parede de tipo 3 – Fachada Nordeste.

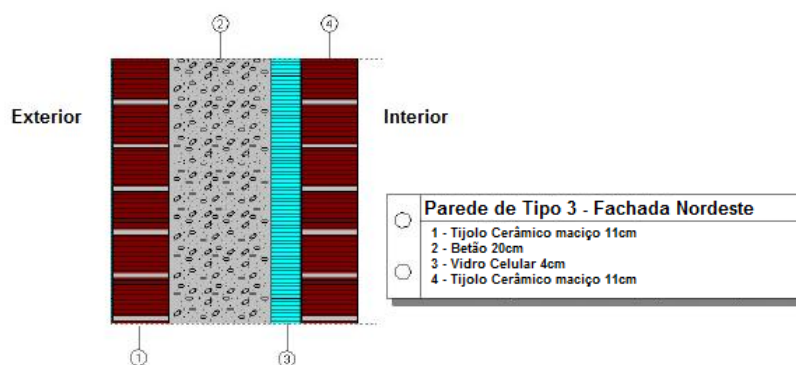


Fig.59 – Parede de Tipo 3 – Fachada Nordeste

4.3.1.2. Paredes Exteriores Piso 1

As paredes exteriores do piso 1, fachadas Sudoeste, Nordeste e Noroeste, são todas do mesmo tipo e serão designadas por tipo 4.

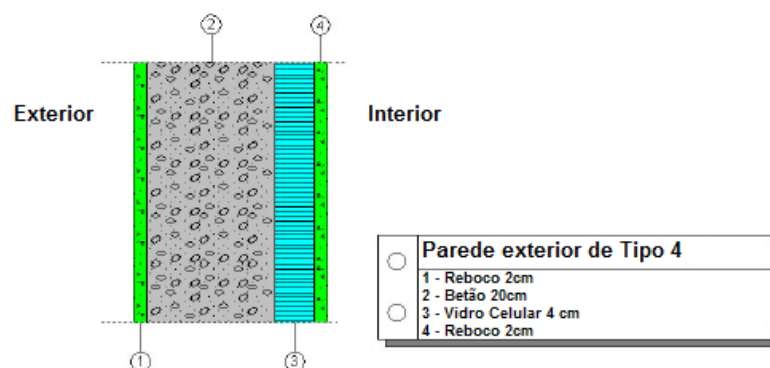


Fig.60 – Parede de Tipo 4 – Fachadas Sudoeste, Nordeste e Noroeste

Relativamente às paredes exteriores à ainda que considerar outras duas paredes devido à sua geometria peculiar (Fig.61 e Fig.62). Estas duas paredes são iguais em termos de constituição e são similares à do tipo 4 sendo a única diferença o facto de nestas paredes a espessura do vidro celular ser 5 cm. Estas paredes vão ser definidas como tipo 5.



Fig.61 – Parede de Tipo 5 – Parede exterior inclinada rectangular



Fig.62 – Parede de Tipo 5 – Parede exterior inclinada triangular

4.3.1.3. Parede De Separação da Habitação Adjacente

Como foi referido anteriormente a habitação em estudo é geminada. Na Fig.63 está representada a parede de separação das duas habitações que será designada por tipo 6.

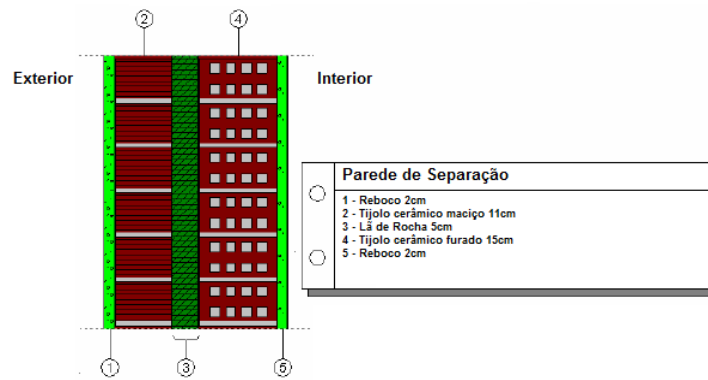


Fig.63 – Parede de Tipo 6 – Parede de separação das habitações

4.3.1.4. Paredes Interiores

Só há um tipo de paredes interiores que será designado por tipo 7.

A Fig.64 mostra a constituição das paredes interiores.

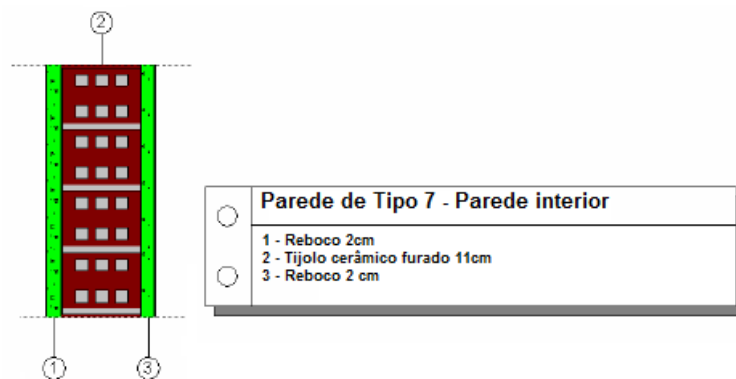


Fig.64 – Parede de Tipo 7 – Parede Interior

4.3.2. DESCRIÇÃO DOS PAVIMENTOS

A constituição dos pavimentos é igual para o piso 0 e piso 1 e está representada na Fig.65.

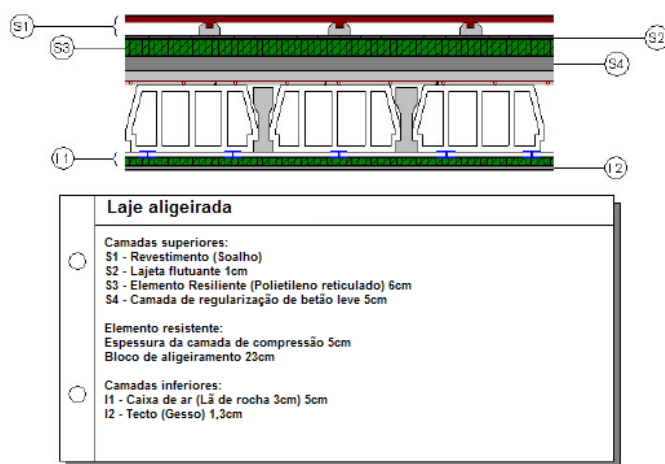


Fig.65 – Pavimento

4.3.3. DESCRIÇÃO DA COBERTURA

A Fig.66 mostra a constituição da cobertura.

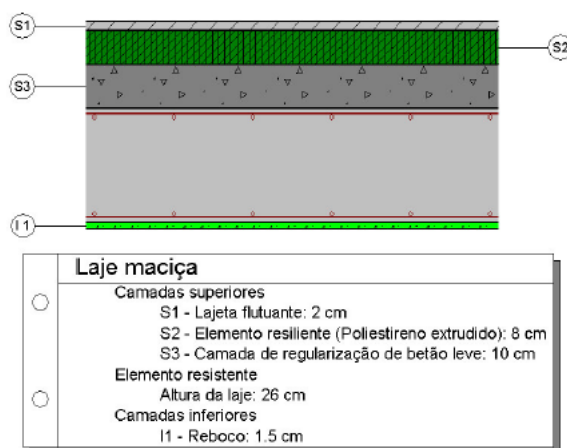


Fig.66 – Cobertura

4.3.4. DESCRIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS

Existe uma área considerável de envidraçados na habitação em estudo. São utilizados vidros duplos.

Os envidraçados existentes na sala e cozinha (piso 0) e nos quartos (piso 1) podem ser visualizados na Fig.50. A Fig.67 ilustra os envidraçados da sala vistos do interior, enquanto na Fig.68 estão representados os envidraçados existentes no piso 0.



Fig.67 – Envidraçados sala

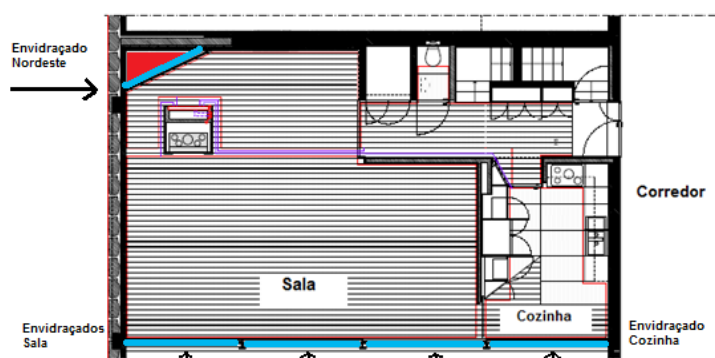


Fig.68 – Envidraçados do piso 0

Na Fig.69 é representado o envidraçado Nordeste que foi indicado na figura anterior. Este envidraçado separa a sala de um espaço exterior indicado a vermelho na figura.



Fig.69 – Envidraçado da sala situa a Nordeste

Na figura seguinte é apresentado o pormenor desse espaço exterior. Este espaço prolonga-se para a cave.



Fig.70 – Pormenor de espaço exterior – Entrada de luz na sala e cave

Não foi colocado qualquer tipo de dispositivo de sombreamento, durante o período em estudo, logo não foram considerados na simulação.

A moradia em estudo contém diversas clarabóias de geometrias rectangulares e triangulares na cobertura que podem ser visualizadas na Fig.71.

A figura seguinte ilustra uma clarabóia de geometria triangular e outra rectangular.



Fig.71 – Clarabóia triangular e rectangular

4.4. INTRODUÇÃO DOS DADOS NO ENERGY PLUS

Neste ponto vai-se proceder a um resumo com a descrição dos dados mais relevantes introduzidos no programa EnergyPlus e explicação de certas opções tomadas.

4.4.1. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO [10]

A localização do edifício é definida no grupo *Building*. Neste grupo foi definido o norte do edifício com um ângulo de 30 graus em relação ao norte real. Foi escolhida a tipologia *city* (cidade) e a distribuição solar foi definida como *FullInteriorAndExterior* (descrita no capítulo 2).

4.4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO [10]

No campo *Run Period* definiu-se o tempo de simulação que decorreu de 28 de Setembro de 2009 a 10 de Dezembro de 2009.

4.4.3. DEFINIÇÃO DE MATERIAIS OPACOS [10]

Neste grupo foram definidos os materiais.

Foi adoptada a rugosidade *Rough* para todos os materiais opacos (Grupo *Material*).

Foram introduzidos os valores de espessura (e), condutibilidade térmica (λ), densidade (ρ), calor específico (C_p) e resistência térmica (R).

As construções dos elementos opacos são definidas no grupo *Construction*.

4.4.4. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS (GRUPO WINDOWMATERIAL:SIMPLEGLAZINGSYSTEM) [10]

Neste grupo são definidos os envidraçados verticais (janelas) e horizontais (clarabóias), introduzindo os valores de coeficiente de transmissão térmica, a transmissão luminosa e o factor solar. Tal como nos materiais opacos os envidraçados são construídos no grupo *Construction*.

4.4.5. DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS (GRUPO ZONE) [10]

Neste grupo é necessário definir as zonas térmicas do edifício. Deve ser criada uma zona térmica sempre que haja uma diferença de materiais ou de condições fronteira.

Foram definidas três zonas térmicas.

O piso 0 foi definido como zona térmica 1.

O piso 0 e 1 diferem na constituição das paredes, logo, foi criada a zona térmica 2 que corresponde ao piso 1.

O quarto 5 do piso 1 foi definido como zona térmica 3, uma vez que se encontra sobre o corredor de acesso às moradias.

As figuras seguintes indicam a definição das zonas térmicas.

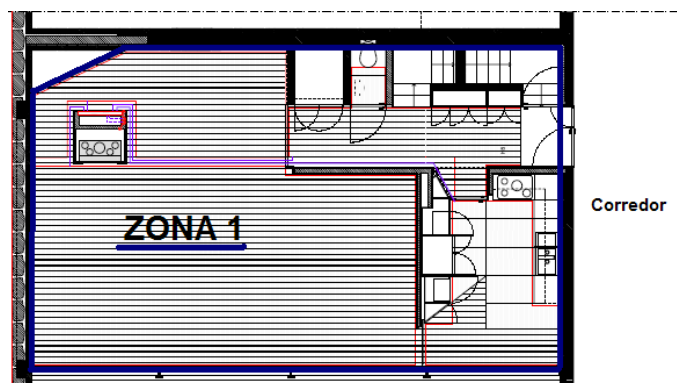


Fig.72 – Zona térmica 1 [10]

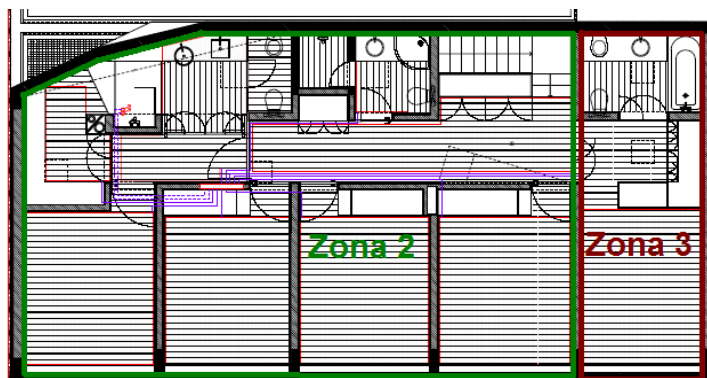


Fig.73 – Zonas térmicas 2 e 3 [10]

4.4.6. DEFINIÇÃO DA VENTILAÇÃO (GRUPO ZONEVENTILATION) [10]

Este grupo é preenchido quando se pretende um fluxo de ar para ventilação de forma não mecânica.

Foi definido um valor de 0,8 renovações por hora para cada uma das zonas térmicas, de forma natural.

A ventilação é realizada através de pequenas aberturas situadas acima dos envidraçados dos quartos e através de aberturas de saída de ar nas instalações sanitárias. Como durante o período de simulação a habitação estava em fase de acabamentos, as aberturas ainda não possuíam grelhas.

A figura seguinte mostra uma abertura de ventilação situada por cima do envidraçado de um quarto.



Fig.74 – Abertura para ventilação natural

4.5. MEDIÇÕES “IN SITU”

4.5.1 DESCRIÇÃO DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO

Foram colocados sensores medidores de temperatura e humidade relativa de forma a poder validar/comparar a simulação efectuada pelo EnergyPlus.

Foram utilizados sensores de modelo HOBO [10]. Estes sensores permitem caracterizar o ambiente de uma zona térmica e/ou o exterior da habitação. A figura seguinte mostra um dos sensores colocados:



Fig.75 – Sensor HOBO

4.5.2 COLOCAÇÃO DOS SENSORES

Colocaram-se vários sensores, distribuídos pela habitação, em pontos estratégicos e a meia altura da parede, como demonstram as figuras seguintes.

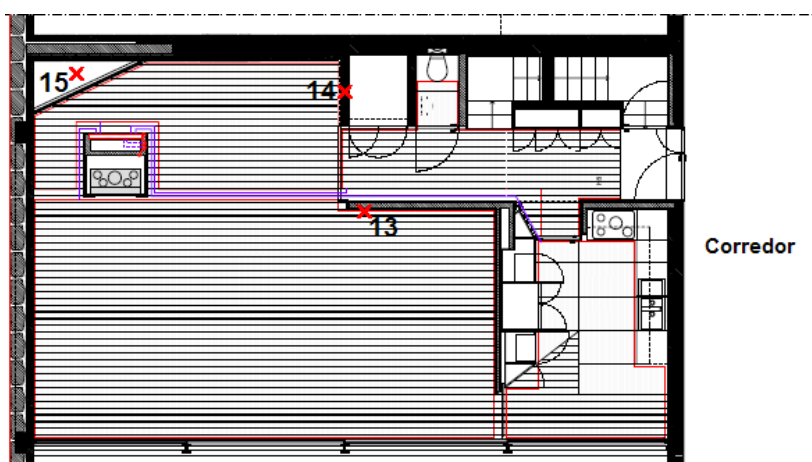


Fig.76 – Colocação dos sensores no piso 0 – zona térmica 1 [10]

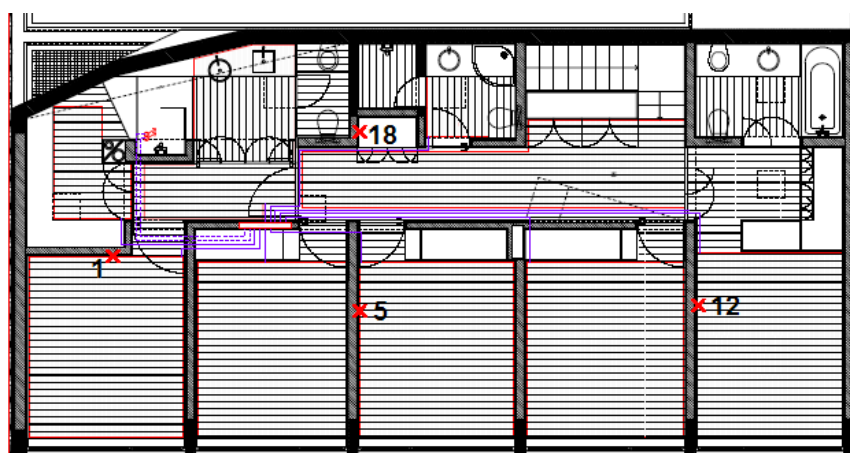


Fig.77 – Colocação dos sensores no piso 1 – zonas térmicas 1 e 2 [10]



Fig.78 – Colocação do sensor 5 no piso 1

A colocação dos sensores deve ser efectuada de modo a evitar a exposição solar directa pelos envidraçados e clarabóias e deve ser realizada em paredes interiores, uma vez que, se estiverem em contacto com paredes exteriores as medições podem ser afectadas devido a radiação solar e temperatura exterior.

Não foram colocados sensores no hall de entrada, devido ao facto de a habitação não ter portas durante o período de medições, sendo a entrada da habitação fechada temporariamente por elemento de contraplacado. Como a habitação estava em fase de construção a entrada estava muitas vezes desprotegida o que provocava correntes de ar no hall.

O sensor 14 foi colocado fora do hall afixado numa parede interior. O sensor 13 foi colocado na sala, numa parede interior (Fig.76). Os sensores 13 e 14 mediram a temperatura interior.

O sensor 12 foi colocado no quarto 5 (piso 1, zona 3), na parede interior de separação das zonas 2 e 3, evitando a o envidraçado e a clarabóia (Fig.77). O sensor 12 mediu a temperatura interior.

Na zona 2, piso 1, foram colocados três sensores (Fig.77). O sensor 1 foi colocado no quarto 1, numa parede interior sem exposição solar. O sensor 5 foi colocado no quarto 3 (quarto intermédio), numa parede interior. O sensor 18 foi colocado no corredor do piso, numa parede interior e fora do alcance da exposição solar das clarabóias existentes no corredor. O sensor mediu a temperatura e humidade relativa e os sensores 5 e 18 mediram apenas a temperatura.

Foi colocado um sensor (15) no exterior da habitação (Fig.76 e Fig.79). O sensor 15 mediu a temperatura e humidade relativa exteriores.



Fig.79 – Colocação do sensor 15 no exterior

4.6. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos sensores. O período de medição decorreu desde 28 de Setembro de 2009 a 10 de Dezembro de 2009.

Os resultados das medições exteriores, temperatura e humidade relativa, foram comparados com os resultados do TMY do Porto e da estação meteorológica do LFC-FEUP no capítulo 3.

Os resultados dos sensores interiores, representativos das três zonas, serão comparados com os resultados da simulação no próximo subcapítulo e com novas simulações no capítulo 6.

Em seguida, são apresentados os resultados das medições para as três zonas térmicas e para o exterior.

4.6.1. RESULTADOS DOS SENSORES DA ZONA 1 (PISO 0)

A Fig.80 mostra os resultados de temperatura obtidos pelos sensores 13 e 14, instalados no piso 0, ou seja, na zona térmica 1.

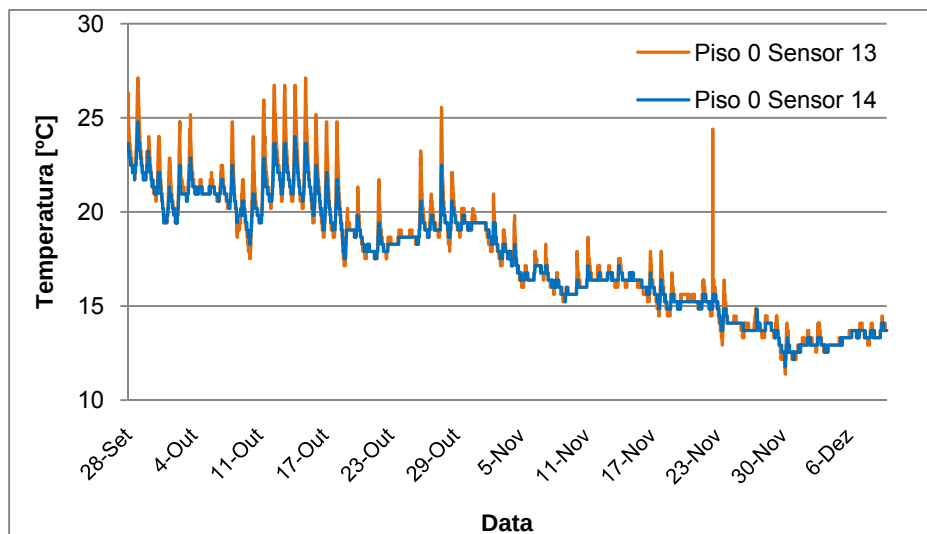


Fig.80 – Temperatura do piso 0 medida pelos sensores

Observa-se que os sensores tiveram medições semelhantes. O sensor 13 apresenta, no entanto, “picos” (valores máximos) em relação ao sensor 14. Isto pode ser explicado pela localização do sensor 13 ser mais próxima dos envidraçados, logo as medições são mais influenciadas pela radiação solar, o que provoca temperaturas mais elevadas.

A temperatura é mais alta no início e vai diminuindo ao longo do tempo, como seria de esperar dado que a temperatura exterior e a radiação solar também diminuem nesse período.

Para se proceder à comparação com os resultados das simulações, decidiu-se calcular o valor da média dos sensores. Desta forma torna-se mais fácil e mais perceptível a comparação (Fig.81).

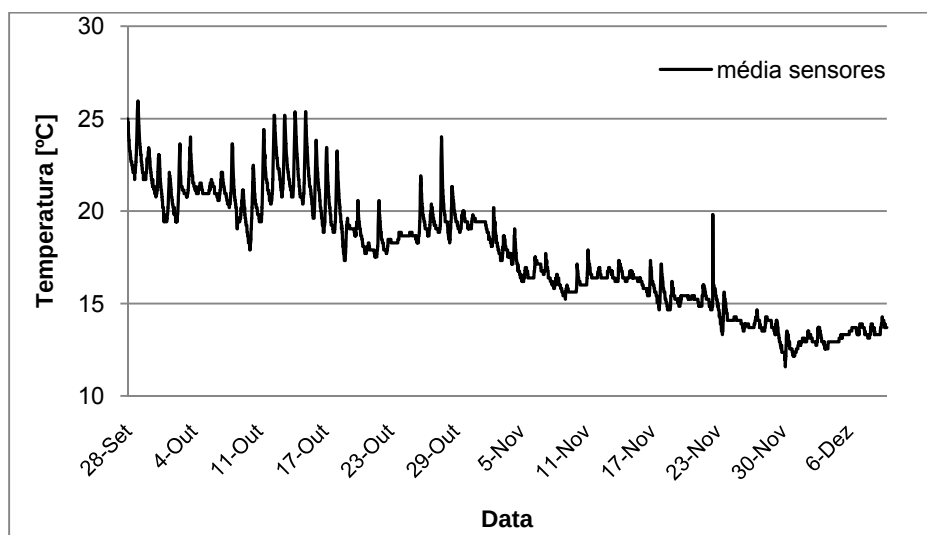


Fig.81 – Temperatura média dos sensores do piso 0

4.6.2. RESULTADOS DOS SENSORES DA ZONA 2 (PISO 1)

A Fig.82 mostra os resultados de temperatura obtidos pelos sensores 1,5 e 8 instalados no piso 1, zona térmica 2.

