

OTIMIZAÇÃO HIGROTÉRMICA DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO SOCIAL

RICARDO PINHO DE ARAÚJO

Projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

Coorientadora: Professora Doutora Isabel Cristina da Silva Martins
Ribeiro

JANEIRO DE 2013

Versão para Discussão

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

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 – 2011/2012 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

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

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

Aos meus Pais

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Para fazer um trabalho tão abrangente só é possível com o apoio e disponibilidade de várias pessoas que direta ou indiretamente estiveram envolvidas. Assim quero agradecer a algumas pessoas nomeadamente:

Ao meu orientador Professor Doutor Nuno Ramos por toda a disponibilidade, entusiasmo e paciência que demonstrou durante o tempo de elaboração deste trabalho.

À Professora Doutora Isabel Ribeiro por todas as horas passadas a melhorar o programa de otimização, pelo interesse demonstrado na resolução de todas as questões que surgiram durante a elaboração da presente dissertação e pela revisão de todo o trabalho de forma tão detalhada.

Ao Engenheiro António Curado por toda a disponibilidade que demonstrou quando surgiam dúvidas relacionadas com o programa EnergyPlus.

A toda a minha família.

A todos os meus amigos pela amizade demonstrada a nível académico e pessoal não só neste semestre como também durante todo o percurso académico.

O meu mais sincero obrigado a todos os referidos.

RESUMO

O conforto térmico e a qualidade do ar interior são fatores de conforto cada vez mais importantes nos dias de hoje. Assim recorreu-se ao programa de modelação higrotérmica EnergyPlus para simular o comportamento higrotérmico de uma habitação social na cidade do Porto.

Utilizando o método EMPD foram, numa primeira fase, corridas simulações para regimes de ventilação constante e variável de forma a se ter uma melhor noção do comportamento da habitação com diferentes taxas de renovação de ar.

De seguida determinaram-se os parâmetros higrotérmicos de condensações, humidade relativa acima dos 80% e Time of Wetness para três compartimentos principais da habitação de forma a determinar qual apresentava mais problemas. Utilizando diferentes camadas de isolamento e potências de aquecimento para determinar a evolução dos parâmetros estudados, foram identificados dias nos meses frios que provocam problemas de carácter higrotérmico. Esses dias foram depois utilizados no Programa de Otimização.

Com o estudo feito no EnergyPlus foi possível identificar para que espessura de isolamento e/ou potência de aquecimento os problemas higrotérmicos desapareciam.

Numa última fase foi utilizado o Programa de Otimização, como ferramenta simplificada, de forma a fazer uma comparação com os resultados do EnergyPlus. Alguns dados fornecidos pelo EnergyPlus foram utilizados no Programa de Otimização de forma a se obter valores mínimos quer para o isolamento quer para a potência de aquecimento necessários para resolver os problemas dos dias em estudo.

Os resultados do Programa de Otimização, embora não totalmente coincidentes com os do EnergyPlus, foram bastante aceitáveis, sendo que as diferenças se devem ao fato de a formulação matemática do programa ser simplificada.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização, EnergyPlus, Comportamento higrotérmico, Time of Wetness.



ABSTRACT

Nowadays thermal comfort and the internal air quality are increasingly important factors. Thus the hygrothermal modeling program EnergyPlus was used to simulate the hygrothermal behavior of an apartment in Porto.

In a first stage, using the EMPD method, simulations were ran to have a better understanding of the apartments behavior with a constant or variable rate of air renovations.

Next were determined the hygrothermal parameters condensations, relative humidity above 80% and Time of Wetness of three of the main rooms in the apartment. By using different thickness in the isolation layer and different heating potency to determine the evolution of the studied parameters were identified some days during the cold months that cause hygrothermal issues. Those days were then used on the Optimization Program.

With the study made with EnergyPlus the isolation thickness and/or heating potency needed to eliminate the hygrothermal issues were determined.

In a last phase the Optimization Program was used, as a simplified tool, to make a comparison with the EnergyPlus's results. Some data extracted from EnergyPlus was used in the Optimization Program to obtain minimal values of insulation thickness and heating potency necessary to eliminate hygrothermal issues from the days studied.

Although the results of the Optimization Program were not exactly the same as the EnergyPlus's, they were fairly acceptable, knowing that the differences lie in the simplified mathematical formulas used.

KEYWORDS: Optimization, EnergyPlus, Hygrothermal behavior, Time of Wetness



ÍNDICE GERAL

Conteúdo

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 Fundamentos.....	3
2.1. Avaliação do risco de desenvolvimento de fungos	3
2.1.1. Desenvolvimento de fungos	3
2.1.2. Condensações superficiais.....	4
2.1.3. Time of Wetness.....	6
2.1.4. ISO 13788	6
2.2. Modelação higrotérmica com o programa energyplus.....	7
2.2.1. Introdução.....	7
2.2.1. Metodologia de cálculo da temperatura interior.....	7
2.2.2. Metodologia de cálculo da Humidade Relativa Interior.....	8
2.2.3. EMPD.....	9
2.2.4. Condições na superfície interior.....	10
2.3. Otimização recorrendo à plataforma GAMS/MINOS	10
3 Descrição do caso de estudo.....	13
3.1. Introdução	13
3.2. Localização e clima.....	14
3.3. Caracterização da envolvente.....	17
3.4. Ganhos internos	19
3.5. Renovação de ar.....	20
4 Simulação higrotermica do edificio.....	23
4.1. Modelação do apartamento	23
4.1.1. Introdução.....	23
4.1.2. Parâmetros da simulação	23
4.1.3. Variáveis de saída.....	31
4.2. Resultados da simulação Base	32
4.2.1. Temperatura	32
4.2.2. Humidade	35
4.3. Análise de Resultados.....	37
4.4. Risco de Desenvolvimento de fungos	43
5 Processo de Otimização.....	56