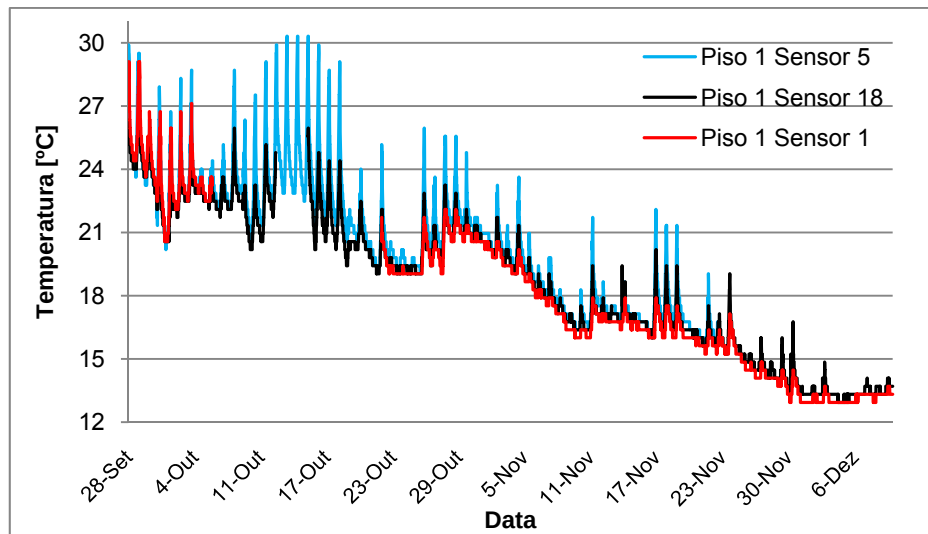


Fig.82 – Temperatura da zona 2 medida pelos sensores

Observa-se que os sensores apresentam uma variação semelhante, das medições, ao longo do tempo:

- Os valores de temperatura descem ao longo do período, como seria de esperar;
- O sensor 5 apresentou valores superiores, o que pode ser explicado pelo facto de estar colocado mais próximo dos envidraçados, recebendo maior quantidade de radiação;
- O sensor 1 estava colocado mais afastado dos envidraçados, num quarto extremo, logo mais frio que o intermédio devido a trocas térmicas com o exterior;
- O sensor 18 estava localizado no corredor, sem influência de radiação solar, situando-se portanto num local com menor temperatura;
- O sensor 5 deixou de efectuar medições no dia 23 de Novembro, devido a problema técnico;
- O sensor 1 parou no dia 6 de Outubro sendo reiniciado a 22 de Outubro;
- O sensor 18 parou no dia 12 de Outubro e foi reiniciado no dia 15 do mesmo mês.

A figura seguinte apresenta a média das medições dos três sensores.

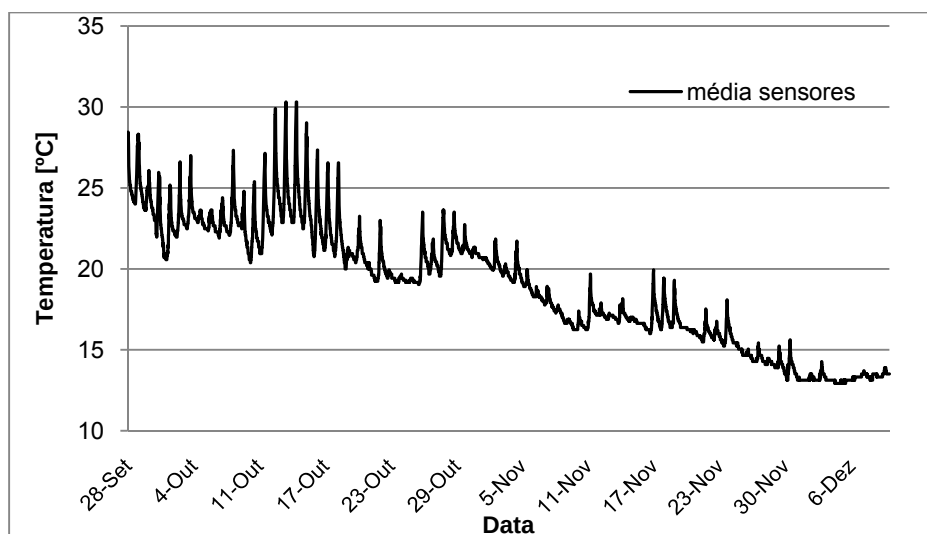


Fig.83 – Temperatura média dos sensores da zona 2

A figura seguinte apresenta os valores de Humidade Relativa medidos pelo sensor 1:

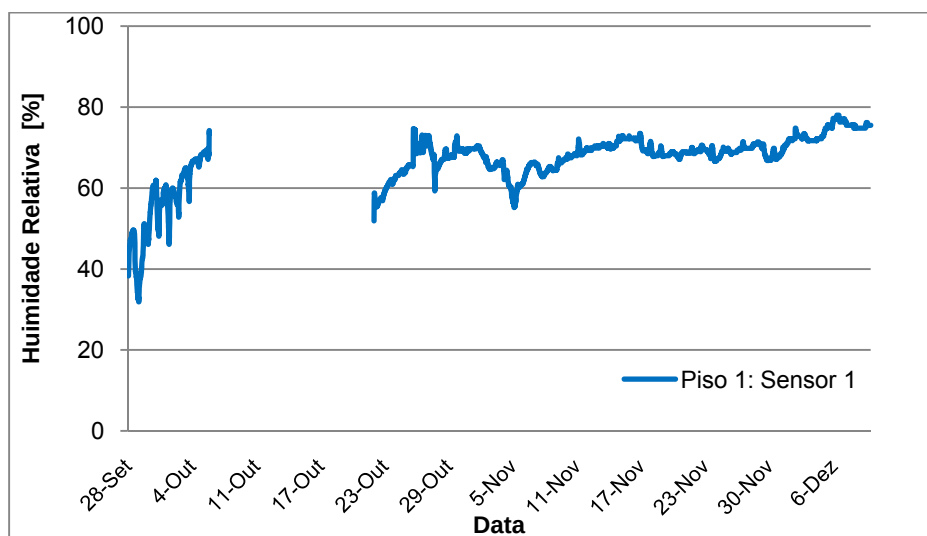


Fig.84 – Humidade Relativa medida pelo sensor 1

O sensor 1 foi o único da zona térmica 2 a medir a humidade relativa. O sensor teve uma paragem como referido anteriormente.

A humidade relativa foi aumentando à medida que diminuía a temperatura.

4.6.3. RESULTADOS DOS SENSORES DA ZONA 3 (QUARTO 5 – PISO 1)

A Fig.85 mostra os resultados de temperatura obtidos pelo sensor 12 instalados no piso 1, zona térmica 3.

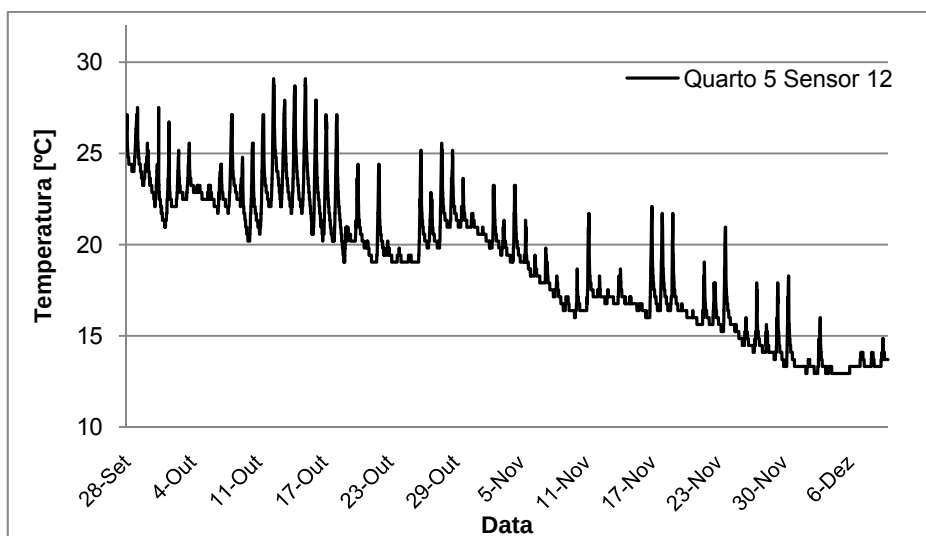


Fig.85 – Temperatura da zona térmica 3 (quarto 5 – piso1)

Observa-se que a temperatura diminui ao longo do período.

O desenvolvimento da temperatura do quarto 5 é semelhante ao do quarto intermédio. Na figura seguinte comparam-se as duas medições.

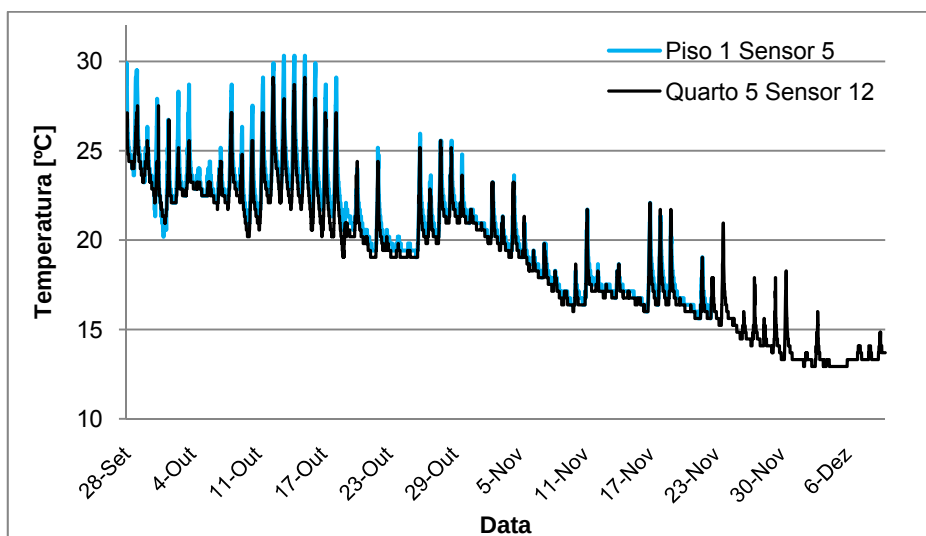


Fig.86 – Temperatura do quarto 5 e do quarto intermédio (sensor 5)

O quarto 5 apresenta valores ligeiramente inferiores devido ao facto de ser um quarto extremo, logo a temperatura é mais baixa devido a trocas térmicas com o exterior.

A Fig.87 apresenta as medições de sensores para as três zonas térmicas.

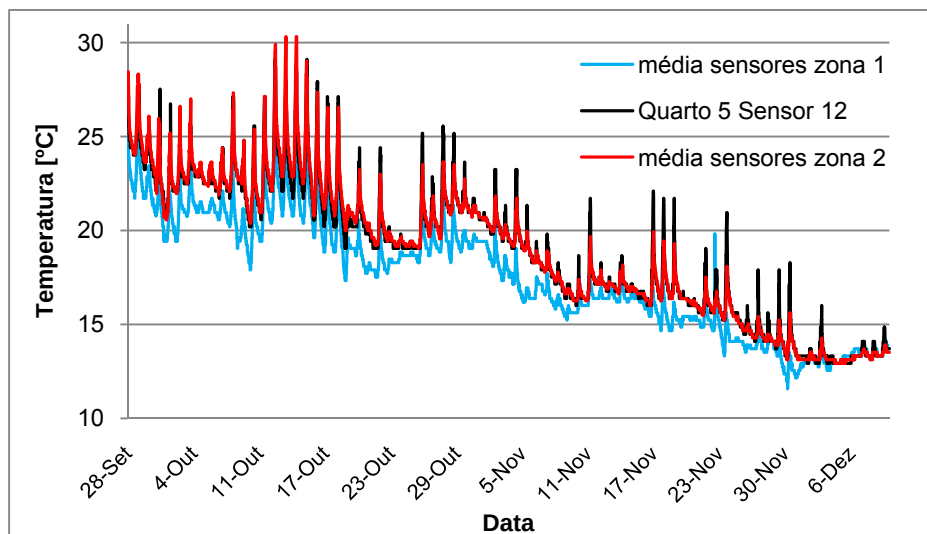


Fig.87 – Temperatura das três zonas térmicas

Observa-se que a zona térmica 1 (piso 0) é a que regista menores temperaturas. Isto, pode ser explicado pelo facto de a zona térmica 1 ser sombreada por outro edifício e pelo muro, logo recebe menor quantidade de radiação solar, o que provoca menor temperatura.

4.6.4. RESULTADOS DO SENSOR EXTERIOR

O sensor exterior (sensor 15) efectuou medições exteriores de temperatura e humidade relativa. Estes dois parâmetros climáticos já foram comparados com o TMY do Porto e a estação do LFC-FEUP, no capítulo 3.

A figura seguinte mostra os resultados de temperatura obtidos pelo sensor 15, instalado no exterior.

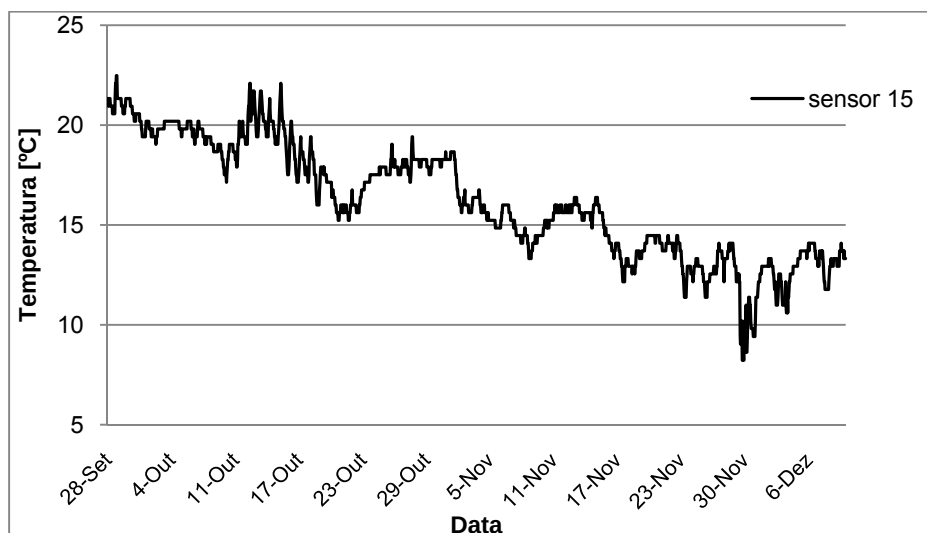


Fig.88 – Temperatura exterior medida pelo sensor 15

A temperatura desce ao longo do tempo, como seria de esperar.

A figura seguinte mostra os resultados de Humidade Relativa obtidos pelo sensor 15, instalado no exterior.

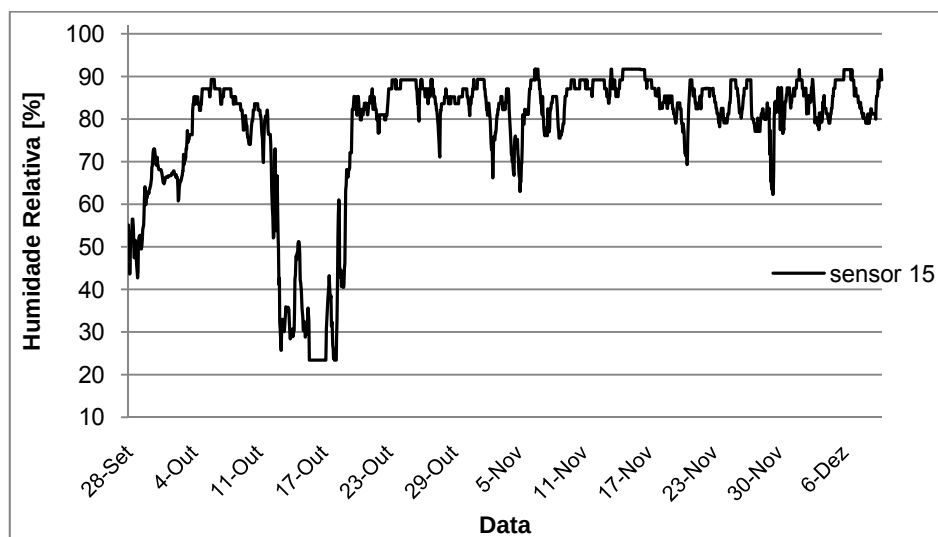


Fig.89 – Humidade Relativa exterior medida pelo sensor 15

Os valores de medição de humidade relativa apresentam uma grande diminuição no período de 10 a 20 de Outubro.

O final de Outubro e início de Novembro foi a época de início de chuvas.

4.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Neste subcapítulo são apresentados os resultados das simulações e a comparação com as medições “In Situ”.

4.7.1. MODELO GEOMÉTRICO

O programa cria um ficheiro CAD, em três dimensões, através das coordenadas introduzidas pelo utilizador (Fig.90 e Fig.91).

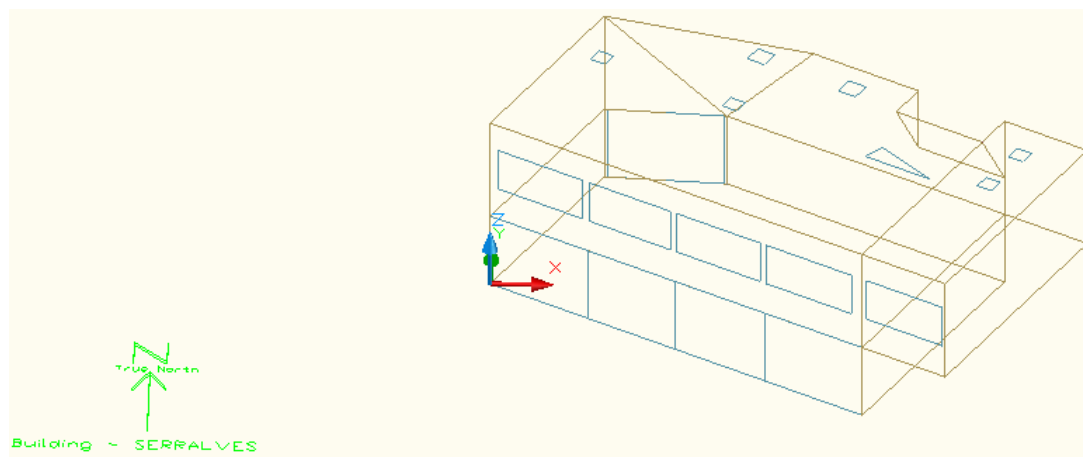


Fig.90 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Sudoeste

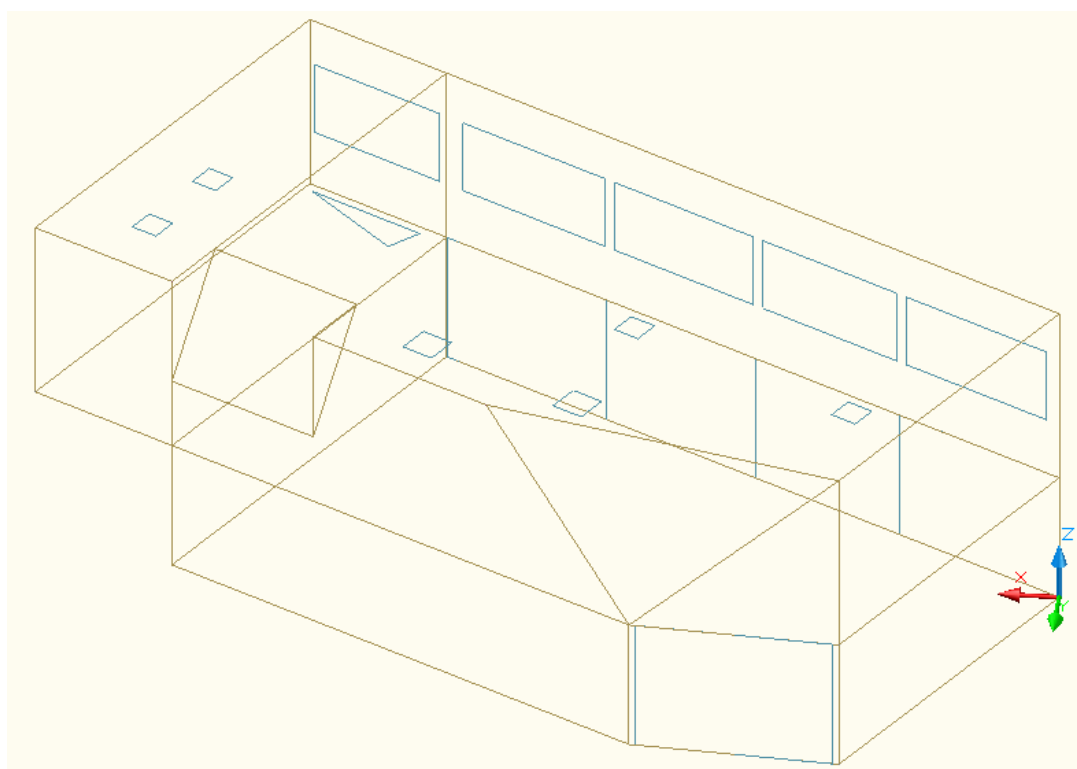


Fig.91 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Nordeste

4.7.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A figura seguinte apresenta os resultados da simulação para as três zonas térmicas.

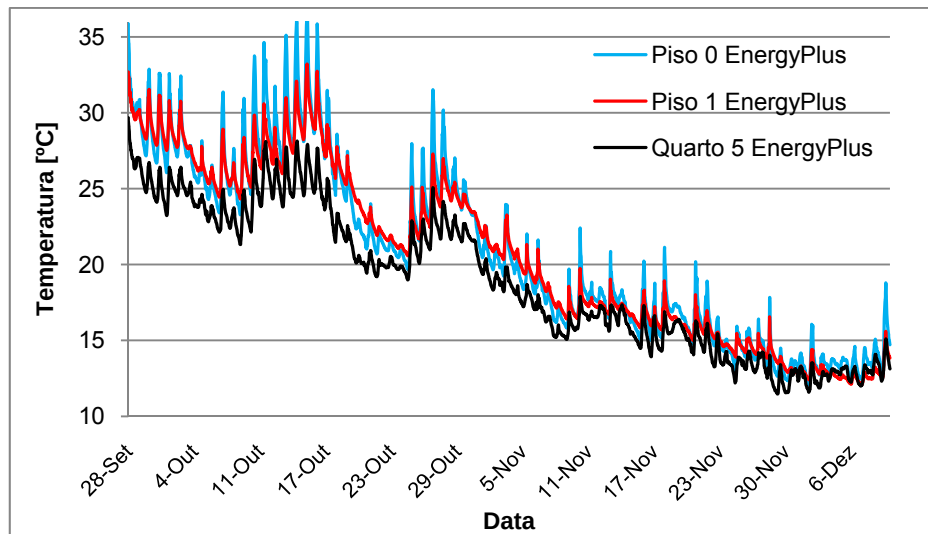


Fig.92 – Temperatura das três zonas térmicas, obtida pela simulação do EnergyPlus

Observa-se que as três curvas apresentam uma evolução semelhante. A temperatura apresenta uma tendência de diminuição ao longo do período. As três curvas aproximam-se, sensivelmente, a partir de Novembro.

Os resultados da simulação apresentam valores mais elevados de temperatura para o piso 0 (zona térmica 1). Isto deve-se, provavelmente, ao facto de a zona térmica 1 ser a que apresenta maior área de envidraçados, logo, maior quantidade de radiação solar.

Os valores da zona térmica 2 são superiores aos da zona térmica 3, o que pode ser explicado pela maior área de envidraçados da zona 2.

4.7.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Neste subcapítulo vai-se proceder à comparação entre as medições e a simulação para as três zonas.

4.7.3.1 Simulação Vs Medição (Piso 0)

A figura seguinte apresenta a comparação, entre a simulação e a média das medições dos sensores, da zona térmica 1.