5.1. Formulação do Programa de Otimização	56
5.2. Dados introduzidos no Programa.....	59
5.2.1. Ganhos Internos	59
5.2.2. Transferência de calor por Convecção	60
5.2.3. Infiltração do ar exterior	61
5.2.4. Capacidade Térmica.....	62
5.2.5. Temperatura Superficial e Temperatura Interior.....	62
5.2.6. Ganhos Solares.....	63
5.3. Dias a Otimizar	65
5.4. Resultados da otimização com isolamento	68
5.5. Resultados da otimização com isolamento e aquecimento	68
5.6. Comparação de resultados com os valores do EnergyPlus.....	69
6 Conclusões	73
6.1. Conclusões Gerais do trabalho	73
6.2. Desenvolvimentos Futuros	74
Bibliografia	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama Psicrométrico. Adaptado de [3].....	4
Figura 2 – Esquema de representação do fator Time of Wetness [6].....	6
Figura 3 – Esquema de funcionamento do modelo EMPD.....	9
Figura 4 – Fachada Sudoeste do edifício em estudo [14].....	14
Figura 5 – Variação das temperaturas na cidade do Porto.....	15
Figura 6 – Comparação das Temperaturas exteriores.....	16
Figura 7 – Comparação das Humidades Relativas exteriores.....	16
Figura 8 – Planta da habitação.....	17
Figura 9 – Campo <i>People</i> no EnergyPlus.....	19
Figura 10 – Campo <i>Schedule:Compact</i> no EnergyPlus.....	20
Figura 11 – Grelhas auto-reguláveis na Sala.....	20
Figura 12 – Dispositivos de extração mecânica.....	21
Figura 13 – Parâmetros da simulação.....	23
Figura 14 – Campo de selecção do algoritmo.....	23
Figura 15 – Campo <i>RunPeriod</i>	24
Figura 16 – Campo <i>Material</i>	24
Figura 17 – Campo <i>Construction</i>	25
Figura 18 – Campo <i>BuildingSurface:Detailed</i>	25
Figura 19 – Campo <i>WindowMaterial:SimpleGlazingSystem</i>	25
Figura 20 - <i>FenestrationSurface:Detailed</i>	26
Figura 21 – Campo <i>Shading:Zone:Detailed</i>	26
Figura 22 – Modelo 3D do apartamento em estudo.....	26
Figura 23 – Ajuste da curva de adsorção higroscópica.....	27
Figura 24 – Campo <i>MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings</i>	28
Figura 25 – <i>Schedule</i> de ventilação constante.....	28
Figura 26 – Campo <i>ZoneInfiltration:DesignFlowRate</i>	29
Figura 27 – <i>Schedule RV1</i>	30
Figura 28 – Campo <i>ElectricEquipment</i>	31
Figura 29 – Campo <i>Output:Variable</i>	32
Figura 30 – Variação das temperaturas interiores dos diversos compartimentos.....	32
Figura 31 – Variação das temperaturas interiores durante o mês de Janeiro.....	33
Figura 32 – Variação anual da temperatura superficial interior do Quarto 1.....	34

Figura 33 – Variação da humidade relativa interior	35
Figura 34 – Variação da humidade relativa na primeira semana de Janeiro	36
Figura 35 – Variação das temperaturas ponto de orvalho durante a primeira semana de Janeiro	37
Figura 36 – Análise da temperatura do Quarto 1 para Janeiro	38
Figura 37 – Frequência acumulada dos valores da Tsi no Quarto 1	39
Figura 38 – Valores médios da Tsi no quarto 1	39
Figura 39 – Análise da Humidade Relativa no Quarto 1 para o mês de Janeiro	40
Figura 40 – Análise da temperatura ponto de orvalho para o quarto 1 no mês de Janeiro	41
Figura 41 – Frequência acumulada dos valores das HRsi no quarto 1	42
Figura 42 – Valores médios e P90 da HRsi no quarto 1	42
Figura 43 - Comparação da temperatura superficial para diferentes Rph no quarto 1	45
Figura 44 - Comparação da concentração de vapor no ar para diferentes Rph no quarto 1	45
Figura 45 – Evolução em Janeiro das temperaturas superficiais com $R_{ph}=0,3h^{-1}$	48
Figura 46 – Evolução em Janeiro das temperaturas superficiais com $R_{ph}=0,6h^{-1}$	48
Figura 47 – Evolução do número de dias em que $TOW>0,5$ com aquecimento contínuo	52
Figura 48 - Evolução do número de dias em que $TOW>0,5$ com aquecimento durante o horário de ocupação	52
Figura 49 - Evolução das temperaturas em Janeiro para um regime de aquecimento contínuo com potência de 200W	53
Figura 50 – Evolução das temperaturas em Janeiro para um regime de aquecimento de ocupação com potência de 200W	54
Figura 51 – Temperaturas interiores.....	55
Figura 52 – Ganhos solares diretos no quarto 1	64
Figura 53 – Ganhos solares difusos no quarto 1	64
Figura 54 – Temperaturas nos dias 5 e 6 de Janeiro.....	65
Figura 55 – Temperaturas no dia 23 de Dezembro.....	66
Figura 56 – Ganhos por convecção para o dia 23 de Dezembro	67
Figura 57 – Ganhos por Radiação Difusa para o dia 23 de Dezembro.....	67
Figura 58 – Temperaturas superficiais e interiores nos dias 5 e 6 de Janeiro.....	70
Figura 59 – Temperaturas superficiais e interiores no dia 23 de Dezembro	70
Figura 60 - Temperaturas superficiais e interiores nos dias 5 e 6 de Janeiro com um aquecedor	71
Figura 61 - Temperaturas superficiais e interiores no dia 23 de Dezembro com um aquecedor.....	72



ÍNDICE DE TABELAS

Quadro 1 – Comparação dos principais valores do EnergyPlus com a Estação Meteorológica	17
Quadro 2 – Constituição das paredes exteriores Sudoeste e Nordeste	18
Quadro 3 – Constituição da Cobertura	18
Quadro 4 – Constituição do Pavimento.....	18
Quadro 5 – Constituição das Paredes Interiores.....	18
Quadro 6 – Constituição da Parede de separação da caixa de escadas	18
Quadro 7 – Características das Janelas	19
Quadro 8 – Regimes de ventilação adotados.....	29
Quadro 9 – Regimes de ventilação variáveis	31
Quadro 10 – Fatores de análise do Quarto 1	43
Quadro 11 – Fatores de análise do Quarto 2	44
Quadro 12 – Fatores de análise da Sala.....	44
Quadro 13 – Nova constituição das paredes exteriores Sudoeste e Nordeste	46
Quadro 14 – Simulações do EnergyPlus para diferentes espessuras de isolamento no Quarto 1	46
Quadro 15 - Simulações do EnergyPlus para diferentes espessuras de isolamento no Quarto 2	47
Quadro 16 - Simulações do EnergyPlus para diferentes espessuras de isolamento na Sala	47
Quadro 17 – Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento contínuo com potência de 200W	49
Quadro 18 - Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento contínuo com potência de 400W	50
Quadro 19 - Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento de 8h com potência de 200W	51
Quadro 20 - Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento de 8h com potência de 400W	51
Quadro 21 – Coeficientes de Transferência de calor	61
Quadro 22 – Áreas dos elementos do quarto 1.....	61
Quadro 23 – Valores das características dos materiais	62
Quadro 24 – Densidade e calor específico do ar	62
Quadro 25 – Resultados da espessura de isolamento	68
Quadro 26 – Resultados da espessura de isolamento com 1 aquecedor	68
Quadro 27 - Comparação de valores obtidos pelo EnergyPlus e pelo Programa de Otimização	69

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

NIT002

e – número de Nepper [$e \approx 2.718$]

P – pressão parcial de vapor de água [Pa]

P_s – pressão de vapor [Pa]

T – temperatura [K]

t – temperatura [°C]

V – volume interior [m^3];

W – humidade absoluta do ar [kg/m^3]

w – produção de vapor no interior [kg/h];

W_e – teor de humidade do ar exterior [kg/kg];

W_i – teor de humidade do ar interior [kg/kg];

W_v – concentração de vapor no ar [kg/m^3]

HR – humidade relativa [%]

Rph – taxa horária de renovação de ar [h^{-1}];

EnergyPlus

C_p^{air} – calor específico do ar [$J/(kg.K)$];

\dot{m}_{inf} – massa de ar infiltrado [kg/s];

\dot{m}_i – fluxo de ar no nó i [kg/s];