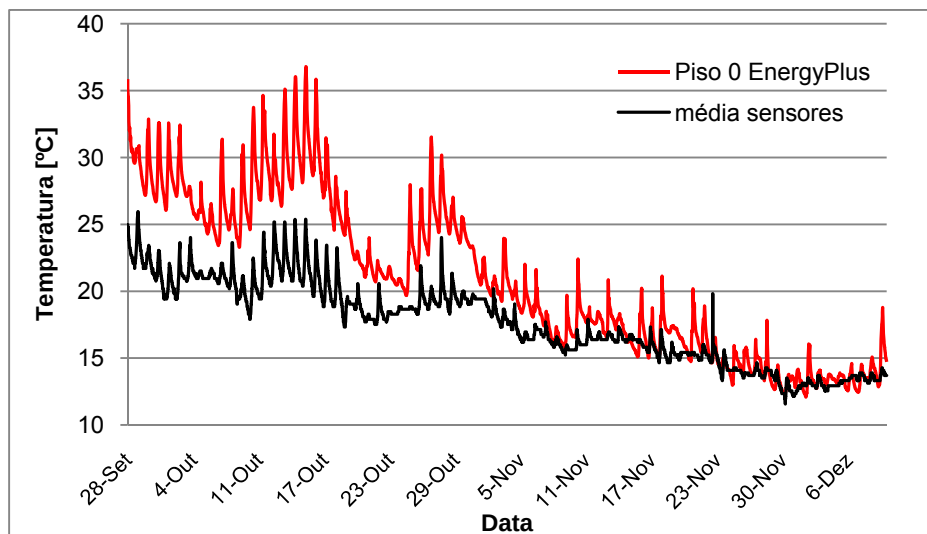


Fig.93 – Comparação de temperatura da simulação e da média dos sensores – Piso 0

Observa-se que a simulação apresenta resultados mais elevados, que a média dos sensores, no primeiro período (período quente). No segundo período (período frio) as duas curvas aproximam-se.

A simulação apresenta resultados mais elevados no período 1, o que se deve à maior quantidade de radiação incidente neste período.

O piso 0 era sombreado por outra moradia. É também de salientar que como a habitação em estudo estava em construção, os vidros apresentavam sujidade. Estes dois pontos não foram considerados na simulação (devido à sua complexidade) o que explica o facto de a simulação apresentar temperaturas maiores que os valores medidos.

No segundo período a quantidade de radiação é mais baixa, logo tem menos influência na simulação, sendo por isso que as duas curvas tendem a aproximar-se.

A Fig.94 apresenta as frequências acumuladas da temperatura do piso 0.

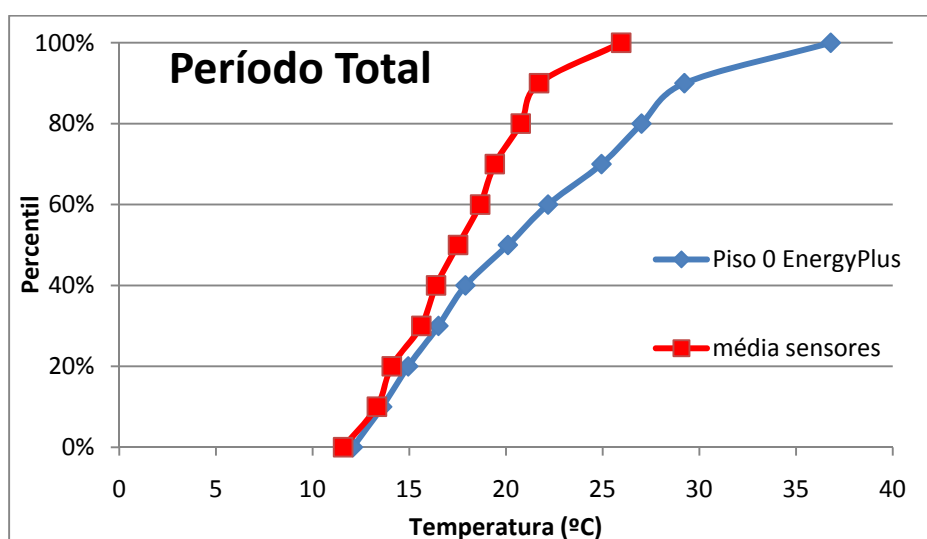


Fig.94 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 0

Através da figura anterior, conclui-se que os máximos de temperatura são maiores no caso da simulação. Nos valores mínimos de temperatura a simulação aproxima-se das medições.

4.7.3.2 Simulação Vs Medição (Piso 1)

A figura seguinte apresenta a comparação, entre a simulação e a média das medições dos sensores, do piso 1 (zona térmica 2).

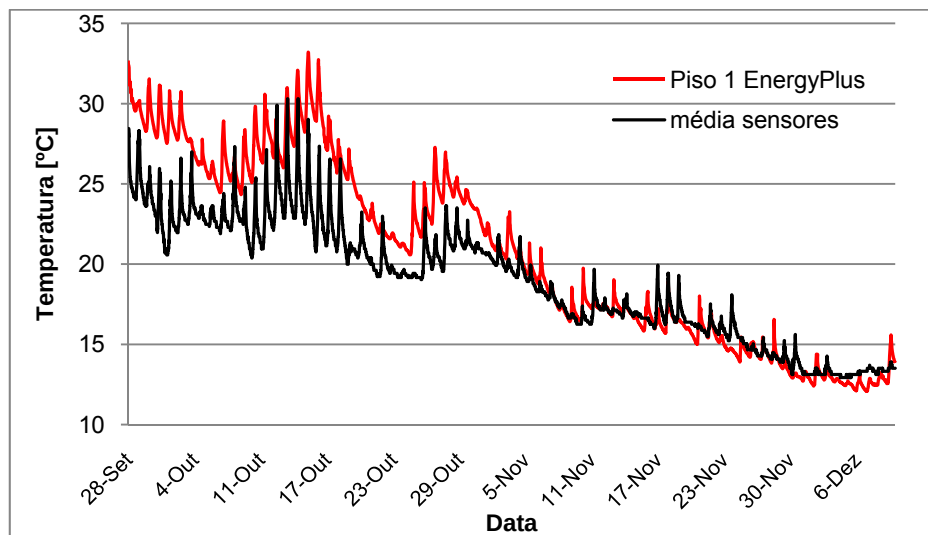


Fig.95 – Comparação de temperatura da simulação e da média dos sensores – Piso 1

Observa-se que os valores de temperatura simulados são superiores aos medidos, no período 1. No período 2 as duas curvas aproximam-se, sendo que, a simulação apresenta temperaturas ligeiramente inferiores. Tal como no caso do piso 0, este facto deve-se à maior quantidade de radiação no período 1 e à sujidade dos envidraçados verticais e horizontais (clarabóias).

A figura seguinte apresenta as frequências acumuladas da temperatura do piso 1.

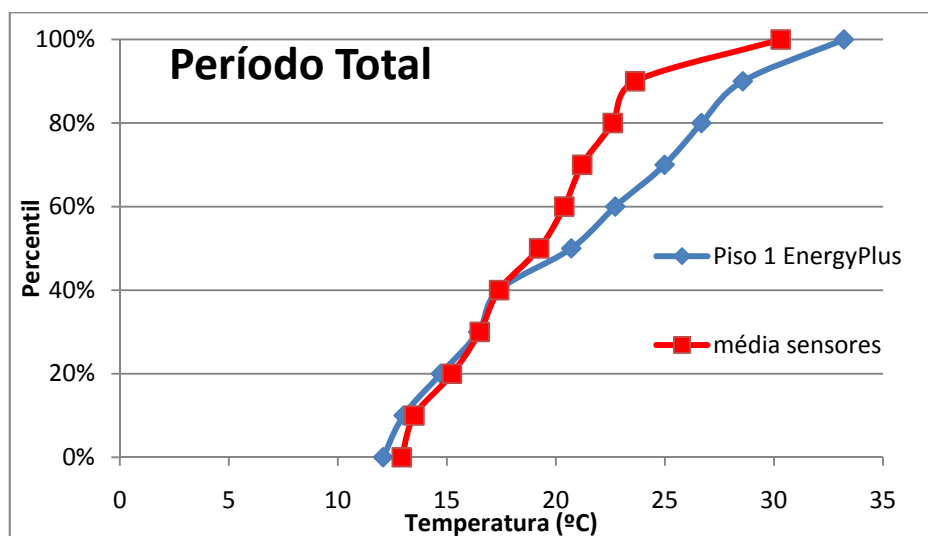


Fig.96 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 1

Observando a figura anterior, conclui-se que a simulação apresenta valores máximos superiores às medições e valores mínimos muito aproximados.

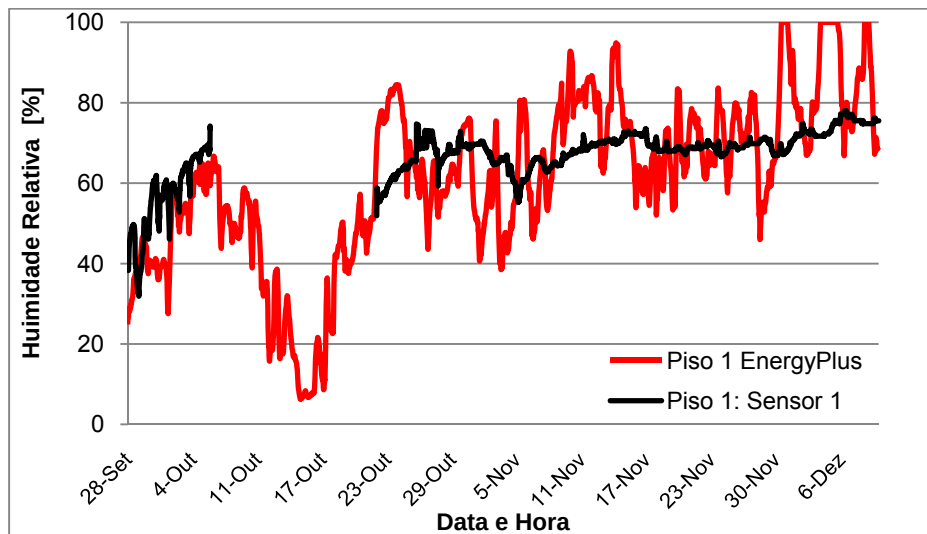


Fig.97 – Comparação de humidade relativa da simulação e do sensor 1 – Piso 1

4.7.3.3 Simulação Vs Medição (Quarto 5)

A figura seguinte apresenta a comparação, entre a simulação e a média das medições dos sensores, do quarto 5 (zona térmica 3).

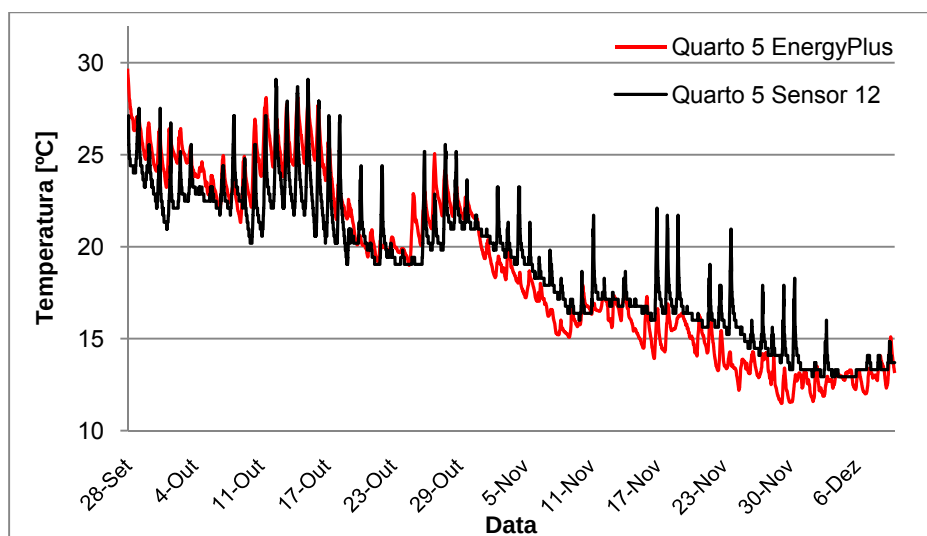


Fig.98 – Comparação de temperatura da simulação e do sensor 12 – Quarto 5

Observa-se que as duas curvas apresentam um desenvolvimento semelhante.

Os valores de temperatura da simulação aproximam-se bastante dos valores medidos pelo sensor.

A simulação apresenta valores ligeiramente inferiores aos medidos, no período 2.

A figura seguinte apresenta as frequências acumuladas da temperatura do quarto 5.

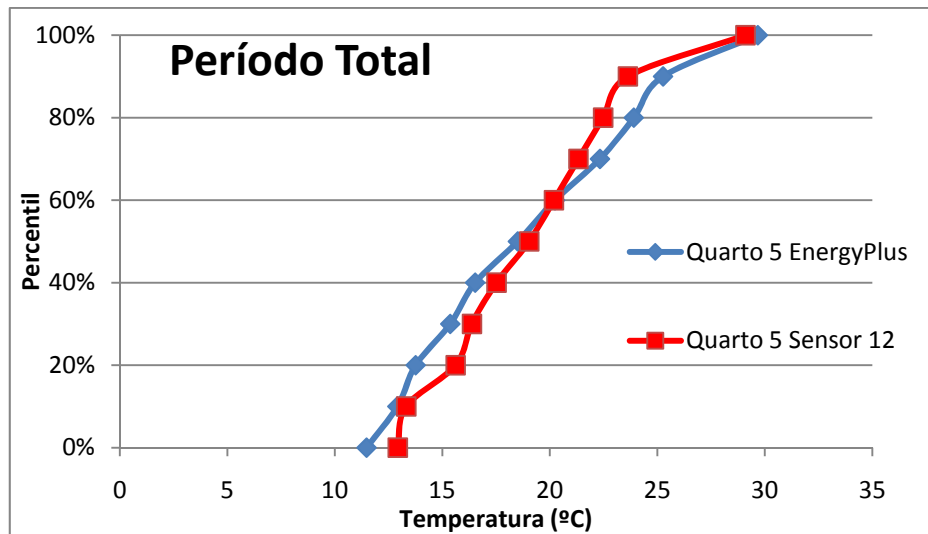


Fig.99 – Frequências acumuladas da temperatura para o quarto 5

Pela observação da figura anterior, conclui-se que a simulação apresenta valores máximos ligeiramente superiores aos medidos e valores mínimos ligeiramente inferiores aos medidos.

5

ESTUDO DE SENSIBILIDADE -
CLIMA EXTERIOR

5.1. SIMULAÇÕES

Para aproximar os resultados da simulação com os valores reais, medidos pelos sensores, e para descobrir o efeito que cada parâmetro climático tem na simulação procedeu-se à alteração dos valores presentes no ficheiro climático e realizaram-se novas simulações.

5.1.1. DIMINUIÇÃO DE TEMPERATURA DO FICHEIRO CLIMÁTICO

O primeiro parâmetro a ser alterado foi a temperatura. Começou por se reduzir um grau a todos os valores de temperatura presentes no ficheiro climático. Procedendo à simulação com estes novos valores, observou-se um ligeiro decréscimo na temperatura da habitação. Seguidamente procedeu-se a novas simulações em que se diminuiu a temperatura em mais graus (-2°C, -3°C, -4°C e -5°C).

5.1.1.1. Zona 1

A figura seguinte apresenta os valores da simulação original do EnergyPlus, as novas simulações e a média dos sensores para a zona 1 (Piso 0).

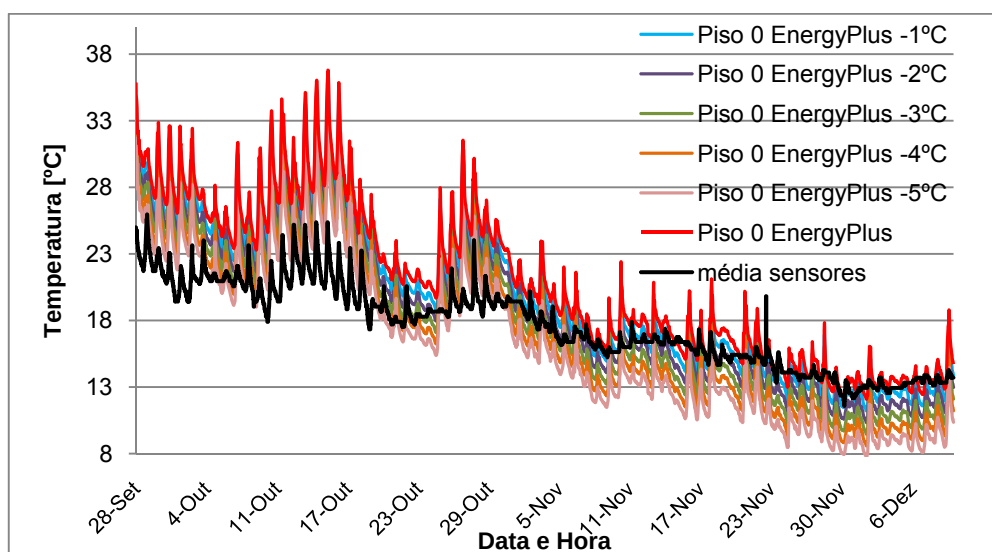


Fig.100 – Temperatura da zona 1 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático

Observa-se que a diminuição dos valores de temperatura do ficheiro climático provoca a diminuição de temperatura na zona ao longo de todo o período. Para ser mais perceptível apresenta-se, na figura seguinte, apenas a simulação original, a simulação -5°C e a média da medição dos sensores.

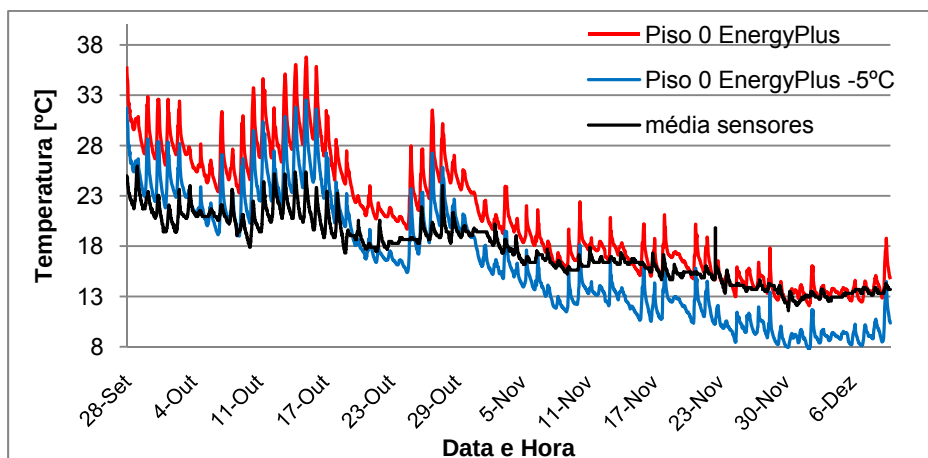


Fig.101 – Temperatura da zona 1 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático

É possível verificar que a simulação aproxima-se da média dos valores medidos pelos sensores no primeiro período (período quente) e afasta-se dos valores medidos no segundo período (período frio).

Para ser mais facilmente perceptível o efeito das novas simulações apresenta-se, na figura seguinte, o gráfico das frequências acumuladas.

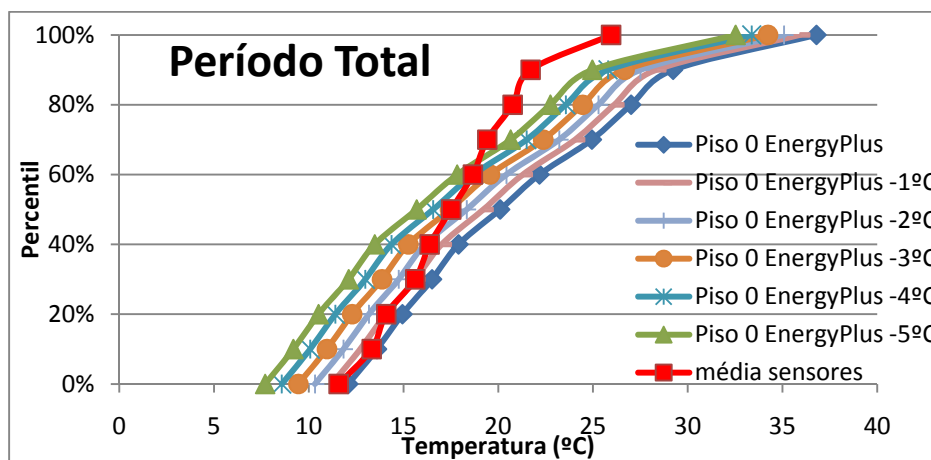


Fig.102 – Frequências acumuladas – Zona 1

É perceptível que as simulações se aproximam dos sensores para os valores de percentil mais altos, ou seja, para os maiores valores de temperatura e afastam-se para os valores de percentil mais baixos, ou seja, para os valores mais baixos de temperatura. Os valores mais altos acontecem no período 1 enquanto os mais baixos acontecem no período 2, como se pode observar na Fig.100. Então, os valores das simulações convergem para o período 1 e divergem para o período 2.

A Fig.103 mostra a diferença entre as várias simulações e o sensor, para os valores de média, percentil de 90 e percentil de 10 para o período total. Verifica-se que, para a diferença das médias ser aproximadamente zero é necessário reduzir 4°C (simulação -4°C) aos valores de temperatura do

ficheiro climático. No caso do percentil de 90 mesmo na simulação -5°C a diferença para o sensor ainda é de 3,26, enquanto para o percentil de 10 a diferença estava próximo de zero na simulação original. A média e o P90 estão a convergir com as novas simulações e o P10 está a divergir.

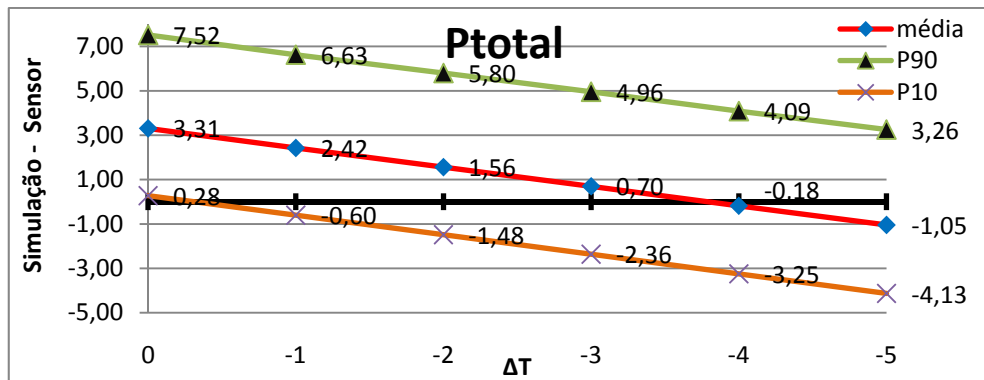


Fig.103 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total–Zona1

A Fig.104 mostra a diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor para o período 1. Verifica-se que com a diminuição da temperatura do ficheiro climático, os valores das diferenças de média, P90 e P10 também estão a diminuir, ou seja, os valores das simulações estão a aproximar-se dos valores do sensor. A diferença de P10 é aproximadamente zero para a simulação -4°C . A diferença das médias na simulação -5°C é de $1,73^{\circ}\text{C}$ e a diferença de P90 é de 4,08, valor bastante elevado.