W_z^t – humidade da zona [kg/kg];

A_i – área superficial [m^2];

C_p – calor específico do material;

C_T – fator de ponderação da transferência de calor sensível [K/m^3];

C_w – Calor específico da água à temperatura de 20°C [$J/(kg.K)$];

e – espessura [m]

h_i – coeficiente de troca de calor [$W/m^2.K$];

kg_{mass} – massa de vapor de água produzido na zona [kg];

λ – condutibilidade térmica do material;

$N_{surfaces}$ – número total de superfícies na zona;

N_{zones} – número total de zonas;

P_{sat} – pressão de saturação;

Q_i – ganhos internos por convecção [J/s];

Q_{sys} – taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W/s];

Rph – renovações por hora [h^{-1}]

T – temperatura do nó;

i – em estudo;

i+1 – adjacente do lado interior;

i-1 – adjacente do lado exterior;

,novo – no final do intervalo de tempo considerado;

,antigo – no final do intervalo de tempo anterior;

T_{∞} – temperatura do ar infiltrado [K];

t_p – período de um ciclo de variação de humidade

T_{si} – temperatura das superfícies existentes na zona [K];

T_z – temperatura da zona [K];

T_{zi} – temperatura das zonas vizinhas [K];

U - Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m^2C]

V_z – volume da zona [m^3];

W_{∞} - humidade do ar infiltrado [kg/kg];

$W_{surfaces\ i}$ – humidade das superfícies existentes na zona [kg/kg];

W_{zi} – humidade das zonas vizinhas [kg/kg];

δ_M - espessura de penetração de humidade [m];

δ_{sat} – permeabilidade ao vapor do material;

Δt – intervalo de tempo considerado;

Δx – diferença finita de espessura entre camadas;

ξ – capacidade higroscópica do material;

ρ – densidade do material;

ρ – massa volúmica do material;

CTF – Conduction Transference Function;

EMPD – Effective Moisture Penetration Depth;

HAMT – Combined Heat and Moisture Transfer;

RC – regime constante

RV – regime variável

TMY2 - Typical Meteorological Year

Programa de Otimização

$F(x)$ – função escalar não linear diferenciável;

$f(x)$ – vetor de funções diferenciáveis;

x – variáveis não lineares;

y – variáveis lineares;

T_t – temperatura média do ar interior no instante de tempo t ;

x_n^{mw} – espessura do isolamento térmico do elemento opaco n ;

T_{lt}^S – temperatura superficial interior da superfície l no instante de tempo t ;

N_t – número de intervalo de tempo em análise;

Q_{ot} – ganhos internos no instante de tempo t ;

N_p – número de elementos opacos;

N_{ij} – número de elementos opacos de tijolo;

N_s – número de superfícies;

h_l – coeficiente de transferência da superfície l ;

A_l – área da superfície l ;

m_{inf} – massa de ar infiltrado [kg/s];

T_t^{ext} – temperatura do ar exterior no instante de tempo t ;

T_t^c – temperatura do ar exterior no instante de tempo t se j é o elemento opaco teto. Caso contrário, temperatura do ar interior no instante de tempo t ;

$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)$ – energia armazenada no ar no espaço de tempo Δt ;

$T_{t-\Delta t}$ – temperatura média do ar interior no 1º instante anterior ao instante t ;

$T_{t-2\Delta t}$ – temperatura média do ar interior no 2º instante anterior ao instante t ;

$T_{t-3\Delta t}$ – temperatura média do ar interior no 3º instante anterior ao instante t ;

ρ – densidade do material;

C_p – calor específico do material;

x – espessura do material;

λ – condutibilidade térmica do material;

T_{po} – temperatura ponto de orvalho;

T_{min} – temperatura mínima [°C];

T_{\max} – temperatura máxima [°C];

Δt – intervalo de tempo considerado;

$t-1$ – instante de tempo anterior ao instante t ;

P – percentagem (0,8);

RD^t – ganhos solares distribuídos pelas superfícies no instante t [J];

ρ^{ar} – massa volúmica do ar [kg/m³];

C_p^{ar} - calor específico do ar [J/(kg.K)];

V – volume da divisão [m³];

R – ganhos solares diretos [J];

P_d – percentagem de distribuição dos ganhos solares diretos pelas superfícies (0,6);

D – ganhos solares difusos [J];

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O conforto térmico e qualidade do ar interior são, na atualidade, fatores predominantes para os utilizadores.

Hoje em dia as pessoas passam cada vez mais tempo dentro de casa. Este fato, aliado à crescente estanquidade das habitações, provoca um decréscimo da qualidade do ar interior e, conseqüente aparecimento de problemas de saúde.

Por outro lado quando um edifício não é construído de forma a responder da melhor maneira ao clima local podem surgir fungos resultantes de condensações superficiais.

A ventilação é um processo decisivo para o controlo desses fatores.

Por um lado o nível de exigência dos utilizadores aumentou, contudo com esse aumento também subiram os gastos energéticos. Assim foi necessário encontrar soluções para contrabalançar estes dois fatores.

De forma a estudar como prevenir potenciais problemas e como os resolver existem diversos programas de simulação higrotérmica. No presente trabalho é utilizado o software EnergyPlus que permite simular o comportamento higrotérmico de um edifício em regime dinâmico. De seguida, como meio de apoio à reabilitação, utilizou-se um programa de otimização cujos dados inseridos foram fornecidos pelo EnergyPlus. No caso em estudo o programa de otimização foi utilizado no estudo da espessura da camada de isolamento da envolvente opaca da habitação e da energia de aquecimento necessária para eliminar o risco de desenvolvimento de fungos.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação é a otimização da resistência térmica da envolvente opaca de um apartamento localizado na cidade do Porto.

Para tal é necessário cumprir objetivos parciais de forma a atingir o objetivo principal, nomeadamente:

- Estudo da geometria do apartamento em estudo;
- Estudo dos elementos construtivos e suas propriedades;
- Aprendizagem do funcionamento do EnergyPlus e da sua metodologia de cálculo das variáveis pretendidas;
- Avaliação do apartamento em termos do seu comportamento higrotérmico;
- Calibração do programa de otimização;
- Comparação de resultados do programa de otimização com o EnergyPlus;

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

No capítulo 1 precede-se ao enquadramento do tema, definição dos principais objetivos da dissertação e consequente organização do texto.

No capítulo 2 aborda-se conhecimentos base necessários ao trabalho desenvolvido: a avaliação teórica do desenvolvimento de fungos, introdução à modulação com o EnergyPlus explicando as bases de cálculo para os principais outputs necessários e por fim uma introdução à plataforma GAMS/MINOS utilizada no processo de otimização.

No capítulo 3 é feita uma introdução do apartamento em estudo, um apartamento no Porto, caracterizando a envolvente, a sua utilização e ventilação adotada.

A simulação com o EnergyPlus é efectuada no capítulo 4 onde são enfatizados os vários parâmetros necessários à simulação bem como as variáveis de saída (outputs). Esses outputs são depois analisados e processados conseguindo assim obter as temperaturas do ar, superficiais e as humidades relativas.

O capítulo 5 é dividido em cinco partes. Na primeira parte é feita uma introdução ao processo de otimização e a sua formulação, na segunda parte é focada nos dados introduzidos no programa, na terceira parte definem-se os dias a otimizar, na quarta e quinta parte são apresentados os resultados do programa de otimização para as situações de só isolamento e isolamento com aquecimento respetivamente, e a sexta e ultima parte faz-se uma comparação dos resultados do programa de otimização com os resultados do EnergyPlus.

No capítulo 6 referem-se as conclusões gerais assim como possíveis desenvolvimentos futuros.

2

FUNDAMENTOS

2.1. AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS

2.1.1. DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS

Os fungos são seres vivos pertencentes ao reino *Fungi*. Durante muitos anos foram considerados parte do reino das plantas, contudo por possuírem algumas características próprias entre as quais o facto de não sintetizarem clorofila, não terem celulose na sua parede celular (exceptuando alguns fungos aquáticos) e não armazenarem amido como substância de reserva passaram, a partir de 1969 a ser considerados num reino à parte [1].

Os fungos multicelulares são constituídos por uma rede de filamentos ramificados chamados hifas. Estas contêm citoplasma e núcleos e podem apresentar diferentes formas. As hifas iniciam-se como formações tubulares que, a partir de esporos, se ramificam continuamente formando uma rede mais ou menos densa de filamentos, o micélio.

Em muitos fungos as hifas possuem septos que delimitam compartimentos correspondentes a células. O aspecto filamentoso do micélio confere-lhe uma grande superfície, através da qual se realiza a absorção de nutrientes. Esta rede de filamentos estende-se rapidamente em todas as direcções através da fonte de alimento. Por vezes as hifas organizam-se formando corpos compactos como, por exemplo, nos cogumelos [2].

Na construção o desenvolvimento de fungos é condicionado por diversos fatores. Existe a infestação pelo exterior. Os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento estão presentes nas superfícies dos elementos construtivos. A temperatura ideal encontra-se no intervalo entre 22°C e 35°C, contudo, dependendo da espécie e da fase de desenvolvimento este intervalo pode variar entre -8°C e 60°C. O pH das superfícies dos elementos construtivos varia entre 2 e 11. A radiação e a velocidade do ar são fatores que podem definir o tipo de fungos que se vão desenvolver.

A humidade dos elementos construtivos é o fator decisivo para o desenvolvimento de fungos em edifícios. A maneira mais fácil de analisar a humidade é medindo a humidade relativa do ar. Para as espécies de fungos que normalmente se desenvolvem nos elementos construtivos a humidade relativa situa-se entre 70% e 100% [5].

Assim a única forma de controlar o desenvolvimento de fungos sem recorrer a fungicidas é ter a certeza que a humidade não ultrapassa os valores necessários para o desenvolvimento de fungos [3].

2.1.2. CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS

A presença de humidades superficiais num elemento construtivo é uma patologia que tem vindo a ganhar cada vez mais importância na indústria da construção. Para além de ser esteticamente desagradável pode provocar riscos para a saúde e propiciar o desenvolvimento de fungos. O conforto de um apartamento está diretamente relacionado com este aspeto, tornando a sua prevenção um dos desafios dos projetistas.

As condensações superficiais ocorrem quando a temperatura superficial é menor que a temperatura de ponto de orvalho. A temperatura de ponto de orvalho define-se como a temperatura limite de saturação, ou seja, é a temperatura em que o vapor de água presente num determinado ambiente passa ao estado líquido. Pode ser determinado pelo método gráfico ou matematicamente.

O método gráfico utilizado é baseado no diagrama psicrométrico em que para cada valor da temperatura e humidade relativa temos uma temperatura de ponto de orvalho correspondente à intersecção da combinação das temperaturas e humidades relativas com a curva da humidade relativa a 100%. A figura 1 demonstra este método.

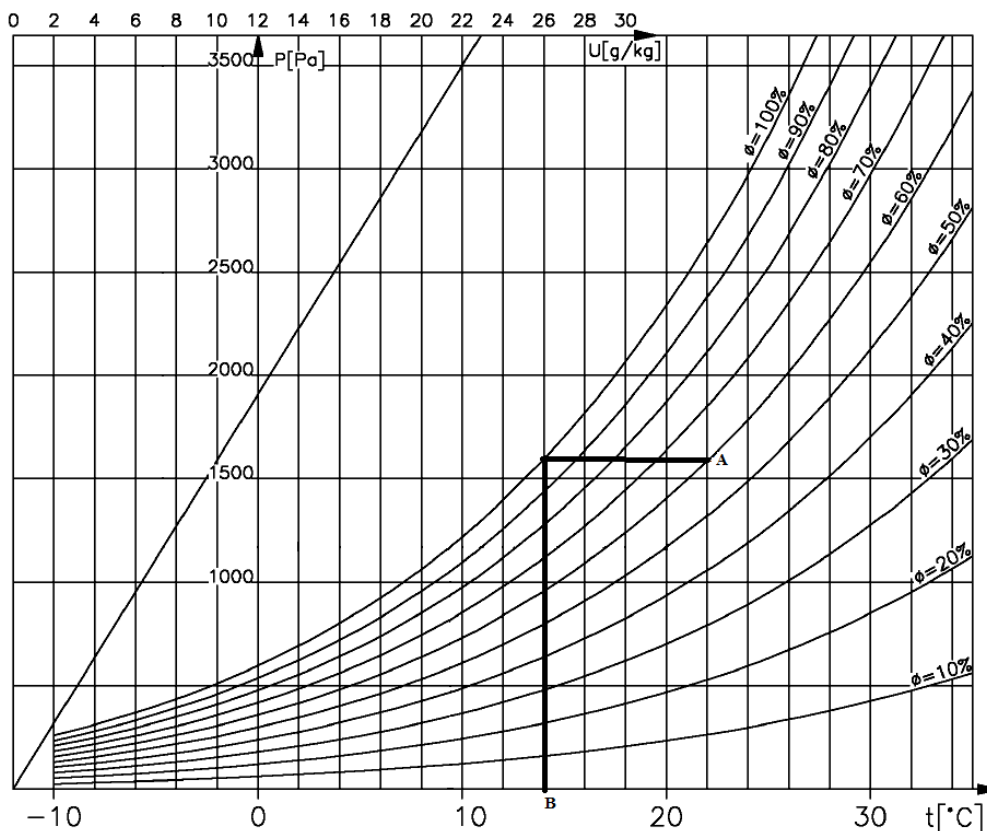


Figura 1 – Diagrama Psicrométrico. Adaptado de [3]

O ponto A corresponde à combinação de temperatura e humidade relativa, o ponto B corresponde à temperatura de ponto de orvalho correspondente.

Pode recorrer-se a equações de forma a tratar numericamente os parâmetros que caracterizam a humidade. Para tal é seguida a metodologia proposta na NIT002 [4] a qual é descrita de seguida.

A partir da temperatura superficial calcula-se a pressão de saturação utilizando a fórmula (1) [4]:

$$P_s = 611 \times e^{\frac{a \times t}{t'+t}} \quad (1)$$

Em que:

P_s – pressão de vapor [Pa]

e – número de Nepper [$e \approx 2.718$]

t – temperatura [°C]

No caso em estudo as temperaturas são sempre maiores que zero, assim $a=17.08$ e $t'=234.18^\circ\text{C}$.