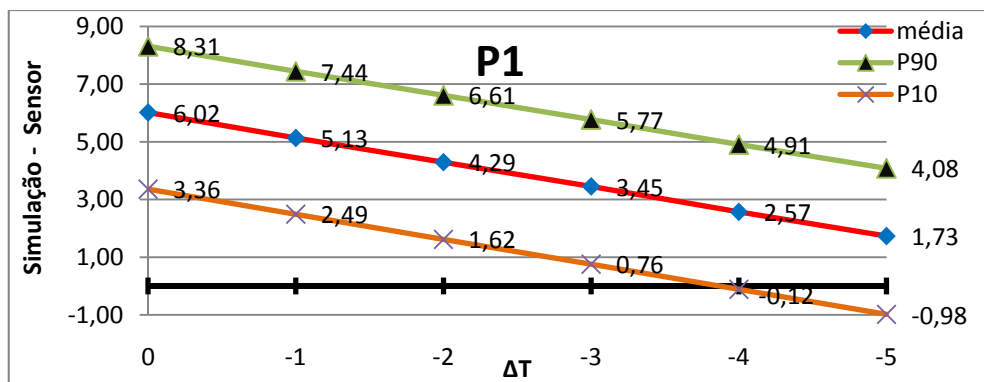


Fig.104–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 1

A Fig.105 mostra a diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor para o período 2. Verifica-se que os valores de diferença de P10 já estão próximo de zero logo na simulação original, divergindo então, com as simulações seguintes. A diferença das médias atinge, aproximadamente, o valor zero na simulação -1°C sendo que diverge com as seguintes simulações. A diferença de P90 converge até à simulação -3°C em que toma um valor próximo de zero, divergindo com as seguintes.

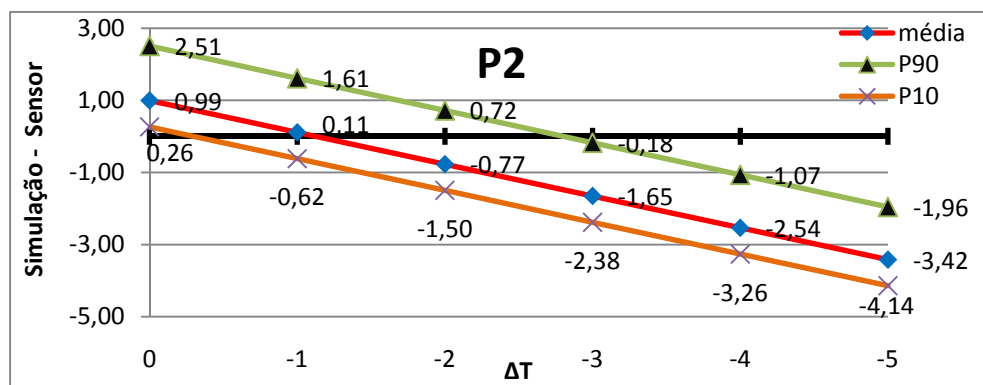


Fig.105–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 1

É possível então, descortinar que com as simulações de decréscimo de temperatura do ficheiro climático os valores de temperatura da zona aproximam-se dos valores dos sensores para o período 1, mas afastam-se gradualmente para o período 2.

Procedeu-se ainda a simulações em que se diminui os “picos”, ou seja, os máximos de temperatura para descobrir o seu efeito. Para a primeira simulação definiu-se o valor de 25°C como sendo o máximo das temperaturas do ficheiro climático e numa segunda simulação este valor foi definido como 22°C. A Fig.106 mostra as frequências acumuladas para estas duas simulações.

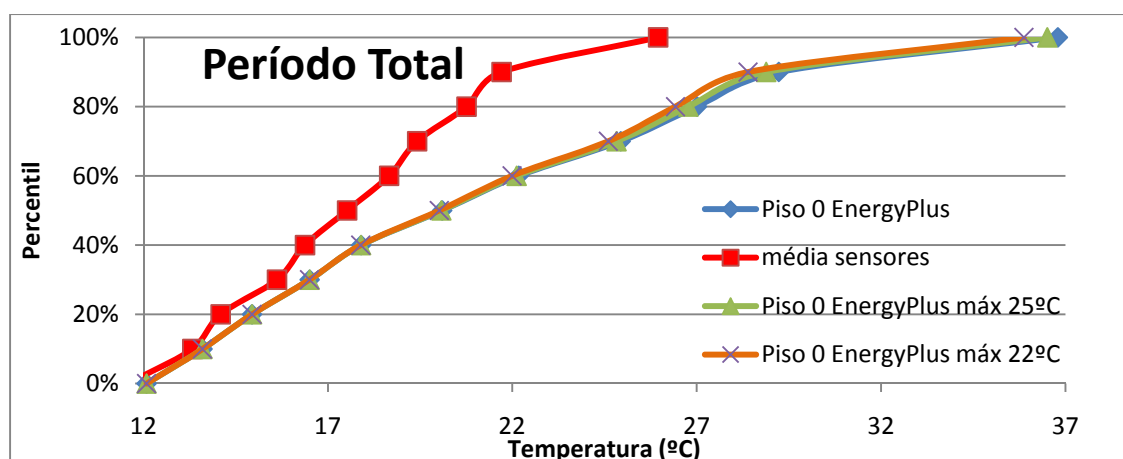


Fig.106 – Frequências acumuladas – Zona 1 – diminuição dos máximos de temperatura

É possível verificar que estas duas simulações tiveram um efeito pouco relevante uma vez que, a diminuição de temperatura foi muito baixa.

5.1.1.2. Zona 2

A Fig.107 apresenta os valores da simulação original do EnergyPlus, as novas simulações e a média dos sensores para a zona 2 (Piso 1).

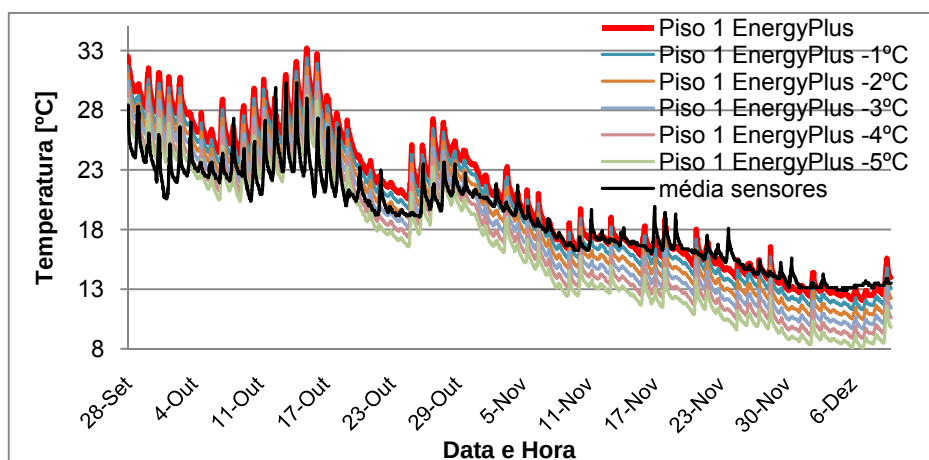


Fig.107 – Temperatura da zona 2 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático

Tal como para a zona 1, observa-se que, a diminuição dos valores de temperatura do ficheiro climático provoca a diminuição de temperatura na zona ao longo de todo o período.

A Fig.108 ilustra as frequências acumuladas da zona 2, para o período total. As simulações aproximam-se do sensor para os percentis mais elevados e afastam-se para os percentis mais baixos.

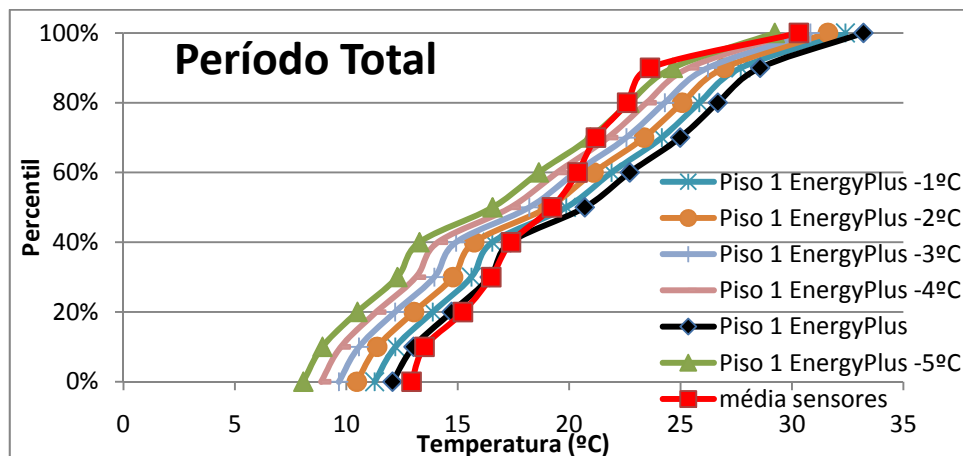


Fig.108 – Frequências acumuladas – Zona 2

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.109), período 1 (Fig.110) e período 2 (Fig.111).

Para o período total verifica-se que, para o P90 há uma convergência com os valores do sensor à medida que se vai diminuindo a temperatura do ficheiro climático. A média converge até à simulação -2°C e em seguida diverge. O P10 diverge ao longo das simulações.

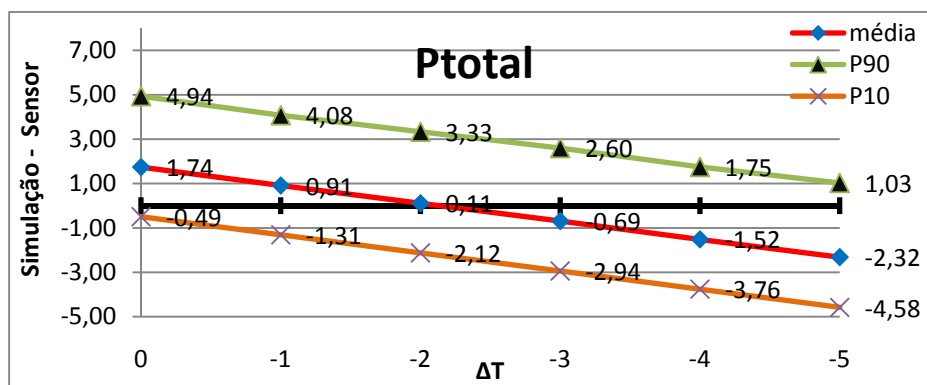


Fig.109 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona2

Observando o período 1 vê-se uma clara convergência dos valores das simulações com o sensor. A média converge apresentando o melhor valor para a simulação -5°C tal como o P90. O P10 aproxima-se na simulação -3°C e em seguida começa a divergir.

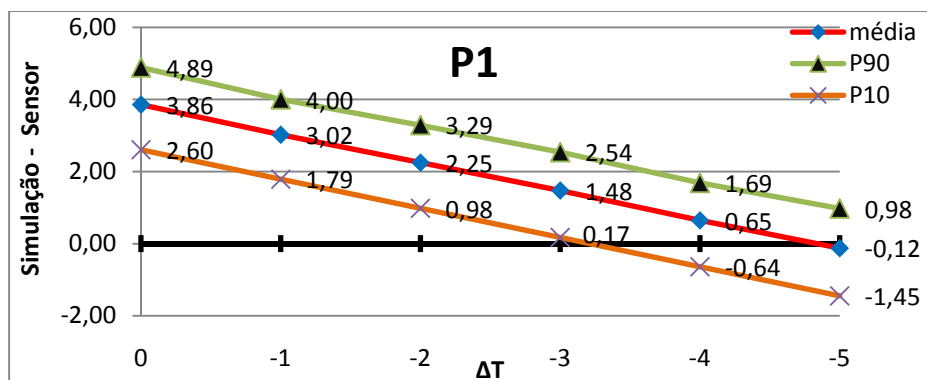


Fig.110–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 2

Para o período 2 nota-se uma clara divergência entre os valores das simulações e o sensor. Quanto mais se diminui a temperatura do ficheiro climático mais os valores se afastam dos valores do sensor.

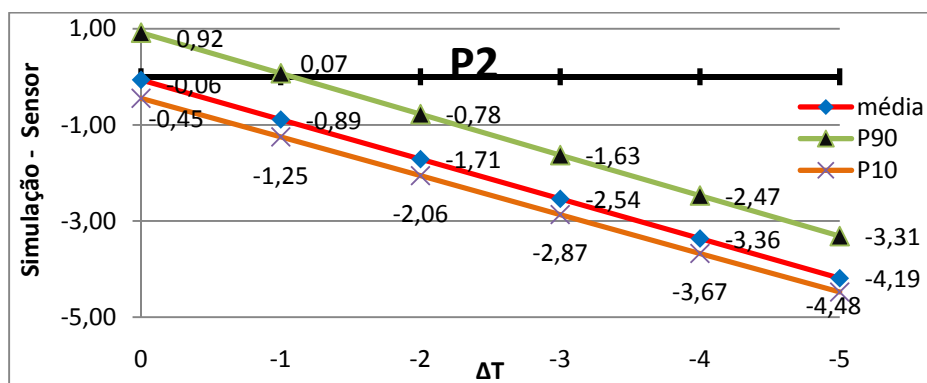


Fig.111–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 2

5.1.1.3. Zona 3

A Fig.112 apresenta os valores da simulação original do EnergyPlus, as novas simulações e a média dos sensores para a zona 3 (Quarto 5 – Piso 1). À medida que se vão diminuindo os valores de temperatura do ficheiro climático diminuem os valores de temperatura da zona e afastam-se dos valores do sensor.

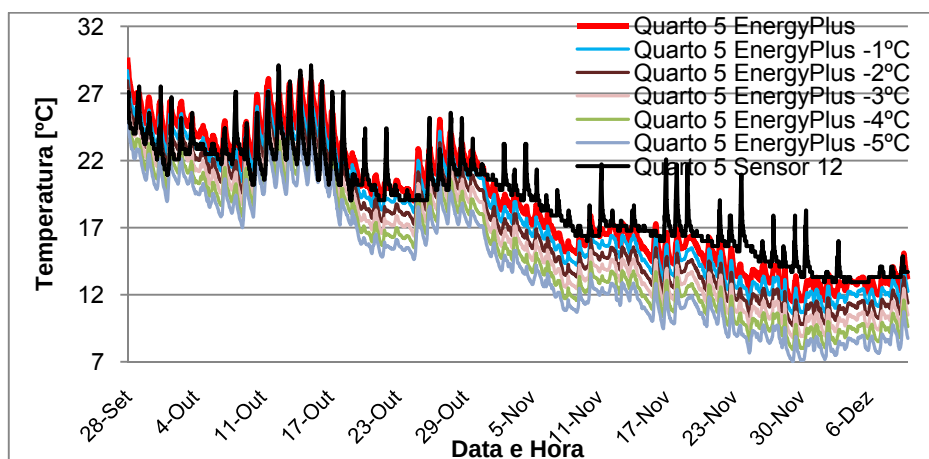


Fig. 112–Temperatura da zona 3 – Diminuição de temperatura no ficheiro climático

A Fig.113 ilustra as frequências acumuladas da zona 3, para o período total. Para os percentis mais elevados a simulação -2°C aproxima-se dos valores do sensor, sendo que as simulações seguintes se afastam. Para os percentis mais baixos os valores da simulação original são mais baixos que os do sensor e as simulações seguintes afastam-se ainda mais.

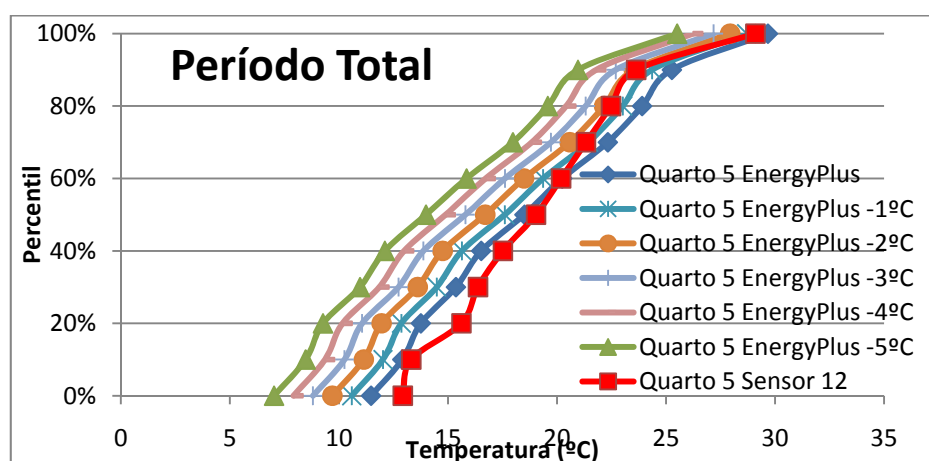


Fig.113 – Frequências acumuladas – Zona 3

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.114), período 1 (Fig.115) e período 2 (Fig.116).

No caso do período total (Fig.114), o P90 converge para a simulação -2°C divergindo nas seguintes. A média e o P10 estão próximo dos valores do sensor para a simulação base sendo que, todas as simulações seguintes divergem dos valores do sensor.

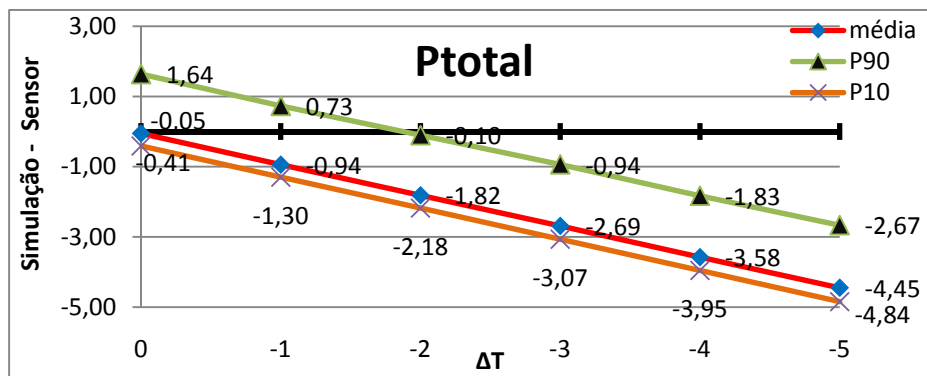


Fig. 114– Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona3

Considerando o período 1 observa-se que, o P90 e a média convergem, aproximadamente, na simulação -2°C divergindo nas simulações seguintes e o P10 converge para a simulação -1°C, divergindo nas seguintes.

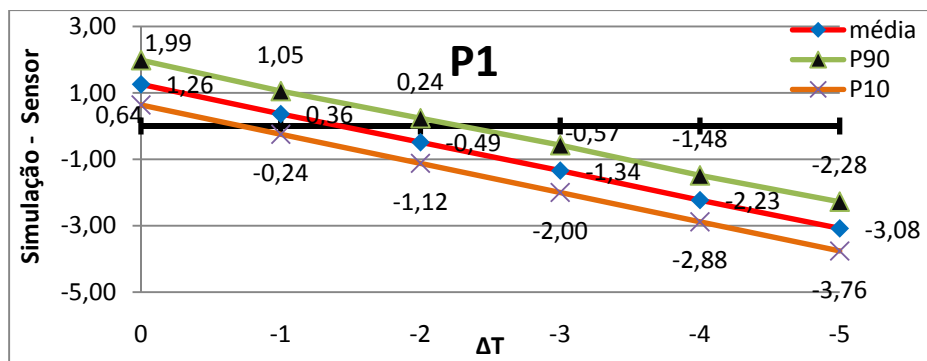


Fig. 115–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 3

No caso do período 2 observa-se que os valores divergem claramente, com as novas simulações, dos valores do sensor.

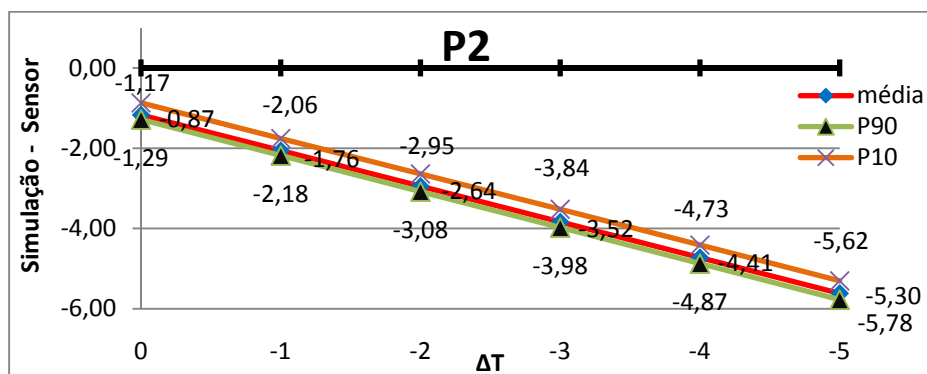


Fig. 116–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 3

O quadro 24 apresenta a diferença de média, P90 e P10, entre as simulações e o sensor, para as três zonas.

Quadro 24 – Diferença, entre as várias simulações e o sensor, de Média, P90 e P10 para as três zonas

Zona	Período		Simulações					
			0°C	-1°C	-2°C	-3°C	-4°C	-5°C
Zona 1	Ptotal	Média	3.31	2.42	1.56	0.70	-0.18	-1.05
		P90	7.52	6.63	5.80	4.96	4.09	3.26
		P10	0.28	-0.60	-1.48	-2.36	-3.25	-4.13
	P1	Média	6.02	5.13	4.29	3.45	2.57	1.73
		P90	8.31	7.44	6.61	5.77	4.91	4.08
		P10	3.36	2.49	1.62	0.76	-0.12	-0.98
	P2	Média	0.99	0.11	-0.77	-1.65	-2.54	-3.42
		P90	2.51	1.61	0.72	-0.18	-1.07	-1.96
		P10	0.26	-0.62	-1.50	-2.38	-3.26	-4.14
Zona 2	Ptotal	Média	1.74	0.91	0.11	-0.69	-1.52	-2.32
		P90	4.94	4.08	3.33	2.60	1.75	1.03
		P10	-0.49	-1.31	-2.12	-2.94	-3.76	-4.58
	P1	Média	3.86	3.02	2.25	1.48	0.65	-0.12
		P90	4.89	4.00	3.29	2.54	1.69	0.98
		P10	2.60	1.79	0.98	0.17	-0.64	-1.45
	P2	Média	-0.06	-0.89	-1.71	-2.54	-3.36	-4.19
		P90	0.92	0.07	-0.78	-1.63	-2.47	-3.31
		P10	-0.45	-1.25	-2.06	-2.87	-3.67	-4.48
Zona 3	Ptotal	Média	-0.05	-0.94	-1.82	-2.69	-3.58	-4.45
		P90	1.64	0.73	-0.10	-0.94	-1.83	-2.67
		P10	-0.41	-1.30	-2.18	-3.07	-3.95	-4.84
	P1	Média	1.26	0.36	-0.49	-1.34	-2.23	-3.08
		P90	1.99	1.05	0.24	-0.57	-1.48	-2.28
		P10	0.64	-0.24	-1.12	-2.00	-2.88	-3.76
	P2	Média	-1.17	-2.06	-2.95	-3.84	-4.73	-5.62
		P90	-1.29	-2.18	-3.08	-3.98	-4.87	-5.78
		P10	-0.87	-1.76	-2.64	-3.52	-4.41	-5.30

Os valores em que mais se aproximam as simulações do sensor foram realçados a cor. O valor da média foi realçado a laranja, o de P90 a vermelho e o de P10 a azul para ser mais perceptível em qual das simulações os valores se aproximam dos valores do sensor.

Determina-se que para P10 a maior parte dos valores convergentes acontecem logo na simulação inicial (simulação 0), a não ser para os casos do período 1 para as três zonas.

Os valores de P90 não chegam a convergir, no caso da zona 1, para o período total e período 1. No caso da zona 2, também não convergem mas aproximam-se mais em relação ao sensor que os da zona 1. Para a zona 3 convergem na simulação -2°C.

Os valores de P90 convergem, no período 2, na zona 1 na simulação -3°C. No mesmo período convergem no caso da zona 2 na simulação -1°C, enquanto no caso da zona 3 mesmo na simulação inicial a diferença para o sensor já é de -1,29°C.

No caso da média, considerando o período total, a zona 1 converge na simulação -4°C, a zona 2 na simulação -2°C e a zona 3 na simulação inicial.

No período 1, a média não chega a convergir no caso da zona 1, converge na simulação -5°C no caso da zona 2 e na simulação -1 na zona 3.

No período 2 a média converge na simulação -1°C para a zona 1 e na simulação inicial para a zona 2, enquanto na zona 3 o valor da simulação inicial é -1,17 divergindo nas simulações seguintes.