No entanto para o cálculo da humidade relativa superficial é necessária a humidade absoluta do ar em kg/m^3 , utilizando a fórmula (2) obtém-se o parâmetro pretendido [4].

$$W = 2.167 \times 10^{-3} \times \frac{P}{T} \quad (2)$$

Em que:

W – humidade absoluta do ar [kg/m^3]

P – pressão parcial de vapor de água [Pa]

T – temperatura [K]

Por fim obtém-se a humidade relativa superficial interior:

$$\text{HR} = \frac{W_v}{W} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

HR – humidade relativa [%]

W_v – concentração de vapor no ar [kg/m^3]

No caso em estudo será utilizada a equação (4) para determinar a humidade relativa superficial.

$$\text{HR} = \frac{T_{po}}{T_{si}} \times 100 \quad (4)$$

As condensações superficiais ocorrem quando a temperatura à superfície de um elemento construtivo é inferior à temperatura de ponto de orvalho ou quando a humidade relativa superficial é 100%.

2.1.3. TIME OF WETNESS

De forma a se poder avaliar o efeito da variação de humidade em elementos construtivos na formação de fungos é sugerida uma avaliação baseada no conceito de Time of Wetness (TOW). O TOW consiste no rácio entre o período húmido ($HR > 80\%$) e a duração total do período. Normalmente considera-se um período de 24 horas [5].

A suposição por trás deste método baseia-se no fato de que existe crescimento de fungos se um certo valor limite é excedido, indicado em horas por dia, em que a humidade relativa é superior a 80% [5].

Experimentalmente foi determinado que o fungo *Penicillium chrysogenum* tem um fraco crescimento numa superfície de reboco para um TOW inferior a 0,5. Em contraste existe uma forte incidência do fungo com valores de TOW superiores a 0,5 [5].

O valor de humidade relativa durante os períodos secos não tem qualquer efeito no desenvolvimento de fungos. As experiências levadas a cabo por Adan para determinar qual o efeito provocado por mudanças rápidas de humidade relativa provou que a frequência quase não tem influência no crescimento de fungos [5].

A figura 2 mostra o método gráfico de determinação do fator TOW [6].

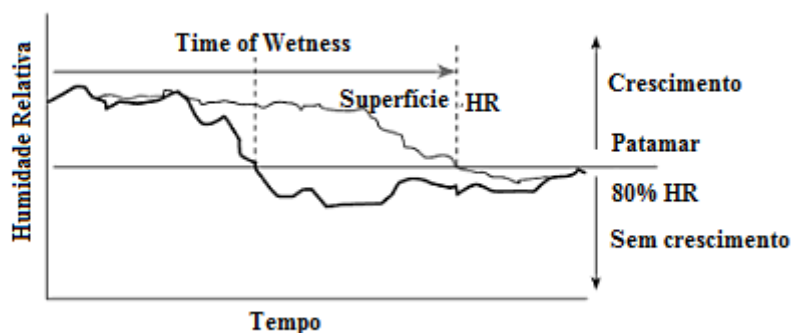


Figura 2 – Esquema de representação do fator Time of Wetness [6]

2.1.4. ISO 13788

De acordo com a norma ISO 13788 [7] existe um risco de crescimento de fungos quando a humidade relativa superficial é superior a 80% durante vários dias. Para prevenir esta situação a norma define uma metodologia de cálculo de forma a determinar a temperatura superficial mínima a partir da humidade relativa superficial [7].

Para além do clima exterior existem três parâmetros que influenciam as condensações superficiais e crescimento dos fungos. A qualidade térmica representada pela resistência térmica, pontes térmicas, geometria e resistência superficial da envolvente do edifício, a produção de vapor interior e a temperatura interior e sistema de aquecimento [7].

De forma a prevenir o crescimento de fungos é descrita uma metodologia em que os passos principais são a determinação da humidade relativa interior seguida do cálculo da humidade de saturação ou pressão de vapor baseado humidade relativa necessária à superfície. De seguida determina-se a temperatura superficial mínima a partir dos valores encontrados e assim a qualidade térmica da

envolvente do edifício está determinada. Esta metodologia é feita para cada mês do ano, e o mês que tiver o fator de temperatura mínima mais elevado é considerado o mês crítico [7].

2.2. MODELAÇÃO HIGROTÉRMICA COM O PROGRAMA ENERGYPLUS

2.1.1 INTRODUÇÃO

O programa EnergyPlus deriva dos programas DOE-2 e BLAST criados no final dos anos 70 e início dos anos 80 como ferramentas para melhorar a resposta energética dos edifícios face à crise energética do início dos anos 70. Assim o EnergyPlus tem o objetivo de analisar o consumo de energia e a carga térmica de um edifício durante um período de tempo [8].

O programa permite uma definição dos intervalos de tempo para interação entre zonas térmicas e o ambiente e os sistemas AVAC. O facto de se poder utilizar ficheiros climáticos padrão para cada zona do globo permite uma análise mais correta da edificação. É possível simular a troca de calor entre elementos construtivos, trocas de calor com o terreno e combinar a humidade com a adsorção/desorção. Contém modelos de conforto dos utilizadores, modelação de janelas, controlo de luminosidade no interior bem como inclusão e controlo de sistemas de AVAC entre outras características e funcionalidades [8].

Neste capítulo serão descritos as metodologias de cálculo que foram necessárias para a elaboração desta dissertação pois uma descrição exaustiva do programa é demasiado extensa e desnecessária neste trabalho.

As metodologias descritas são baseadas nas fórmulas matemáticas do programa utilizadas nas simulações de transferência de calor do edifício.

2.2.1. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TEMPERATURA INTERIOR

O cálculo da temperatura interior é efetuado com base num balanço energético onde são incluídas as componentes que traduzem as trocas de calor com a zona em estudo. Assim a equação que traduz as trocas de calor é a seguinte [9]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (5)$$

Onde:

$$C_z = \rho_{air} C_p^{air} C_T$$

ρ_{air} - massa volúmica do ar [kg/m^3];

C_p^{air} - calor específico do ar da zona [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$];

C_T - fator de ponderação da transferência de calor sensível [K/m^3];

\dot{Q}_{sys} - taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W/s];

\dot{Q}_i - ganhos internos por convecção [J/s];

$N_{surfaces}$ - número total de superfícies na zona;

N_{zones} – número total de zonas;

\dot{m}_{inf} – massa de ar infiltrado [kg/s];

\dot{m}_i – fluxo de ar no nó i [kg/s];

C_p^{air} – calor específico do ar [J/(kg.K)];

T_z – temperatura da zona [K];

T_{zi} – temperatura das zonas vizinhas [K];

T_∞ – temperatura do ar infiltrado [K];

T_{si} – temperatura das superfícies existentes na zona [K];

h_i – coeficiente de troca de calor [W/m².K];

A_i – área superficial [m²];

A energia total armazenada no ar interior da zona ($C_z \frac{dT_z}{dt}$) obtém-se através da soma dos ganhos internos por convecção ($\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i$), com a transferência de calor por convecção originárias das superfícies na zona ($\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$), com a transferência de calor devido à mistura de ar de diferentes zonas ($\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z)$), com a transferência de calor devido à infiltração de ar exterior ($\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z)$) e a taxa de troca de calor entre o interior da zona e o sistema de climatização ($\dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_\infty - T_z)$).