É possível concluir que a zona 1 é a que mais converge com a diminuição de temperatura do ficheiro climático, sendo que, ainda seria necessário uma maior diminuição de temperatura para fazer convergir a média e o P90 no período total e período 1. Para o caso do P10 tem tendência a divergir com a diminuição da temperatura a não ser no período 1.

A zona 2 converge com as simulações principalmente no caso de P90 para o período total e período 1 mas diverge para o período 2 e diverge em relação à média no período total e período 2.

A zona 3 converge no máximo na simulação -2°C divergindo nas restantes.

5.1.2. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO DIRECTA NORMAL NO FICHEIRO CLIMÁTICO

Procedeu-se à diminuição de radiação directa normal no ficheiro climático. Começou por se reduzir 20% da radiação directa normal. Observa-se que a temperatura da zona diminui principalmente no período 1, período quente, não sofrendo grande alteração no período 2. Procedeu-se seguidamente a mais simulações de redução de radiação directa normal (-30%, -40%, -50% e -60%).

5.1.2.1. Zona 1

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para a zona 1 no período total.

Observa-se que quanto mais se reduz a radiação directa normal mais se aproxima a temperatura simulada, da zona, com a medida pelos sensores.

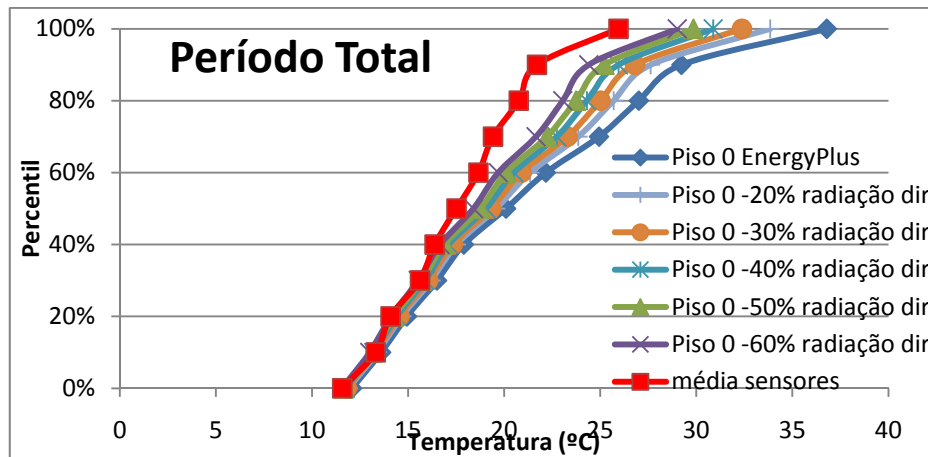


Fig.117 – Frequências acumuladas – Zona 1

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.118), período 1 (Fig.119) e período 2 (Fig.120).

No caso do período total (Fig.118), é possível verificar que a diferença entre o P10 das simulações e do sensor apresenta uma diminuição muito ligeira com a diminuição de radiação directa normal. O P90 diminui mas mesmo com uma redução de 60% da radiação apresenta uma diferença de valor igual a 2,70. A diferença de média diminui apresentando um valor de 0,98 para redução de 60% de radiação.

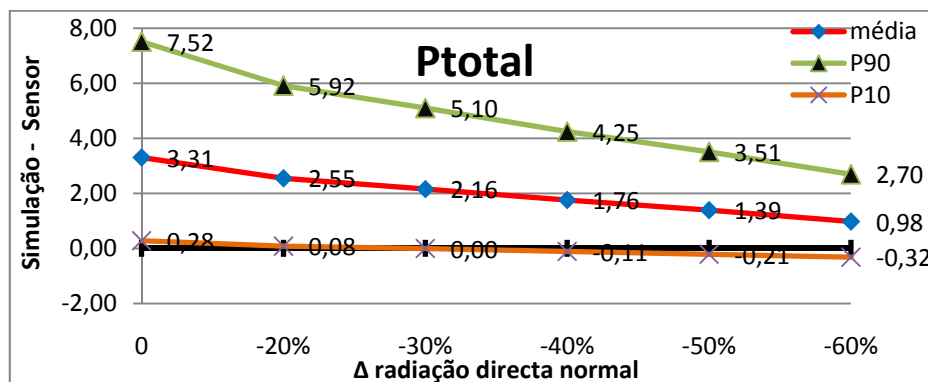


Fig.118 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona1

No caso do período 1 (Fig.119), a diferença de média, P90 e P10 diminui com a redução de radiação, não chegando a atingir o valor zero mesmo com uma redução de 60%, sendo o valor mais alto correspondente a P90 com 2,95.

No caso do período 2 (Fig.120), a diferença de média, P90 e P10 diminui com a redução de radiação. A média aproxima-se do valor do sensor na simulação -60%. O P90 vai convergindo, com a redução de radiação atingindo o valor de 0,87 para a simulação -60%. P10 converge com o sensor para a simulação -30% divergindo ligeiramente para as simulações seguintes.

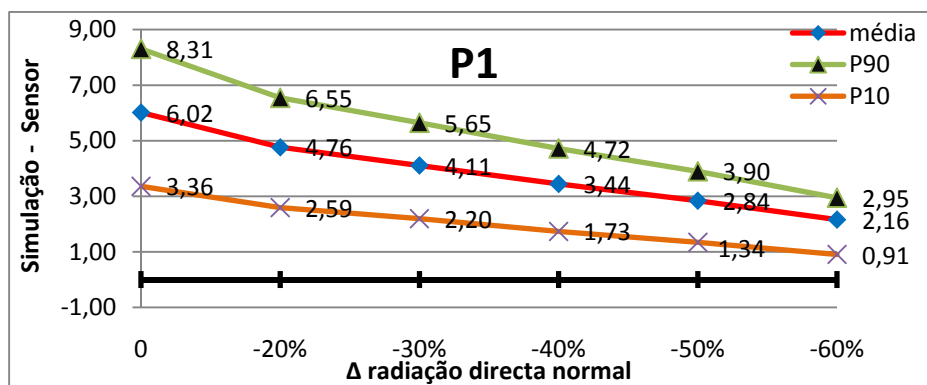


Fig.119 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 - Zona1

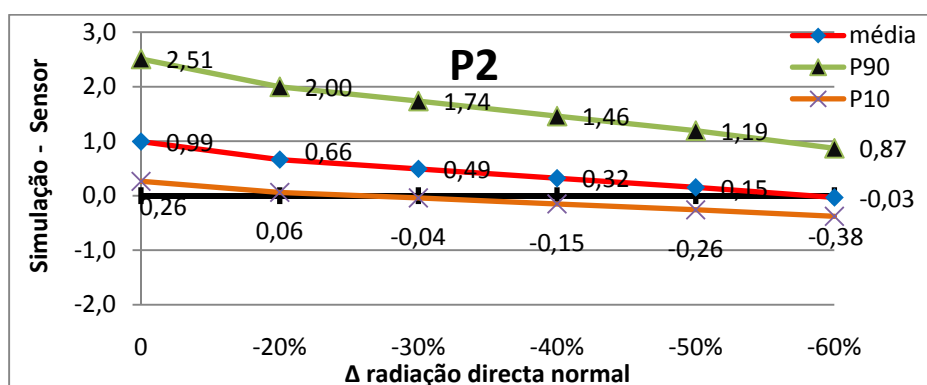


Fig.120 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 - Zona1

5.1.2.2. Zona 2

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico das frequências acumuladas para o período total, zona 2.

Observa-se que quanto mais se reduz a radiação directa normal mais se aproxima a temperatura simulada, da zona, com a medida pelos sensores para os percentis mais elevados. Para os percentis mais baixos a as simulações tendem a divergir do sensor.

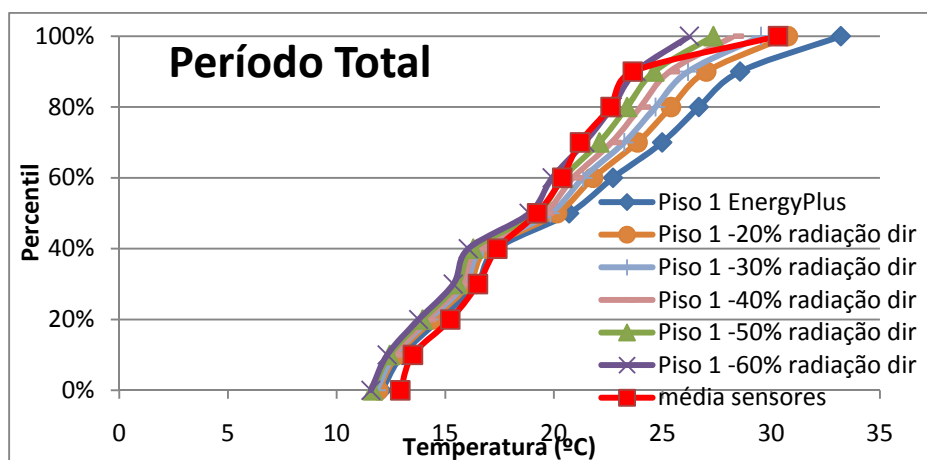


Fig.121 – Frequências acumuladas – Zona 2

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.122), período 1 (Fig.123) e período 2 (Fig.124).

Para o período total, verifica-se que, o percentil de 90 vai diminuindo e convergindo, com o do sensor, com as várias simulações, isto é, com a diminuição de radiação, atingindo um valor próximo do valor do sensor para a simulação -60%. A média também diminui e converge com o valor do sensor até à simulação -40% divergindo em seguida. O percentil de 10 apresenta um valor aproximado do valor do sensor para a simulação inicial, divergindo com as seguintes simulações. O decréscimo de P10 é menor que o de P90 e a média.

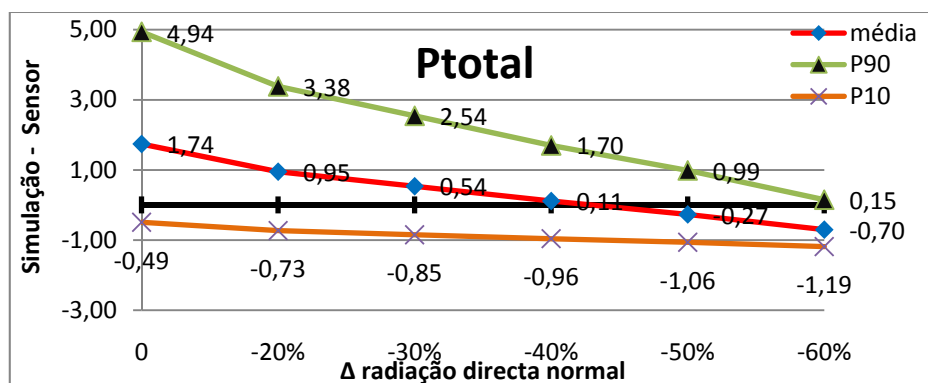


Fig.122 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona2

No caso do período 1, à medida que se diminui a radiação diminuem P90, P10 e a média, aproximando-se dos valores do sensor entre a simulação -50% e -60%.

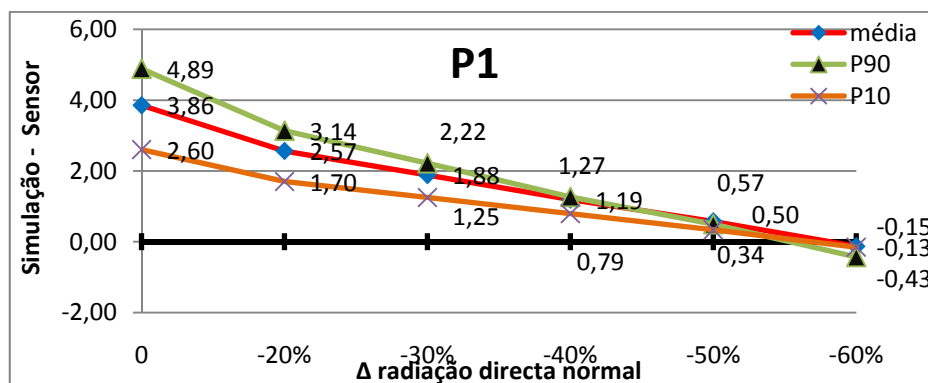


Fig.123–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 2

Observando o período 2, conclui-se que os valores da média e de P10 divergem dos valores do sensor com a diminuição de radiação directa normal. O valor de P90 aproxima-se do valor do sensor para a simulação -30% divergindo com as seguintes.

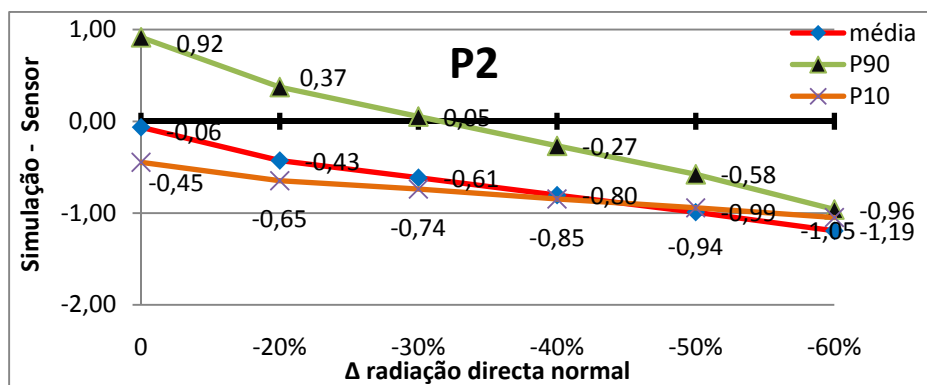


Fig.124–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 2

5.1.2.3. Zona 3

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico das frequências acumuladas para a zona 3 relativamente ao período total.

Observa-se que quanto mais se reduz a radiação directa normal mais se aproxima a temperatura simulada, da zona, com a medida pelos sensores para os percentis mais elevados. Para os percentis mais baixos as simulações tendem a divergir do sensor.

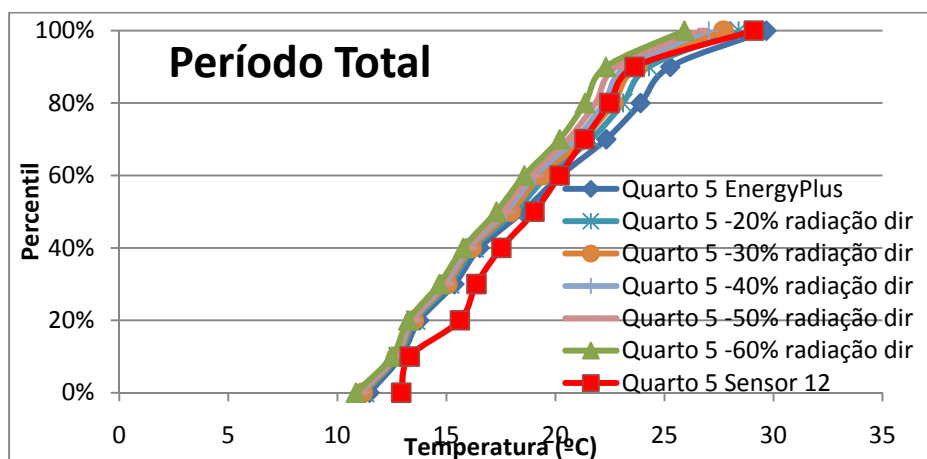


Fig.125 – Frequências acumuladas – Zona 3

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.126), período 1 (Fig.127) e período 2 (Fig.128).

Considerando o período total, verifica-se que, os valores de média e percentil de 90 da simulação original se encontram próximo dos valores do sensor, afastando-se com as restantes simulações. O percentil de 90 aproxima-se dos valores do sensor com a simulação -30%, afastando-se com as seguintes.

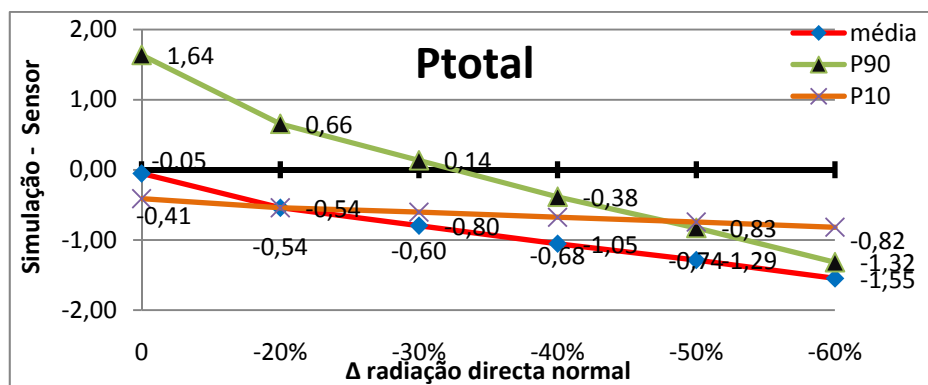


Fig.126– Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona3

No caso do período 1, a média converge, com o sensor, para a simulação -30%, P90 converge na simulação -40% e P10 converge para -20%, divergindo todos com as restantes simulações.

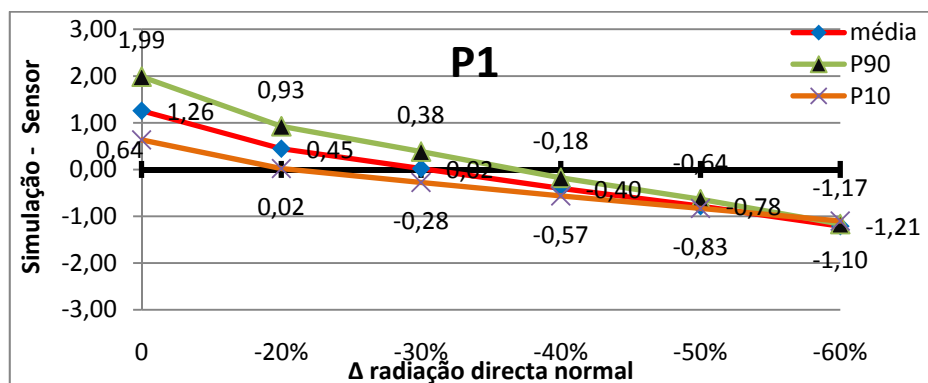


Fig.127–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 3

Observando o período 2 conclui-se que, a média, P90 e P10 se encontram mais perto dos valores do sensor no caso da simulação original, divergindo nas restantes simulações.

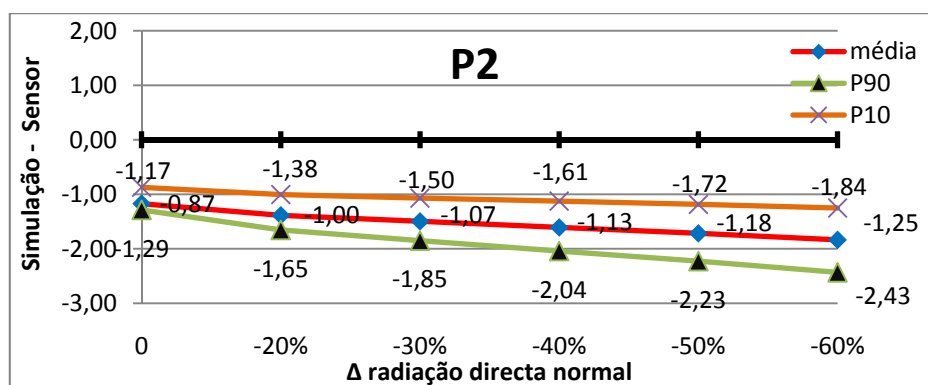


Fig.128–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 3

5.1.3. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO DIFUSA HORIZONTAL

Procedeu-se à diminuição de radiação difusa horizontal no ficheiro climático. Começou por se reduzir 20% da radiação difusa horizontal. Conclui-se que a temperatura da zona diminui, principalmente no período 1, período quente, não sofrendo grande alteração no período 2. Procedeu-se seguidamente a mais simulações de redução da radiação difusa horizontal (-30%, -40% -50% e -60%).

5.1.3.1. Zona 1

Na figura seguinte apresenta-se as frequências acumuladas para a zona 1 no período total.

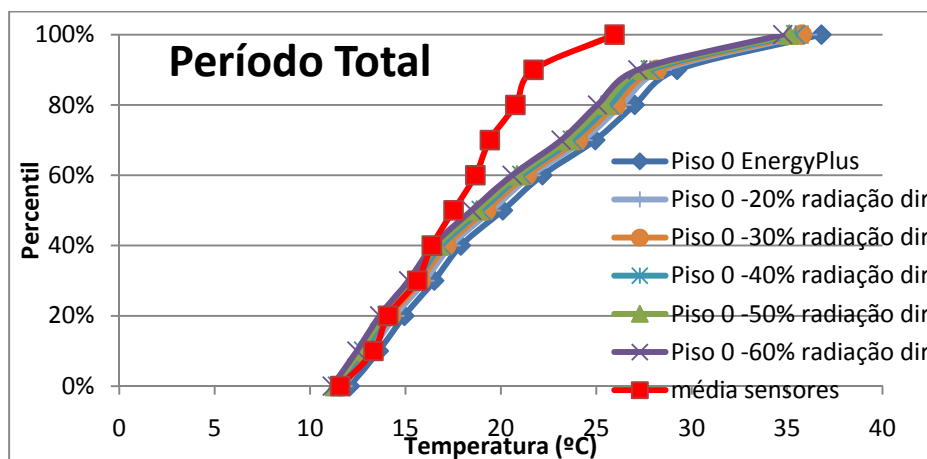


Fig.129 – Frequências acumuladas – Zona 1

Verifica-se um maior decréscimo de temperatura nos percentis mais elevados. Por outro lado, constata-se que, este decréscimo de temperatura é muito mais ligeiro que o verificado para o caso de diminuição de radiação directa normal.

Precisamente pelo facto de este conjunto de simulações conduzir a uma diminuição ligeira de temperatura, apresenta-se somente a figura relativa à diferença de médias, percentis de 90 e percentis de 10, entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.130), de modo a não tornar este capítulo demasiado extenso e de menor compreensão.

Constata-se que a diferença de médias, percentis de 90 e percentis de 10, entre as simulações e o sensor, diminui com a redução de radiação difusa horizontal.

Os valores de P10, da simulação original, estão próximo dos valores do sensor divergindo ligeiramente com as simulações seguintes.

A diferença dos percentis de 90 é bastante elevada, considerando a simulação inicial, apresentando um decréscimo com as seguintes simulações. Consta-se que mesmo com uma redução de 60% de radiação difusa horizontal a diferença dos percentis de 90 é superior a 5°C, ou seja, bastante elevada.

A diferença de médias também diminui ao longo das simulações.

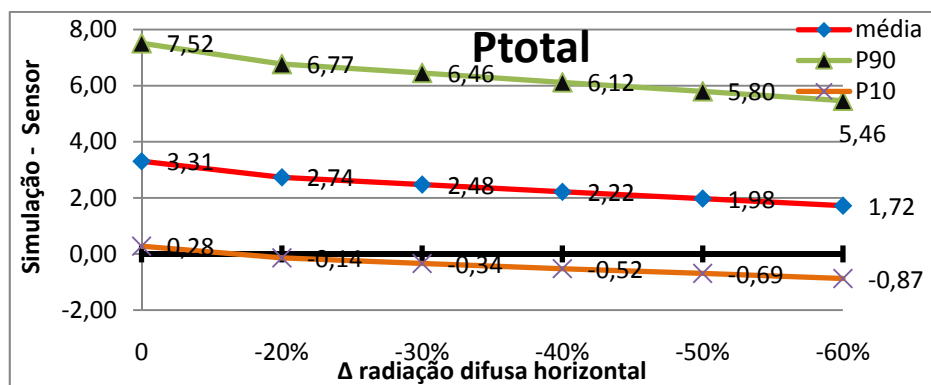


Fig.130– Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona1

5.1.3.2. Zona 2

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico das frequências acumuladas para o período total, zona 2.

Observa-se que quanto mais se reduz a radiação difusa horizontal mais se aproxima a temperatura simulada, da zona, com a medida pelos sensores, para os percentis mais elevados. Para os percentis mais baixos as simulações tendem a divergir do sensor.

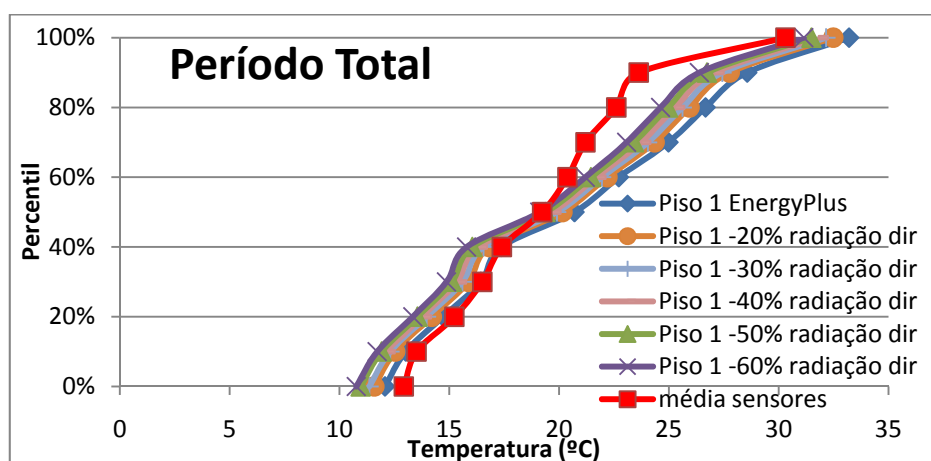


Fig.131 – Frequências acumuladas – Zona 2

A figura seguinte apresenta a diferença de médias, percentis de 90 e percentis de 10, entre as simulações e o sensor.

Considerando a simulação inicial e o sensor, constata-se que a diferença de percentis de 90 é elevada, a diferença de médias é menor e a diferença de percentis de 10 é ainda menor. Esta última é negativa, ou seja, os valores de percentil de 10 da simulação original são menores que os valores do sensor, ao contrário da média e percentil de 90.

Ao longo das simulações, os valores de percentil de 90 e de média aproximam-se dos valores do sensor, enquanto os valores de percentil de 10 afastam-se.

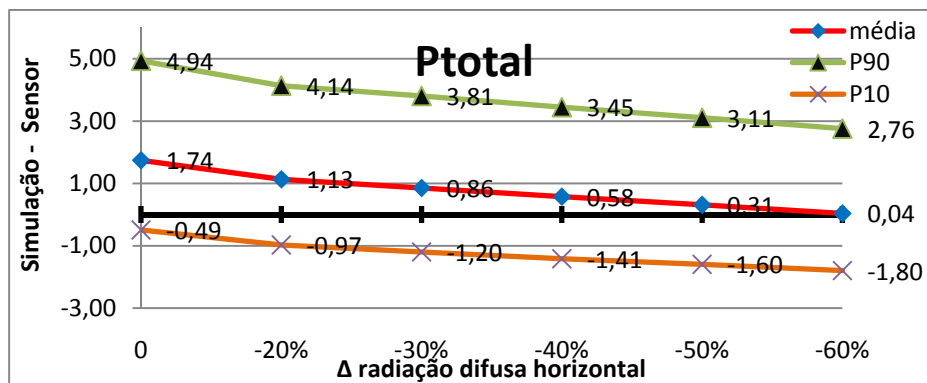


Fig.132 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona2

5.1.3.3. Zona 3

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para o período total, zona 3.

As simulações aproximam-se dos valores do sensor para os percentis mais elevados e afastam-se para os percentis mais baixos.

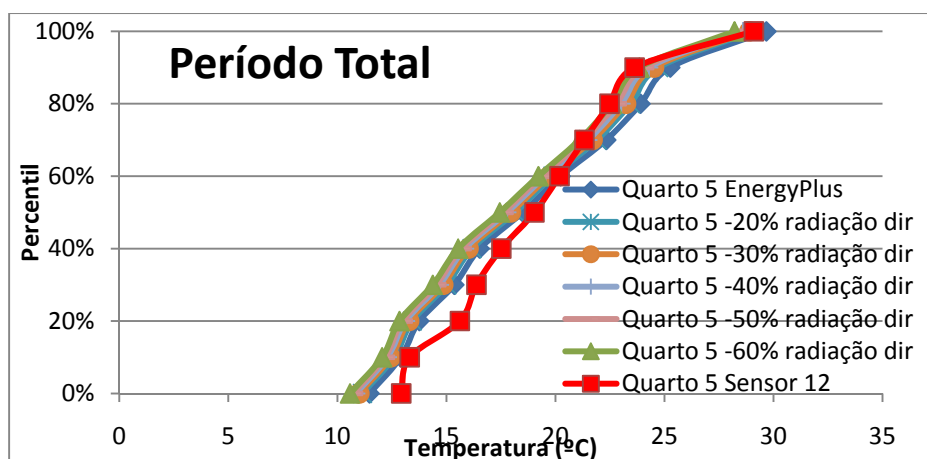


Fig.133 – Frequências acumuladas – Zona 3

A Fig.134 apresenta a diferença de médias, percentis de 90 e percentis de 10, entre as simulações e o sensor, para o período total.

Observa-se que os valores de percentil de 90 convergem com os valores do sensor, ao longo das várias simulações.

Os valores de média e percentil de 10 estão bastante próximos, do valor do sensor, na simulação original, divergindo ao longo das seguintes simulações.

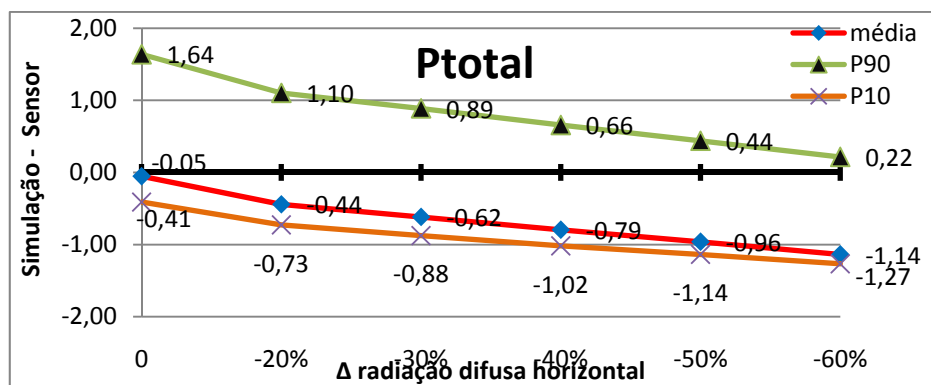


Fig.134 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona3

5.1.4. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Procedeu-se à diminuição de radiação infravermelha no ficheiro climático. Começou por se reduzir 20%. Conclui-se que a temperatura da zona diminui ao longo do período total. Procedeu-se seguidamente a mais simulações de redução da radiação infravermelha (-30%, -40% -50% e -60%).

5.1.4.1. Zona 1

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para a zona 1 no período total.

Constate-se que para os percentis superiores as novas simulações aproximam-se do sensor, divergindo nos percentis inferiores.

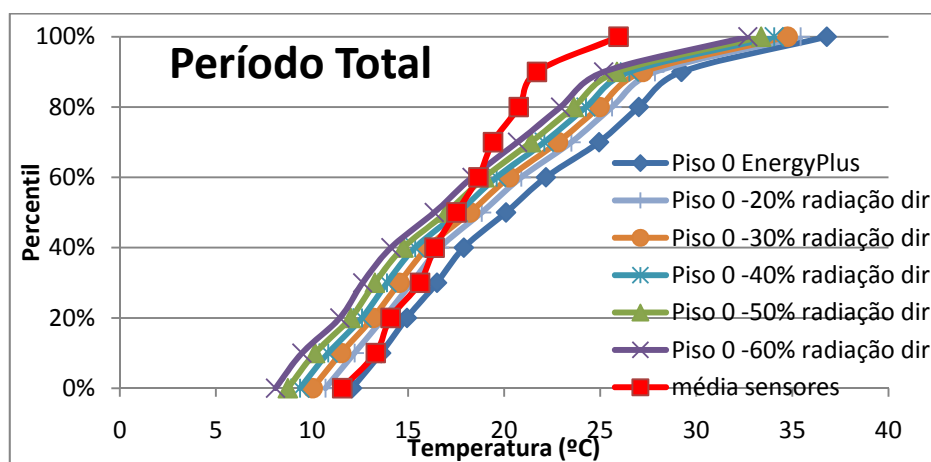


Fig.135 – Frequências acumuladas – Zona 1

A Fig.136 apresenta a diferença de médias, percentis de 90 e percentis de 10, entre as simulações e o sensor, para o período total.

A diminuição de radiação infravermelha provoca uma aproximação dos valores da média e percentil de 90, das simulações, com os valores do sensor e um afastamento no caso do percentil de 10.

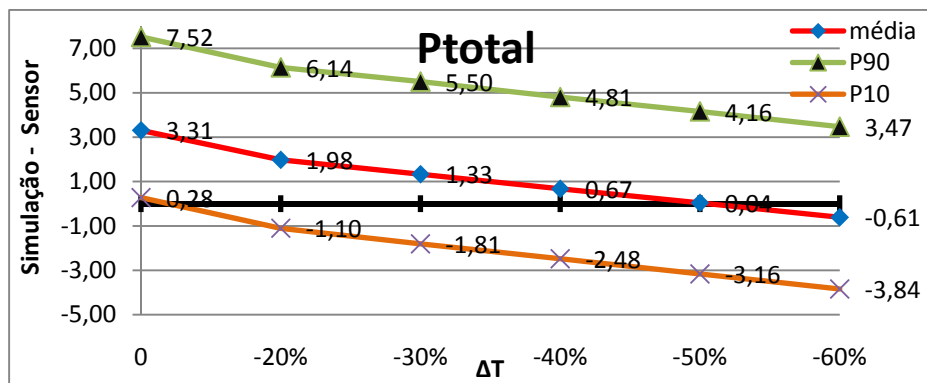


Fig.136 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona1

5.1.4.2. Zona 2

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para o período total, zona 2.

Verifica-se uma grande aproximação entre os valores de temperatura, das novas simulações e os do sensor, para os percentis mais elevados, enquanto para os percentis mais baixos se verifica um grande afastamento.

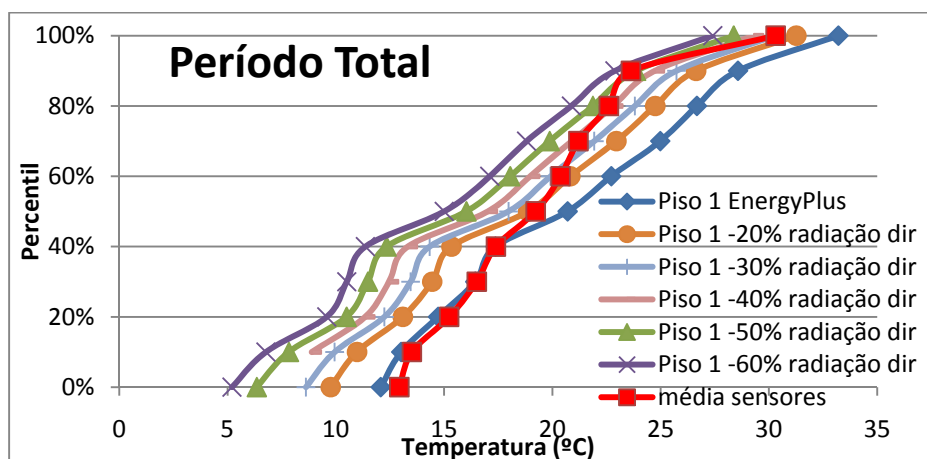


Fig.137 – Frequências acumuladas – Zona 2

A figura seguinte apresenta a diferença de médias, percentis de 90 e percentis de 10, entre as simulações e o sensor, para o período total.

Observa-se uma tendência de convergência com os valores do sensor no caso do percentil de 90, ao longo das simulações.

Os valores de média e percentil de 10 diferem dos do sensor, ao longo das várias simulações.

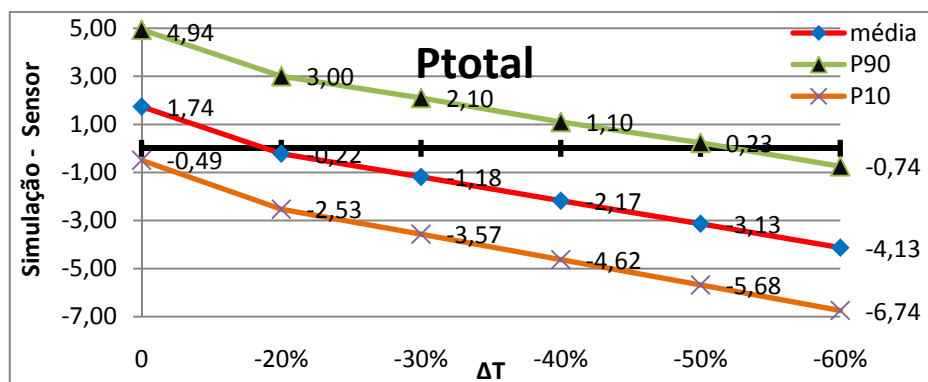


Fig.138 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona2

5.1.4.3. Zona 3

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para o período total, zona 3.

Para os percentis mais elevados verifica-se que a primeira simulação (-20%) converge com o sensor, divergindo as seguintes simulações.

Para os percentis mais baixos as simulações divergem do sensor.

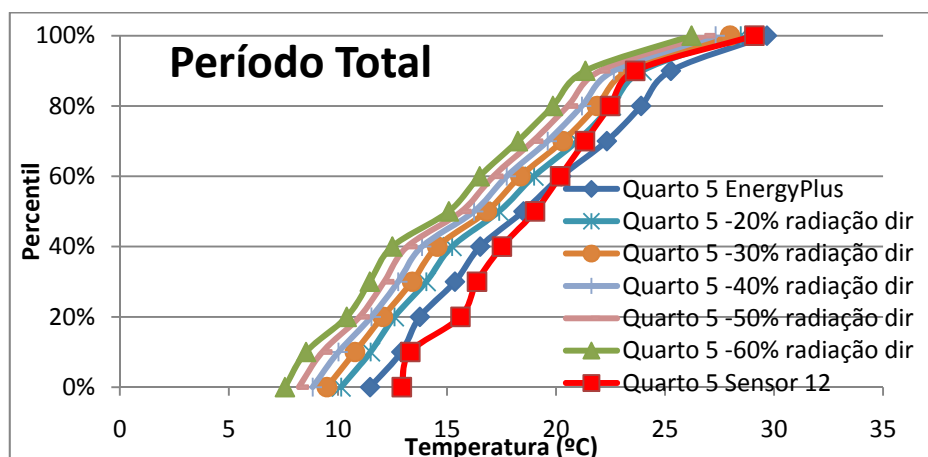


Fig.139 – Frequências acumuladas – Zona 3

A figura seguinte apresenta a diferença de médias, percentis de 90 e percentis de 10, entre as simulações e o sensor, para o período total.

O percentil de 90 converge na primeira simulação (-20%), com o sensor, divergindo nas simulações seguintes.

A média e o percentil de 10 divergem dos valores do sensor, com as novas simulações.

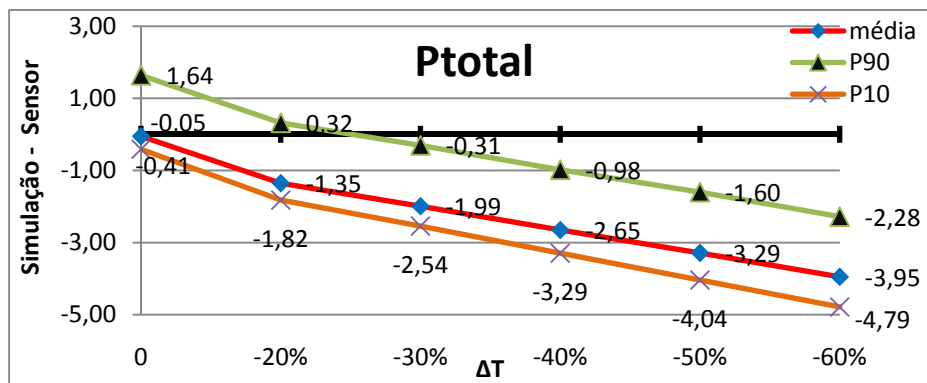


Fig.140 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona3

5.1.5. DIMINUIÇÃO DE RADIAÇÃO DIRECTA NORMAL E DIFUSA HORIZONTAL

Procedeu-se à diminuição de radiação directa normal e difusa horizontal no ficheiro climático. Começou por se reduzir 20% de radiação directa normal e 20% de radiação difusa horizontal. Concluiu-se que a temperatura da zona diminui ao longo do período total. Procedeu-se seguidamente a mais simulações de redução da radiação (-30%, -40% -50% e -60%).

5.1.5.1. Zona 1

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para a zona 1 no período total.

Verifica-se que as simulações aproximam-se do sensor nos percentis mais elevados e afastam-se ligeiramente nos percentis mais baixos.

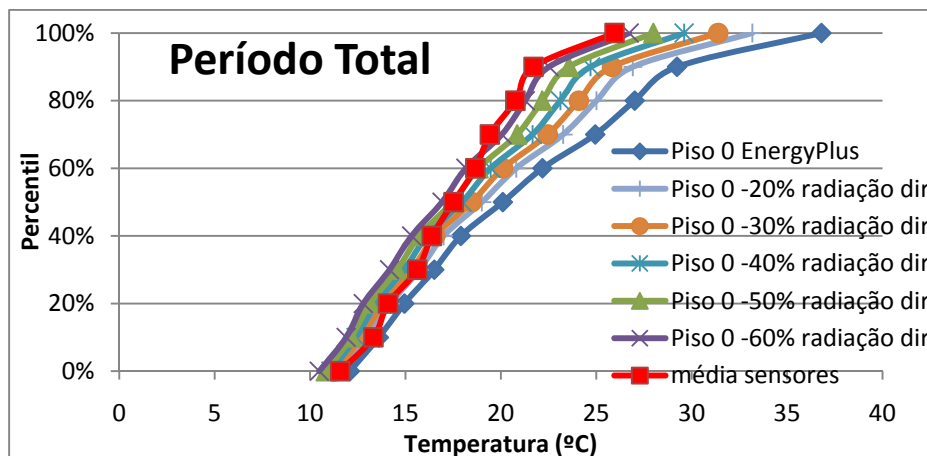


Fig.141 – Frequências acumuladas do período total – Zona 1

A Fig.142 apresenta as frequências acumuladas para o período 1.

Observa-se à medida que se diminui a radiação directa e difusa se verifica uma convergência com os valores do sensor.

A simulação -60% de radiação directa e difusa aproxima-se muito dos valores do sensor.

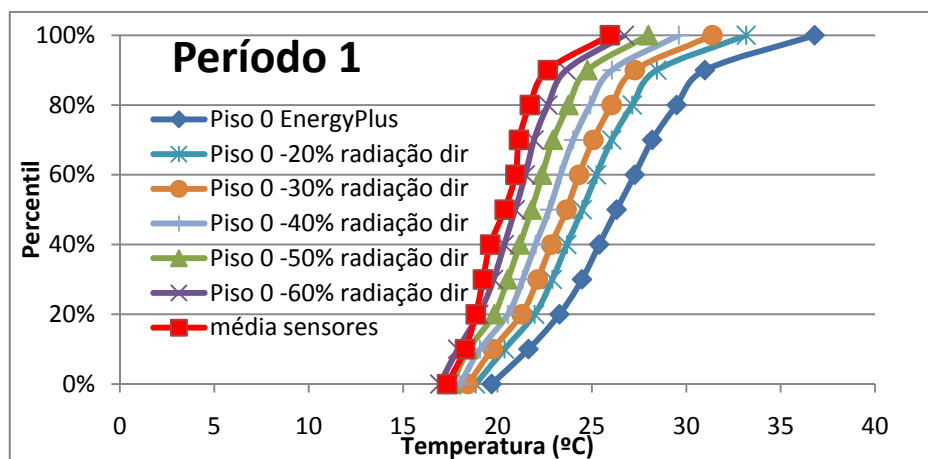


Fig.142 – Frequências acumuladas do período 1 – Zona 1

A figura seguinte apresenta as frequências acumuladas para o período 2. Verifica-se uma ligeira tendência de divergência dos valores do sensor com a diminuição de radiação directa e difusa.

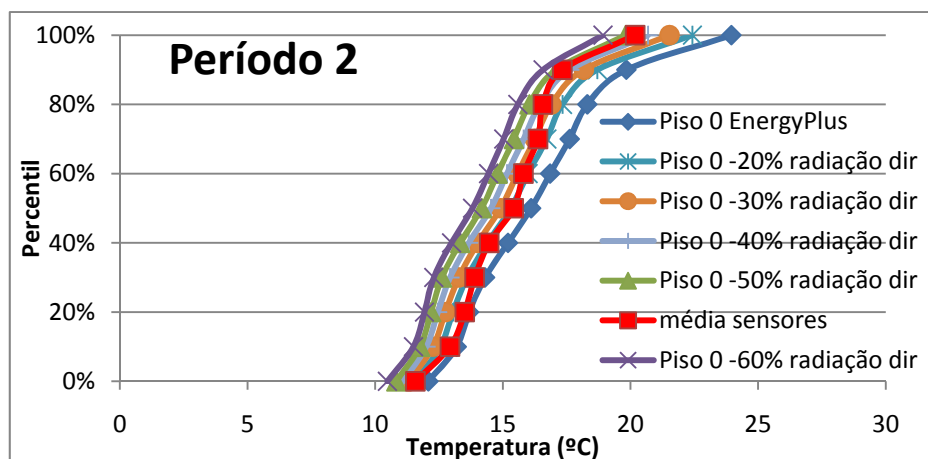


Fig.143 – Frequências acumuladas do período 2 – Zona 1

Na Fig.144 apresenta-se a simulação original, a simulação de redução de 60% de radiação directa e difusa e a média dos sensores, da zona 1. Verifica-se que a nova simulação converge com a média dos sensores para o primeiro período (período mais quente) e diverge ligeiramente no segundo período (período mais frio).

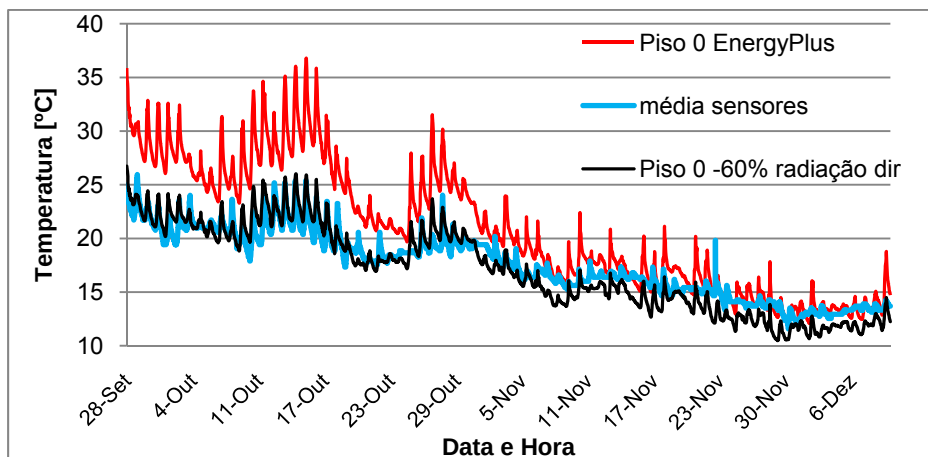


Fig.144 – Temperatura da zona 1 – Diminuição de radiação directa e difusa no ficheiro climático

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.145), período 1 (Fig.146) e período 2 (Fig.147).

No caso do período total, à medida que se diminui a radiação, verifica-se uma convergência da média e percentil de 90 com os valores do sensor. Considerando o percentil de 10 das simulações, verifica-se que, este vai divergindo ligeiramente do sensor.