2.2.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA HUMIDADE RELATIVA INTERIOR

Como já foi referido a humidade relativa interior é um fator preponderante do comportamento higrotérmico de uma habitação, assim é necessário determinar o seu valor.

O EnergyPlus faz um balanço entre fluxos tal como se demonstra na equação (6) [10].

$$\rho_{air} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{m}_{kg_{mass}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air} (W_{surfaces_i} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t) + \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t) \quad (6)$$

Onde:

V_z – volume da zona [m³];

C_w – Calor específico da água à temperatura de 20°C [J/(kg.K)];

$W_{surfaces_i}$ – humidade das superfícies existentes na zona [kg/kg];

W_z^t – humidade da zona [kg/kg];

W_{zi} – humidade das zonas vizinhas [kg/kg];

W_∞ - humidade do ar infiltrado [kg/kg];

kg_{mass} – massa de vapor de água produzido na zona [kg];

A variação de humidade do ar na zona ($\rho_{air} V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$) é calculada através da soma da quantidade, em massa, de vapor de água produzido na zona ($\sum_{i=1}^{N_{sf}} k g_{mass}$), com a transferência de vapor de água por convecção entre o ar e a superfície das paredes ($\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air} (W_{surfaces_i} - W_z^t)$), com a troca de vapor de água entre diversas zonas ($\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$), com os ganhos/perdas de vapor de água por infiltração ($\dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t)$) e com a adição/remoção de vapor de água pelo sistema AVAC ($\dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)$).

2.2.3. EMPD

Os modelos utilizados pelo EnergyPlus de forma a calcular os parâmetros apresentados são:

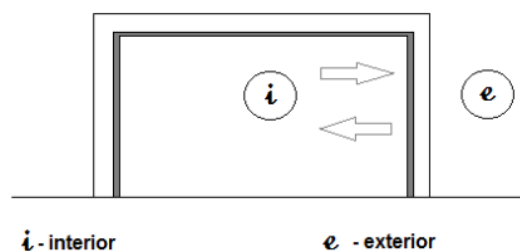
- Modelo CTF – Conduction Transference Function;
- Modelo HAMT – Combined Heat and Moisture Transfer;
- Modelo EMPD – Effective Moisture Penetration Depth;

O modelo CTF é o mais utilizado para simular a transferência de calor através da envolvente opaca. Recorre a algumas simplificações em relação aos restantes modelos e não permite avaliar a transferência de humidade para os elementos da envolvente [11] [12].

O modelo HAMT é, dos três, o mais rigoroso e complexo, logo para a sua utilização é exigida uma maior quantidade de dados que não são pedidos nos outros modelos. Este modelo permite assim fazer uma análise mais exata do comportamento dos elementos construtivos [11].

No modelo EMPD é feita uma abordagem um pouco mais complexa para simular a adsorção e desadsorção de vapor de água pelas superfícies numa zona do que o modelo CTF. Ao contrário do HAMT, que permite determinar as variáveis higrotérmicas em cada camada do elemento construtivo, o EMPD considera que apenas uma fina camada à superfície interior realiza trocas de vapor de água com o ar interior. Como consequência é desprezada a difusão de vapor de água entre o exterior e o interior através das paredes. Esta camada adsorve e liberta humidade para o compartimento quando exposta a variações de humidade no ar [12] [13].

A figura 3 representa a ideia base do modelo EMPD, onde a camada interior efetua trocas de vapor de água com o interior [14].



2.2.4. CONDIÇÕES NA SUPERFÍCIE INTERIOR

A humidade relativa superficial no interior da parede é um fator fundamental no comportamento higrotérmico do edifício. O software EnergyPlus não consegue, utilizando o modelo EMPD, determinar diretamente os valores da humidade, assim é necessário calcular a partir dos dados fornecidos pelo programa. O programa fornece os valores da temperatura superficial interior em °C e a concentração de vapor no ar em kg/m³. Assim é necessário descrever a metodologia de cálculo do EnergyPlus para a temperatura superficial interior.

Os modelos atuais do programa incluem na sua metodologia de cálculo a simulação dos movimentos de fluxo de calor nas construções de forma a incluir mudanças de fase. Permitem da mesma forma a modelação de diferentes camadas do elemento construtivo e possibilita ainda uma simulação do comportamento térmico do edifício em curtos espaços de tempo de forma a dar resultados semelhantes aos do sistema real [15].

O programa tem assim um algoritmo incluído que desempenha essas funções utilizando um sistema de diferenças finitas de condução diferencial do calor numa rede constituída por diferentes nós. A sua formulação corresponde à equação (7) [16].

$$\frac{\rho C_p \Delta x (T_{i,novo} - T_{i,antigo})}{\Delta t} = \frac{\lambda (T_{i-1,novo} - T_{i,novo})}{\Delta x} + \frac{\lambda (T_{i+1,novo} - T_{i,novo})}{\Delta x} \quad (7)$$

Em que:

ρ – densidade do material;

Δt – intervalo de tempo considerado;

Δx – diferença finita de espessura entre camadas;

C_p – calor específico do material;

λ – condutibilidade térmica do material;

T – temperatura do nó;

i – em estudo;

$i+1$ – adjacente do lado interior;

$i-1$ – adjacente do lado exterior;

,novo – no final do intervalo de tempo considerado;

,antigo – no final do intervalo de tempo anterior;

2.3. OTIMIZAÇÃO RECORRENDO À PLATAFORMA GAMS/MINOS

A plataforma GAMS é utilizada, no âmbito desta dissertação, para desenvolver o programa de otimização necessário para minimizar a espessura de isolamento a colocar na parede exterior do apartamento bem como a potência do equipamento de aquecimento a utilizar se necessário.

O código utilizado na programação é o programa comercial MINOS, que permite resolver problemas de programação linear e não linear. Os resultados obtidos com o MINOS são ótimos locais [15].

As funções não lineares devem ser diferenciáveis. Num problema deste tipo pode definir-se uma região constituída pelas restrições lineares e pelos limites das variáveis. Se as funções não lineares na função objetivo, $F(x)$, e nas restrições, $f(x)$, forem convexas dentro dessa região, qualquer solução ótima local encontrada pelo programa será um ótimo global. Caso contrário apenas se obtém um ótimo local [15].

Uma forma de tentar encontrar o ótimo global consiste em escolher pontos iniciais que estejam ‘suficientemente próximos’ do ótimo global. No entanto, não existe nenhuma metodologia sistemática para escolher os pontos iniciais, nem de verificar se estes estão próximos do ótimo global [15].

O programa GAMS permite introduzir valores para diferentes parâmetros que controlam a simulação. Alterar o valor desses parâmetros é um processo acessível, o que poderá facilitar o processo de otimização [15].

DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1. INTRODUÇÃO

Os bairros sociais da cidade do Porto surgiram no final do século XIX para dar resposta ao rápido crescimento da população provocado pelo desenvolvimento industrial do Porto. Esse desenvolvimento provocou um crescimento acentuado dos preços das habitações, assim surgiram concentrações de pequenos alojamentos com poucas condições de habitabilidade. Estas concentrações surgiram principalmente nas freguesias periféricas onde se concentra a maioria dos estabelecimentos industriais. Na presença deste cenário existiram algumas iniciativas de melhoria das condições de vida por parte tanto da Câmara como do Estado, sendo que iniciativas privadas foram muito pontuais [17].

Hoje em dia, devido à sua idade bem como às ações dos utilizadores, grande parte dos bairros sociais estão em mau estado de conservação. Aliado a este fato, o pequeno poder económico das famílias residentes não lhes permite, na maior parte dos casos, ter aquecimento constante. Assim as famílias tapam as passagens de ar das habitações para reter o calor. Esta medida tem o inconveniente de baixar as renovações de ar nos apartamentos.

O caso de estudo é um apartamento de tipologia T3 no topo do edifício ladeado por dois outros apartamentos, tendo assim duas frentes, uma voltada a Nordeste e outra a Sudoeste. Na figura 4 é identificado o apartamento na fachada do edifício em que está inserido.

Este bairro social, onde se localiza o apartamento, foi recentemente alvo de reabilitação por parte da Câmara do Porto de forma a melhorar as condições de vida dos moradores.



Figura 4 – Fachada Sudoeste do edifício em estudo [14]

3.2. LOCALIZAÇÃO E CLIMA

O apartamento em estudo nesta dissertação situa-se no bairro social de Lordelo na freguesia de Lordelo do Ouro. Construído em 1978, na freguesia de Lordelo do Ouro, o bairro é constituído por 179 fogos distribuídos por quatro blocos (12, 13, 14 e 15), onde residem, actualmente, cerca de 450 portuenses, tendo sido objecto de obras profundas de requalificação exterior, realizadas em duas fases distintas. Numa primeira fase foram intervencionados dois blocos (13 e 14) e, na seguinte, os restantes (12 e 15) [18].

De um modo geral, as intervenções contemplaram a reabilitação total das fachadas, substituição das caixilharias e colocação de vidros duplos, aplicação de marquises, fecho das caixas de escada e iluminação, colocação de caixas de correio e marmorite nas zonas comuns, substituição e ventilação das coberturas e renovação das infra-estruturas eléctricas, telefónicas e TV Cabo [18].

Estando localizado na cidade do Porto o apartamento está sujeito às condições climatéricas da cidade. Assim utilizando o ficheiro climático do Porto o EnergyPlus fornece-nos os dados necessários à sua caracterização. Podemos assim concluir que as temperaturas variam entre 0°C e 32°C com uma média anual de 14.3°C. A figura 5 demonstra as variações de temperatura ao longo do ano para a cidade do Porto.

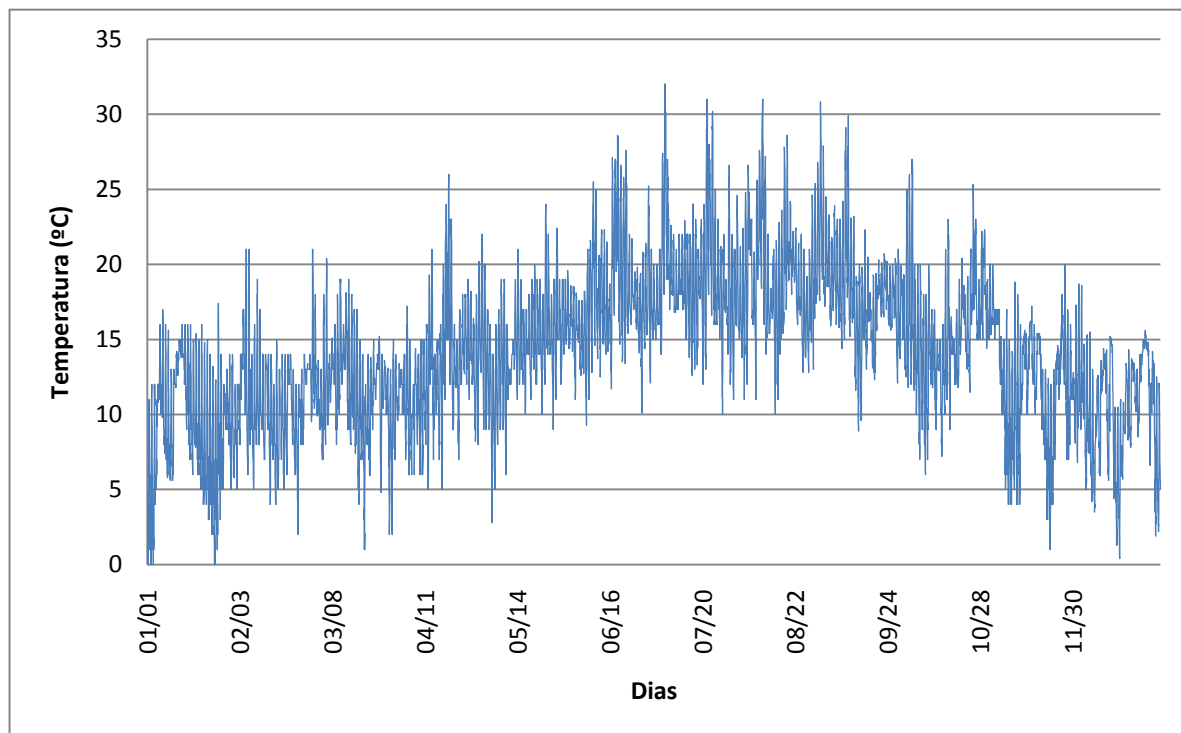


Figura 5 – Variação das temperaturas na cidade do Porto

O EnergyPlus utiliza como ficheiro climático um ficheiro no formato EPW, derivado do Typical Meteorological Year (TMY2) utilizado nos programas BLAST e DOE-2. Contudo o TMY2 não permite a simulação com intervalos de tempo inferiores a uma hora, assim foi necessário desenvolver um novo e generalizado formato para dados climáticos [19].

Este formato utilizado pelo EnergyPlus permite assim, para além de permitir simulações com intervalos de tempo inferiores a uma hora, a inclusão de identificadores de localização que contêm as seguintes características [19]:

- Nome do local
- Latitude
- Longitude
- Fuso horário
- Altitude
- Temperaturas do solo

No entanto as condições climáticas são baseadas em valores médios. No âmbito desta dissertação realizou-se uma comparação dos valores medidos pela estação climática do LFC-FEUP. Os dados disponíveis vão desde um de Março a trinta de Setembro.

No âmbito desta dissertação comparou-se as diferenças entre a temperatura e a humidade relativa exterior. As figuras 6 e 7 demonstram a variações ao longo do ano das duas variáveis para os dados fornecidos pelo EnergyPlus e pela estação climática. O quadro 1 mostra as diferenças entre os valores máximos, mínimos e médios.