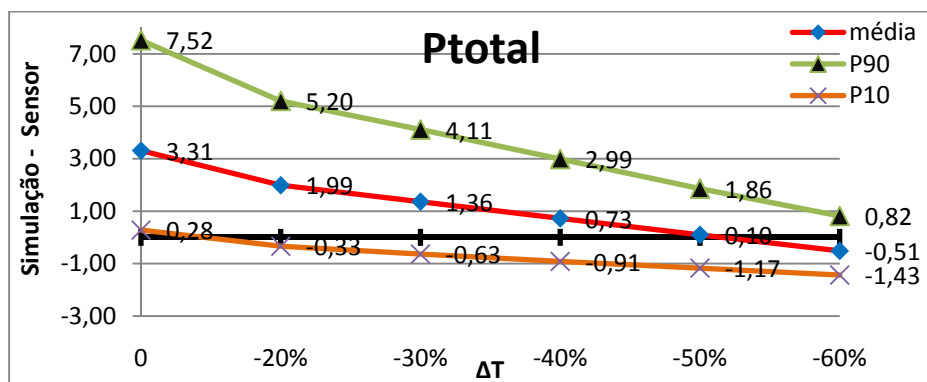


Fig.145 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona1

Considerando o período 1 verifica-se que, à medida que se diminui a quantidade de radiação directa e difusa, há uma convergência com os valores do sensor em termos de média, percentil de 90 e percentil de 10.

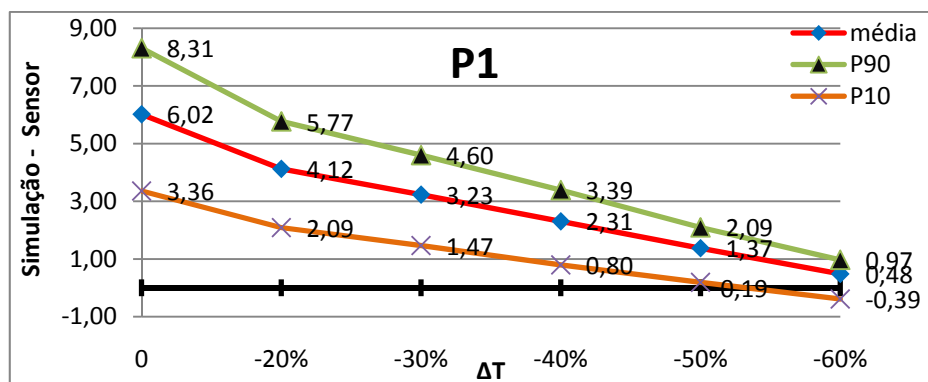


Fig.146–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 1

Considerando o período 2 consta-se uma tendência de convergência do percentil de 90 e de divergência de média e percentil de 10, entre as simulações e o sensor.

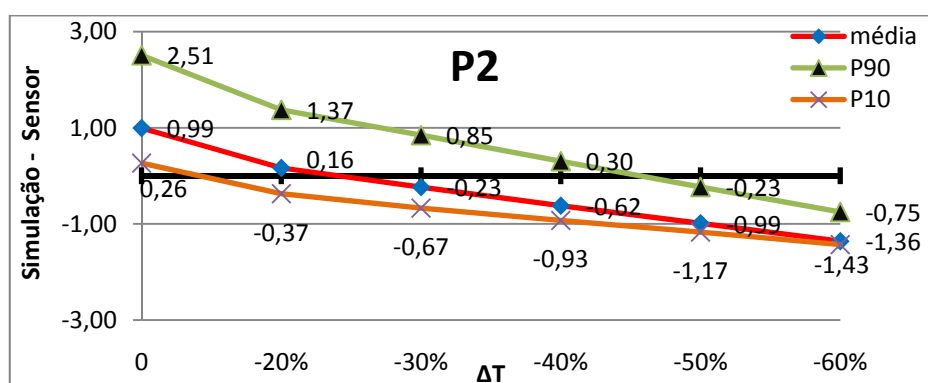


Fig.147–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 1

5.1.5.2. Zona 2

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para a zona 2 no período total.

Para os percentis mais elevados há uma aproximação ao sensor para uma diminuição de 40% de radiação directa e difusa, divergindo nas seguintes. Para os percentis mais baixos, as simulações divergem do sensor.

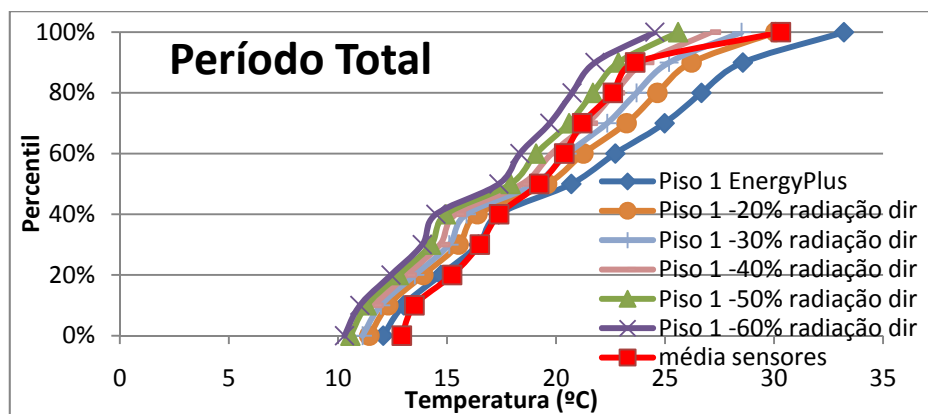


Fig.148 – Frequências acumuladas do período total – Zona 2

A figura seguinte apresenta as frequências acumuladas para a zona 2 no período 1. Verifica-se que a simulação -40% de radiação directa e difusa aproxima-se bastante do sensor.

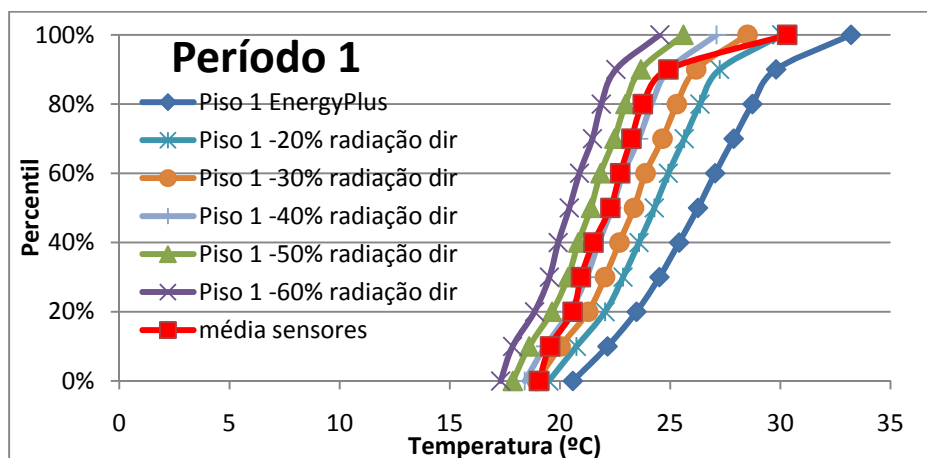


Fig.149 – Frequências acumuladas do período 1 – Zona 2

A figura seguinte apresenta as frequências acumuladas para a zona 2 no período 2. Verifica-se que as simulações afastam-se do sensor.

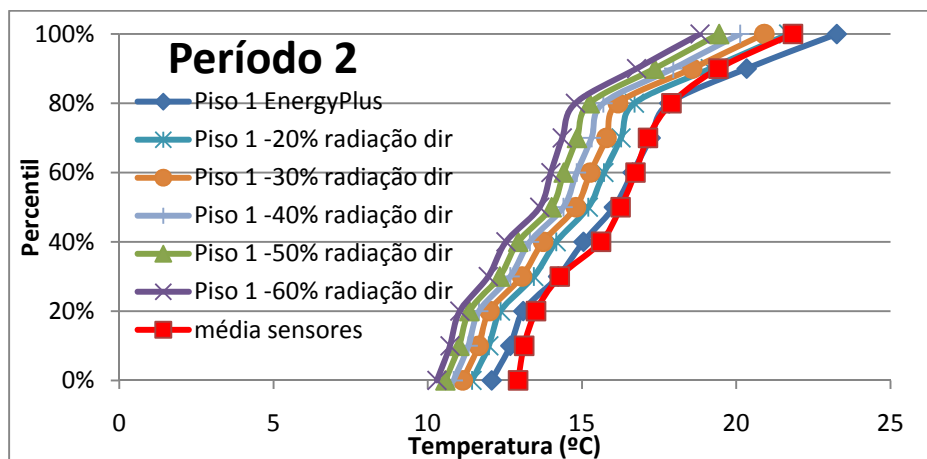


Fig.150 – Frequências acumuladas do período 2 – Zona 2

Na Fig.151 apresenta-se a simulação original, a simulação de redução de 40% de radiação directa e difusa e a média dos sensores, da zona 2. Verifica-se que a nova simulação converge com a média dos sensores para o primeiro período (período mais quente) e diverge no segundo período (período mais frio).

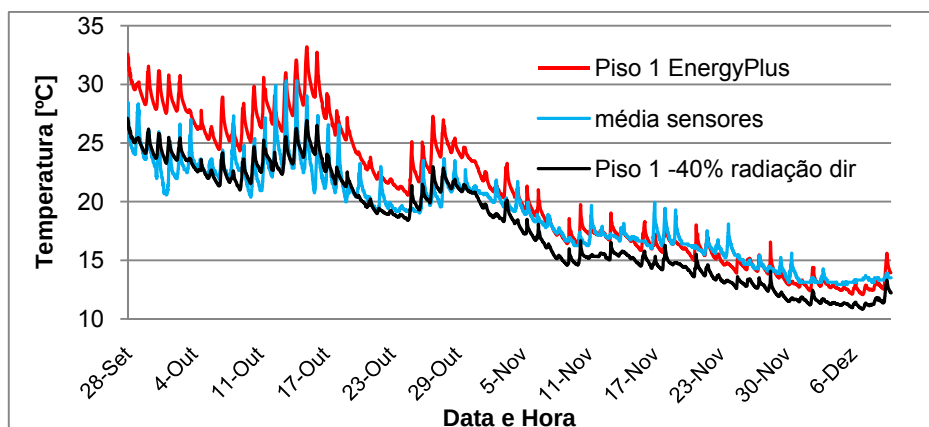


Fig.151 – Temperatura da zona 2 – Diminuição de radiação directa e difusa no ficheiro climático

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.152), período 1 (Fig.153) e período 2 (Fig.154).

Analisando o período total verifica-se uma divergência entre o sensor e as simulações em termos de percentil de 10. O percentil de 90 converge para, aproximadamente, a simulação -40% enquanto a média converge entre -20% e -30%.

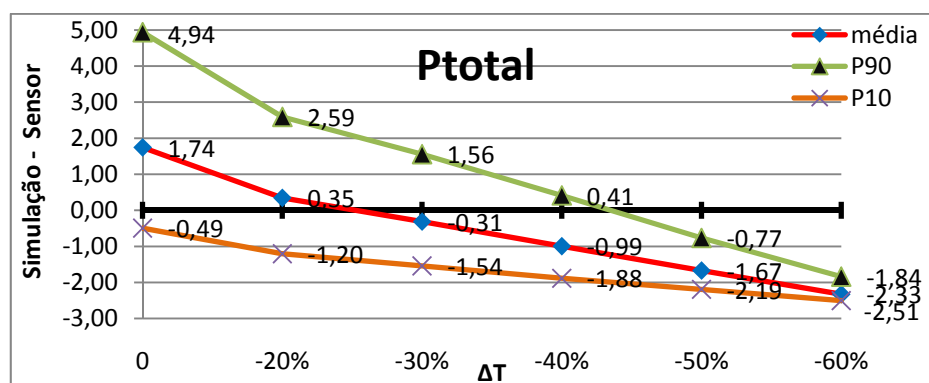


Fig.152 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total-Zona2

Considerando o período 1, verifica-se uma convergência entre os valores de média, percentil de 90 e percentil de 10 da simulação de diminuição de 40% de radiação directa e difusa e o sensor.

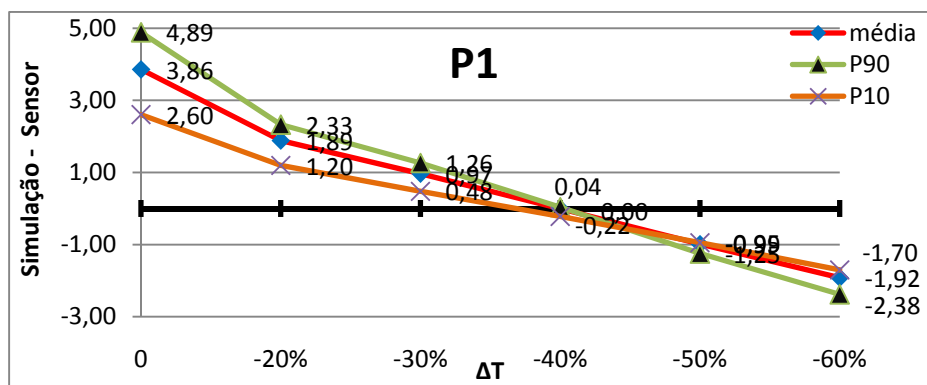


Fig.153–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 2

Analisando o período 2 verifica-se uma tendência de divergência entre as novas simulações e o sensor.

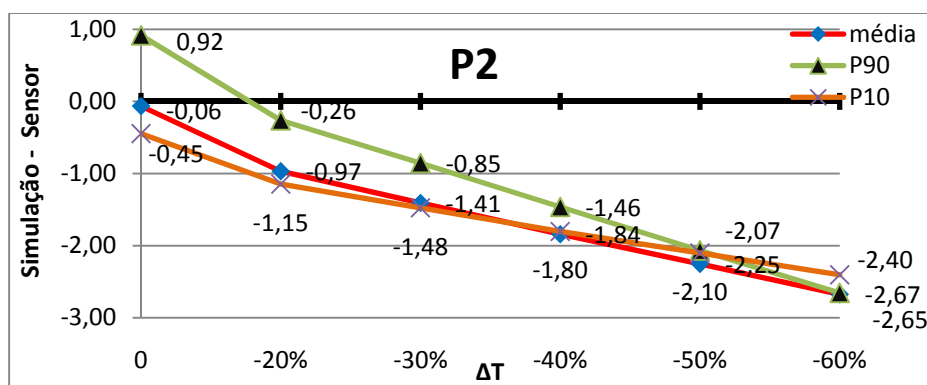


Fig.154–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 2

5.1.5.3. Zona 3

Na figura seguinte apresentam-se as frequências acumuladas para a zona 3 no período total.

Observa-se uma tendência de divergência, das novas simulações, em relação valores do sensor.

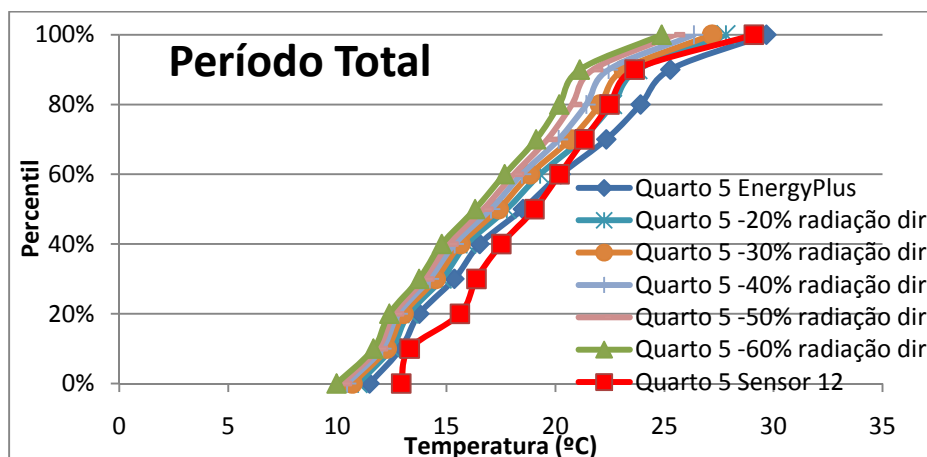


Fig.155 – Frequências acumuladas do período total – Zona 3

A figura seguinte apresenta as frequências acumuladas para a zona 3 no período 1.

A simulação de diminuição de 10% de radiação directa e difusa aproxima-se do sensor, afastando-se nas simulações seguintes.

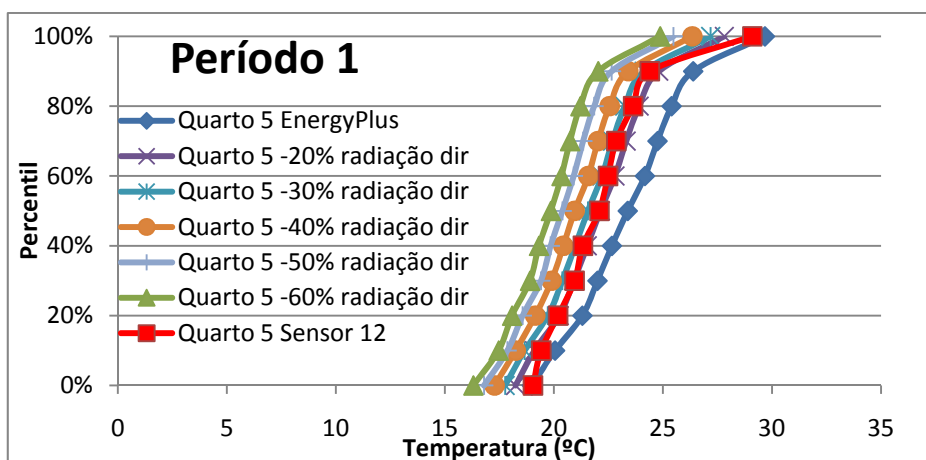


Fig.156 – Frequências acumuladas do período 1 – Zona 3

A figura seguinte apresenta as frequências acumuladas para a zona 3 no período 2. Observa-se uma divergência das diversas simulações em relação ao sensor.

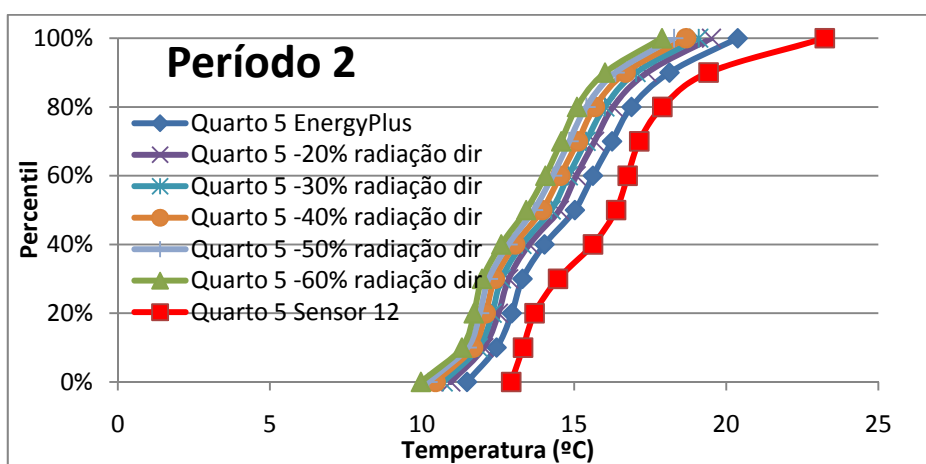


Fig.157 – Frequências acumuladas do período 2 – Zona 3

Na Fig.158 apresenta-se a simulação original, as simulações de redução de 20% e 60% de radiação directa e difusa e a média dos sensores, da zona 2. A simulação de redução de 20% de radiação está próxima do sensor, enquanto a simulação de redução de 60% de radiação afasta-se substancialmente, ao longo do período total.

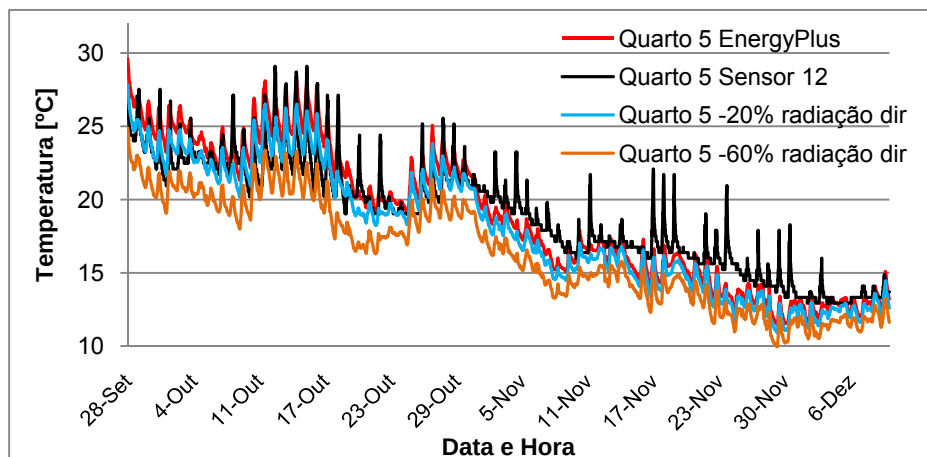


Fig.158 – Temperatura da zona 3 – Diminuição de radiação directa e difusa no ficheiro climático

Em seguida são apresentadas figuras relativas à diferença de média, percentil de 90 e percentil de 10 entre as simulações e o sensor, para o período total (Fig.159), período 1 (Fig.160) e período 2 (Fig.161).

Observando o período total, verifica-se que o percentil de 90 converge com o sensor na simulação de diminuição de 20% de radiação, divergindo nas restantes simulações.

A média e percentil de 10 divergem do sensor com a diminuição de radiação.

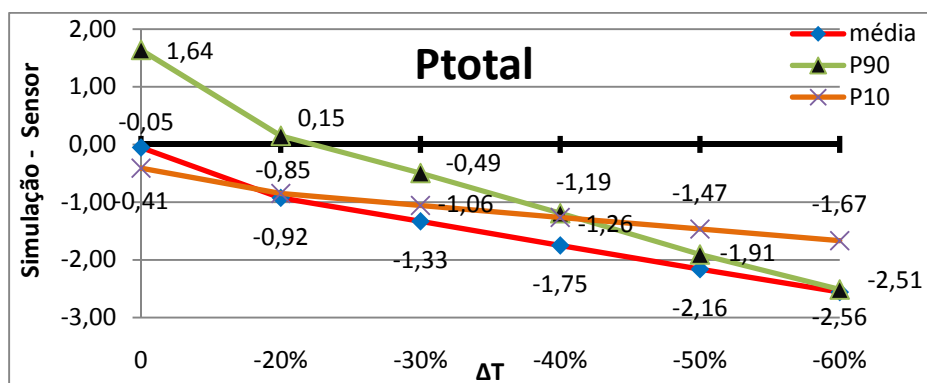


Fig.159 – Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período total- Zona3

Considerando o período 1, verifica-se uma convergência, em termos de média, percentil de 90 e percentil de 10, com o sensor na simulação de diminuição de 20% de radiação, afastando-se nas simulações seguintes.

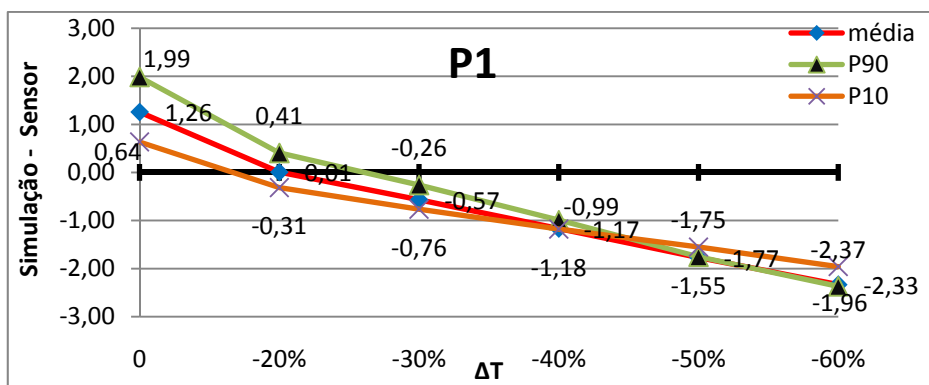


Fig.160–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 1 – Zona 3

Considerando o período 2, observa-se uma divergência entre as novas simulações e o sensor.

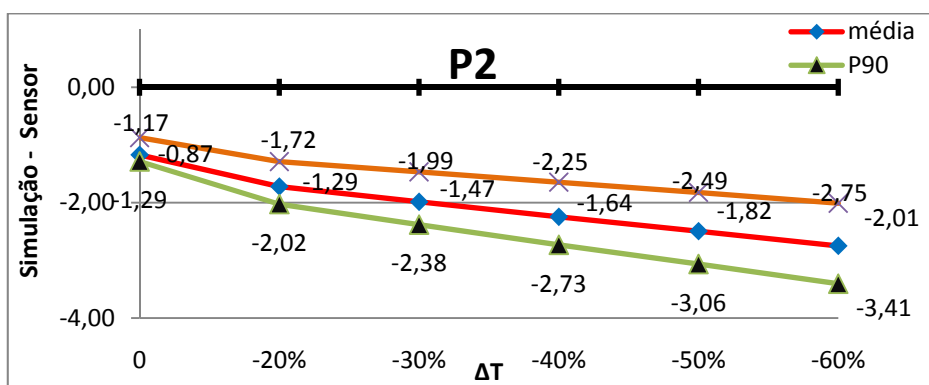


Fig.161–Diferença, entre as simulações e sensor, de média, percentil 90 e percentil 10 para o período 2 – Zona 3

O quadro 25 apresenta a diferença de média, P90 e P10, entre as simulações e o sensor, para as três zonas.

Quadro 25 – Diferença, entre as várias simulações e o sensor, de Média, P90 e P10 para as três zonas

Zona	Período		Simulações					
			0	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%
Zona 1	Ptotal	Média	3.31	1.99	1.36	0.73	0.10	-0.51
		P90	7.52	5.20	4.11	2.99	1.86	0.82
		P10	0.28	-0.33	-0.63	-0.91	-1.17	-1.43
	P1	Média	6.02	4.12	3.23	2.31	1.37	0.48
		P90	8.31	5.77	4.60	3.39	2.09	0.97
		P10	3.36	2.09	1.47	0.80	0.19	-0.39
	P2	Média	0.99	0.16	-0.23	-0.62	-0.99	-1.36
		P90	2.51	1.37	0.85	0.30	-0.23	-0.75
		P10	0.26	-0.37	-0.67	-0.93	-1.17	-1.43
Zona 2	Ptotal	Média	1.74	0.35	-0.31	-0.99	-1.67	-2.33
		P90	4.94	2.59	1.56	0.41	-0.77	-1.84
		P10	-0.49	-1.20	-1.54	-1.88	-2.19	-2.51
	P1	Média	3.86	1.89	0.97	0.00	-0.99	-1.92
		P90	4.89	2.33	1.26	0.04	-1.25	-2.38
		P10	2.60	1.20	0.48	-0.22	-0.95	-1.70
	P2	Média	-0.06	-0.97	-1.41	-1.84	-2.25	-2.67
		P90	0.92	-0.26	-0.85	-1.46	-2.07	-2.65
		P10	-0.45	-1.15	-1.48	-1.80	-2.10	-2.40
Zona 3	Ptotal	Média	-0.05	-0.92	-1.33	-1.75	-2.16	-2.56
		P90	1.64	0.15	-0.49	-1.19	-1.91	-2.51
		P10	-0.41	-0.85	-1.06	-1.26	-1.47	-1.67
	P1	Média	1.26	0.01	-0.57	-1.17	-1.77	-2.33
		P90	1.99	0.41	-0.26	-0.99	-1.75	-2.37
		P10	0.64	-0.31	-0.76	-1.18	-1.55	-1.96
	P2	Média	-1.17	-1.72	-1.99	-2.25	-2.49	-2.75
		P90	-1.29	-2.02	-2.38	-2.73	-3.06	-3.41
		P10	-0.87	-1.29	-1.47	-1.64	-1.82	-2.01

Ao reduzir a temperatura e a radiação solar directa e difusa, na tentativa de aproximar os resultados do programa às medições dos sensores no período 1, verifica-se um afastamento no período 2. Isto acontece porque a redução dos parâmetros provoca uma diminuição ao longo do período total e uma vez que no período 2 a simulação original se aproximava dos sensores, com esta redução começa a divergir.

Verifica-se no entanto que para tentar obter uma aproximação no período 1 através da diminuição da temperatura se observa um grande afastamento no período 2.

Reduzindo a radiação directa e difusa verifica-se uma maior aproximação no período 1 e menor afastamento no período 2, que no caso da redução de temperatura.

Conclui-se então que para aproximar os resultados nos dois períodos seria necessário aumentar ligeiramente a temperatura exterior e diminuir a radiação directa e difusa. Aumentando a temperatura exterior aumenta a temperatura interior ao longo do período total. Diminuindo a radiação solar, verifica-se uma diminuição de temperatura interior maior no período 1 o que permite ajustar os resultados.

Para ajustar os resultados do programa às medições dos sensores na zona térmica 1, procedeu-se ao aumento de 2°C de temperatura exterior e diminuição de 80% de radiação solar directa e difusa (Fig.162).

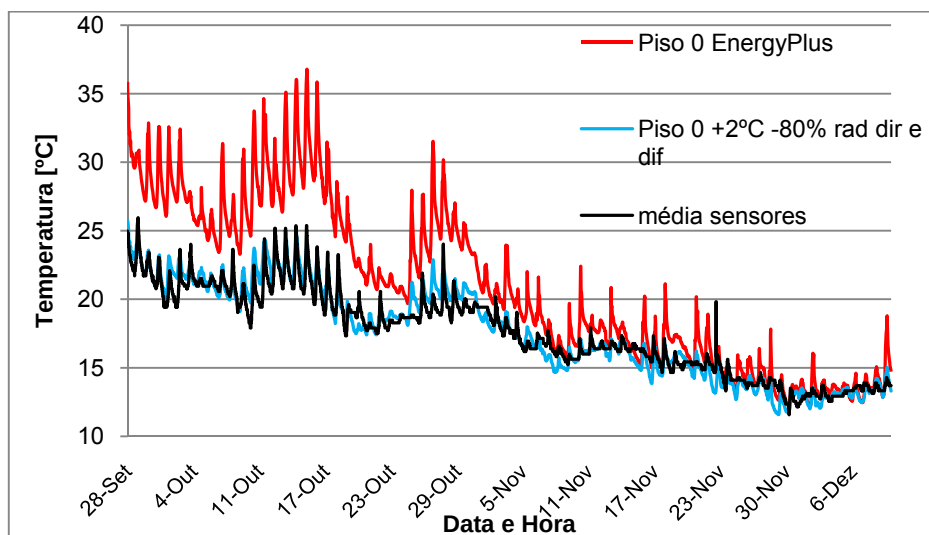


Fig.162 - Temperatura da zona 1 – Aumento de 2°C de temperatura exterior e diminuição de 80% de radiação directa e difusa no ficheiro climático

Verifica-se que a nova simulação apresenta uma grande convergência com as medições dos sensores, tanto no período 1 como no período 2.

A Fig.163 mostra a nova simulação para a zona térmica 2 em que se procedeu ao aumento de 2°C e diminuição de 50% de radiação directa e difusa.

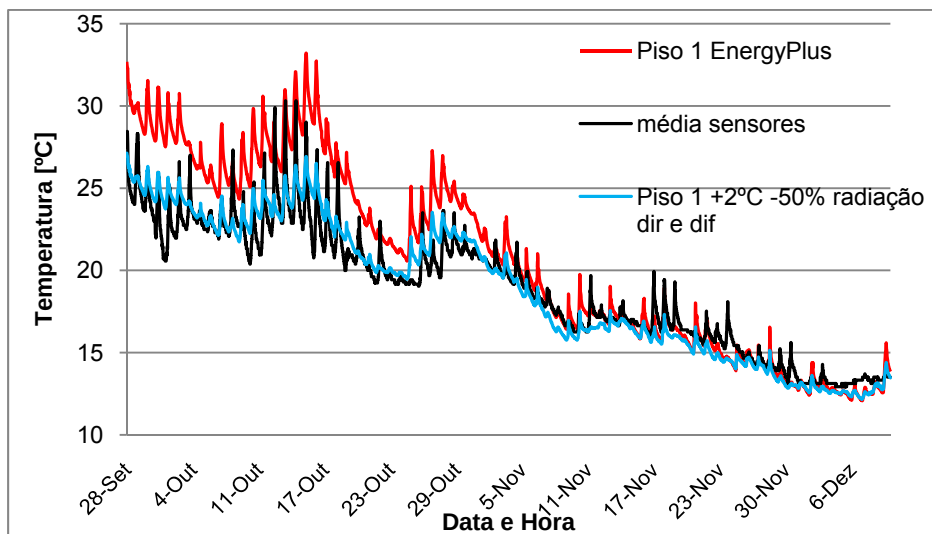


Fig.163 - Temperatura da zona 2 – Aumento de 2°C de temperatura exterior e diminuição de 50% de radiação directa e difusa no ficheiro climático

Verifica-se que a nova simulação apresenta uma convergência com as medições dos sensores.

A Fig.164 mostra a nova simulação para a zona térmica 3 em que se procedeu ao aumento de 2°C e diminuição de 50% de radiação directa e difusa.

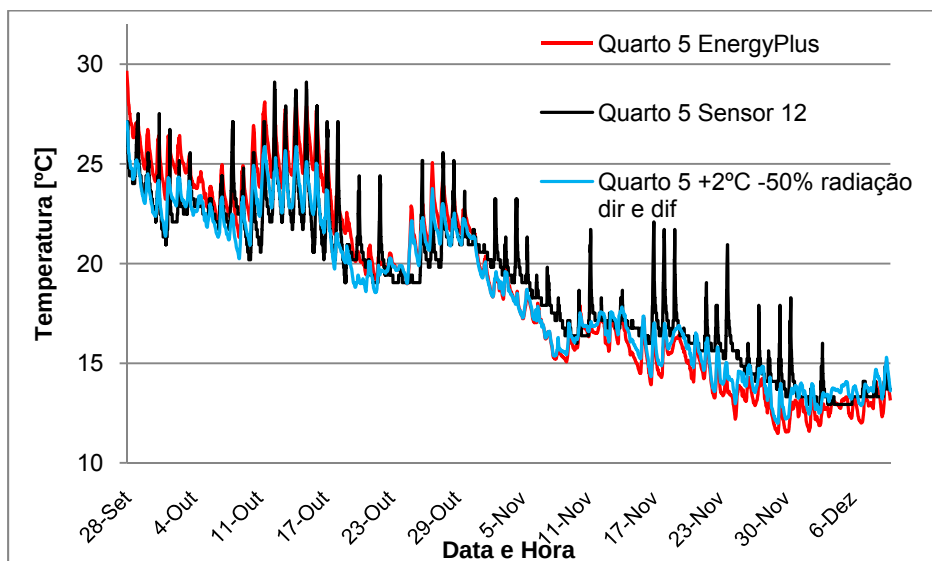


Fig.164 - Temperatura da zona 3 - Aumento de 2°C de temperatura exterior e diminuição de 50% de radiação directa e difusa no ficheiro climático

Verifica-se que a nova simulação apresenta uma convergência com as medições dos sensores.

Em suma, verifica-se que as novas simulações apresentam uma grande aproximação aos valores medidos.

A temperatura exterior foi a mesma para as três simulações uma vez que é a mesma para as três zonas.

O quadro 26 apresenta a diferença de média, P90 e P10, entre as novas simulações e o sensor, para as três zonas.

Quadro 26 - Diferença, entre as novas simulações e o sensor, de Média, P90 e P10 para as três zonas

Zona	Período		Simulações	
			Original	Novas Simulações
Zona 1	Ptotal	Média	3.31	0.05
		P90	7.52	0.46
		P10	0.28	-0.18
	P1	Média	6.02	0.45
		P90	8.31	0.38
		P10	3.36	0.26
	P2	Média	0.99	-0.29
		P90	2.51	0.01
		P10	0.26	-0.12
Zona 2	Ptotal	Média	1.74	-0.04
		P90	4.94	0.83
		P10	-0.49	-0.55
	P1	Média	3.86	0.61
		P90	4.89	0.34
		P10	2.60	0.67
	P2	Média	-0.06	-0.60
		P90	0.92	-0.40
		P10	-0.45	-0.49
Zona 3	Ptotal	Média	-0.05	-0.40
		P90	1.64	-0.18
		P10	-0.41	0.30
	P1	Média	1.26	-0.03
		P90	1.99	-0.04
		P10	0.64	0.22
	P2	Média	-1.17	-0.72
		P90	-1.29	-1.27
		P10	-0.87	-0.06

A diminuição de radiação solar directa e difusa foi a mesma para as zonas 2 e 3 (-50%) uma vez que estão nas mesmas condições de exposição solar. No caso da zona 1 foi necessária uma diminuição maior (-80%), o que seria de esperar uma vez que esta zona estava sombreada pela habitação adjacente e por um aterro situado no quintal (decorrente das obras).

Concluiu-se que o parâmetro climático que apresentou maior influência em termos de radiação solar foi a radiação directa normal. A temperatura exterior também apresenta grande influência no cálculo da temperatura interior atingida.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

O principal objectivo desta dissertação foi atingido. As condições fronteira, nomeadamente o clima, apresentam grande influência nos programas de simulação higrotérmica, sendo, então fundamentais para a validação de modelos de cálculo, por comparação com medições “*in situ*”.

O estudo do programa EnergyPlus permitiu tirar as seguintes conclusões:

- O programa utilizado nesta dissertação (EnergyPlus) é uma poderosa ferramenta de simulação higrotérmica de edifícios, tendo sido possível adquirir conhecimentos sobre o mesmo;
- O programa fornece uma documentação extensa, constituída por vários capítulos. O capítulo mais utilizado foi o *Engineering Reference* onde é apresentada a formulação matemática. Este capítulo é muito extenso e de difícil consulta e muitos dos parâmetros presentes nas equações não estão definidos;
- O estudo do caso 920 da ASHRAE (método BESTEST) permitiu a validação do programa por comparação com programas de referência. A resolução deste caso permitiu também um primeiro contacto com o programa e aprendizagem dos principais campos que é necessário preencher;

O estudo do TMY (*Typical Meteorological Year*) do Porto permitiu obter as seguintes conclusões:

- O TMY não é necessariamente um bom indicador das condições do ano seguinte ou mesmo dos próximos 5 anos. Em vez disso representa as condições julgadas típicas para um longo período de tempo, como por exemplo 30 anos;
- Como representa condições típicas, em vez de condições extremas, não é aconselhável para dimensionamento de sistemas de climatização, sendo no entanto, aconselhável para estimativas de consumos de energia;
- É possível descarregar um ficheiro TMY do Porto, do site do Energyplus;
- Os ficheiros TMY apresentam vários parâmetros climáticos mas o EnergyPlus só utiliza alguns deles;
- Através do ficheiro TMY é possível caracterizar o clima anual representativo do Porto;
- A temperatura exterior apresenta um valor médio anual de 14.3°C. Ao longo do ano observa-se a existência de um período mais quente, que inclui os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro;
- A humidade relativa apresenta um valor médio anual de 79%;
- A temperatura de ponto de orvalho apresenta um valor médio anual de 10.4°C;

- A radiação solar directa normal apresenta um valor médio anual de 169,3 Wh/m². Observa-se que os meses de Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro são os que apresentam maior quantidade de radiação directa normal;
- A radiação solar difusa horizontal apresenta um valor médio anual de 69.8 Wh/m². Os meses de Abril, Maio, Junho, Julho e Agosto apresentam maior quantidade de radiação difusa;
- A radiação infravermelha horizontal apresenta um valor médio de 331.4 Wh/m²;
- A velocidade apresenta um valor médio anual de 3 m/s.

Através da comparação do TMY do Porto com os valores reais, medidos pela estação do LFC-FEUP e sensor exterior (medição de temperatura e humidade relativa), no período em estudo, conclui-se que:

- Apresentam, em geral, curvas de resultados com desenvolvimentos semelhantes para os vários parâmetros;
- Em termos de radiação directa verificam-se as maiores diferenças, apresentando o TMY uma média igual a 113.2 Wh/m² e a estação do LFC-FEUP uma média de 55.9Wh/m²;
- No caso da temperatura exterior verifica-se que os valores do LFC-FEUP são superiores, apresentando uma média de 16.2°C, enquanto o TMY apresenta uma média de 13,5°C. O sensor 15 apresenta uma média igual ao do LFC-FEUP mas apresenta menor amplitude, o que resulta do facto de este sensor estar protegido, não estando nas condições reais de temperatura exterior;
- Verifica-se a existência de um período mais quente (Setembro e Outubro) e um período mais frio (Novembro e Dezembro).

Através das medições dos sensores e das simulações realizadas com o EnergyPlus conclui-se que:

- Os sensores colocados na mesma zona térmica apresentam curvas de resultados semelhantes, verificando-se que os sensores mais afectados por envidraçados apresentam maiores valores de medição de temperatura, devido ao facto de receberem maior radiação solar;
- Os sensores apresentam um valor médio temperatura de 17.6°C na zona 1, 19°C na zona 2 e 18.9°C na zona 3;
- As simulações apresentam uma temperatura média igual a 20.9°C na zona 1, 20.7°C na zona 2 e 18.9°C na zona 3;
- As simulações das três zonas apresentam curvas com desenvolvimento semelhante às das medições. Observa-se a existência de dois períodos. No primeiro período (mais quente) observa-se uma maior diferença entre as simulações e as medições que no período 2 (mais frio) no qual as curvas se aproximam;
- A simulação da zona 1 é a que mais se afasta das medições, observando-se uma diferença de média de temperatura de 6°C no período 1. Relativamente à zona 2 esta diferença é de 3.9°C e na zona 3 é de 1.3°C;

A realização de novas simulações, com base na alteração de parâmetros climáticos presentes no ficheiro climático permitiu concluir que:

- Cada parâmetro climático simulado influencia de maneira diferente os resultados das simulações;
- No caso da temperatura exterior verifica-se que a redução desta implica a diminuição da temperatura interior ao longo de todo o período em estudo; Uma redução de 1°C implica uma diminuição da temperatura média interior de, aproximadamente, 0.9°C para as 3 zonas, no período total. Reduzindo 5°C provoca uma diminuição de 4.3°C;

- A redução de radiação solar directa normal provoca uma maior diminuição de temperatura das zonas no período 1 que no período 2. Uma redução de 20% provoca uma diminuição da média da temperatura de 1.3°C no período 1 e 0.4°C no 2, das zona 1 e 2, enquanto na zona 3 provoca a diminuição de 0.8°C e 0.2°C, respectivamente. Uma redução de 60% provoca a diminuição da média da temperatura de 4°C no período 1 e 1,1°C no 2, nas zonas 1 e 2, enquanto na zona 3 provoca diminuição de 2,5°C e 0,7°C;
- A redução de radiação difusa horizontal provoca uma ligeira diminuição da temperatura das zonas, ao longo do período total, sendo esta muito inferior ao caso da radiação directa. Uma redução de 20% provoca a diminuição do valor da média de temperatura 0,7°C, nas zonas 1 e 2, e 0,5°C na zona 3. Uma redução de 60 % provoca a diminuição da média de temperatura de 1,9°C, nas zonas 1 e 2, e 1,3°C na zona 3;
- A redução de radiação infravermelha provoca uma diminuição de temperatura das zonas ao longo do período total. Uma redução de 20% provoca uma diminuição da temperatura média de 1.3°C ao longo do período total, nas zonas 1 e 3, enquanto na zona 2 provoca diminuição de 2°C. Uma redução de 60% provoca uma diminuição de temperatura média de 3.9°C, nas zonas 1 e 3, enquanto na zona 2 provoca diminuição de 5.9°C;
- A redução simultânea de 20% de radiação solar directa normal e difusa horizontal provoca uma diminuição de média temperatura de 2°C no período 1 e 0.9°C no período 2 nas zonas 1 e 2, enquanto na zona 3 provoca diminuição de 1.3°C e 0.6°C, respectivamente. Uma redução de 60% provoca diminuição de 5.7°C no período 1 e 2.5°C no 2, nas zonas 1 e 2, enquanto na zona 3 provoca diminuição de 3.6°C e 1.6°C;
- Uma simulação com aumento de 2°C de temperatura exterior e redução de 80% de radiação directa e difusa apresenta valores muito semelhantes aos medidos na zona 1. No caso das zonas 2 e 3 verificou-se uma aproximação aos valores medidos através do aumento de 2°C e redução de radiação directa e difusa de 50%.
- Concluiu-se que o parâmetro climático que apresentou maior influência em termos de radiação solar foi a radiação directa normal. Uma habitação que possua sombreamento apresenta uma grande diminuição da temperatura atingida no interior. Quanto maior for a área de envidraçados maior é a diferença obtida no caso de possuir ou não sombreamento. A radiação solar medida por uma estação meteorológica localizada na mesma cidade do local em estudo é em princípio semelhante à do local, desde que o edifício não sofra nenhum tipo de sombreamento;
- A temperatura exterior também apresenta grande influência no cálculo da temperatura interior atingida mas, ao contrário da radiação solar, esta não pode ser controlada. A sua importância prende-se com a aplicação em programas de simulação higrotérmica, uma vez que são utilizados normalmente valores típicos de um certo local e que são diferentes dos valores reais. Mesmo utilizando valores reais estes são obtidos de uma estação meteorológica que dificilmente está nas mesmas condições do local em estudo apresentando por isso valores diferentes dos reais.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Desenvolvimentos futuros:

- Estudos mais exaustivos do clima, através de comparação de várias medições de estações meteorológicas com o clima típico (TMY), procedendo a uma comparação anual;
- Estudo de Microclimas – criação de um zonamento climático do Porto;
- Realização de mais medições “*in situ*” e comparação com simulações do Energy Plus (realizar uma comparação anual);
- Introdução, no EnergyPlus, da moradia adjacente de modo a calcular o sombreamento provocado por esta e comparar com os resultados obtidos nas últimas simulações em que se aumentou 2°C à temperatura e reduziu a radiação solar e difusa;
- Do mesmo modo, tentar introduzir o aterro existente no jardim;
- Análise de influência de outros parâmetros:
- Introduzir, no programa, sistemas de sombreamento e verificar os resultados obtidos;
- Introduzir sistemas de sombreamento na habitação e comparar com os resultados do programa, através da medição de sensores;
- Introduzir a cave da habitação;
- Introduzir o corredor de acesso às habitações;
- Introduzir equipamentos;
- Simular taxas de ocupação;
- Alterar características de envidraçados e clarabóias;
- Alterar materiais de construção utilizados;

BIBLIOGRAFIA

- [1] DL n.º 80/2006, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*, Diário da República, Lisboa, 4 de Abril 2006.
- [2] Despacho n.º 11020/2009, *Define o Método de Cálculo Simplificado para Certificação Energética de Edifícios Existentes no âmbito do RCCTE*, Diário da República, Lisboa, 30 de Abril de 2009.
- [3] EnergyPlusTM. getting started with EnergyPlus. In *EnergyPlus Documentation*, 1-6, 2009.
- [4] EnergyPlusTM. engineering reference. In *EnergyPlus Documentation*, 1-70 98-126 261-264, 2009.
- [5] Natural Works, *Curso de iniciação à simulação em EnergyPlus*.
- [6] Judkoff, R., Neymark, J. *Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*. NREL, 1995.
- [7] 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.
- [8] EnergyPlus Development Team, *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140 – 200*, 2009.
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/energyplus_ashrae_140_envelope.pdf.
Abril de 2010.
- [9] Rodrigues, A.M., Canha da Piedade, A., Braga, A.M. *Térmica de Edifícios*, Edições Orion, Amadora, 2009.
- [10] Gomes, K.S.A., *Validação da modelação de um Edifício de Habitação com o Programa EnergyPlus por comparação com Medições "In Situ"*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [11] Marion, W., Urban, K. *User's Manual for TMY2S (Typical Meteorological Years)*. NREL, 1995.
- [12] EnergyPlusTM. auxiliary programs. In *EnergyPlus Documentation*, 2-70, 2009.
- [13] <http://paginas.fe.up.pt/~lfc-scc/estacao.html>. Abril de 2010.
- [14] <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/galeria.php?lang=pt>. Abril de 2010.
- [15] http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm. Abril de 2010.
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Dew_point. Abril de 2010.