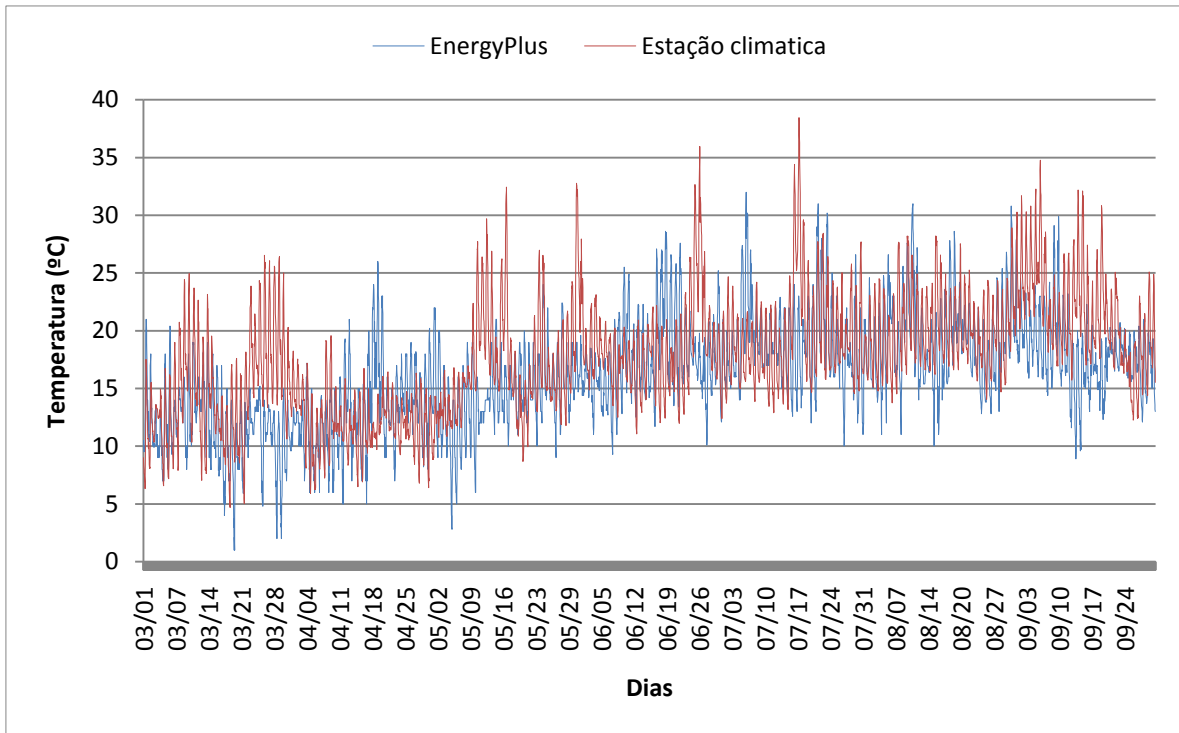


Figura 6 – Comparação das Temperaturas exteriores

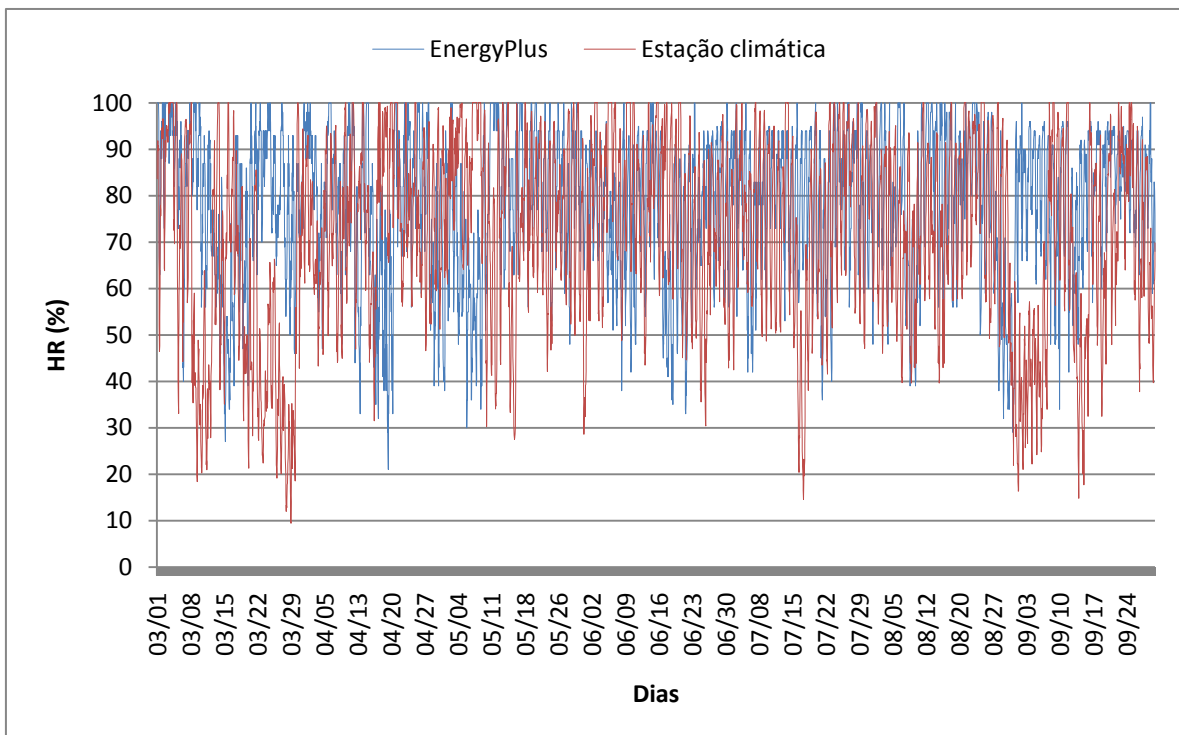


Figura 7 – Comparação das Humidades Relativas exteriores

Quadro 1 – Comparação dos principais valores do EnergyPlus com a Estação Meteorológica

	Temperatura (°C)		Humidade Relativa (%)	
	EnergyPlus	Estação	EnergyPlus	Estação
Média	16,22	17,64	78	72
Máximo	32	38,45	100	100
Mínimo	1	4,7	21	9
P90	22	24,12	95	97
P10	10,4	11,43	55	42

Como se pode observar a partir do Quadro 1 existem algumas diferenças substanciais entre os valores fornecidos pelo EnergyPlus e os medidos pela estação climática em 2012, sendo de nota os valores máximos e mínimos da temperatura e a humidade relativa mínima.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE

Um dos fatores de maior importância na modelação higratérmica é a envolvente. Com a definição de conforto a ganhar cada vez mais relevo na construção civil a constituição dos elementos construtivos e as suas características têm sido objeto de estudo na área da Física das Construções. A envolvente opaca, responsável pelas trocas de energia entre o interior e o exterior, necessita de ser estudada de forma a melhor responder às interações entre o edifício e o meio ambiente.

O apartamento em estudo tem uma tipologia T3 com um quarto voltado a Nordeste e os restantes dois voltados a Sudoeste. Na modelação consideramos sete zonas térmicas:

- Quarto 1 – zona 1
- Casa de banho – zona 2
- Sala – zona 3
- Cozinha e lavandaria – zona 4
- Quarto 2 – zona 5
- Quarto 3 – zona 6
- Caixa de escadas – zona 7

A figura 8 representa as diferentes zonas da habitação

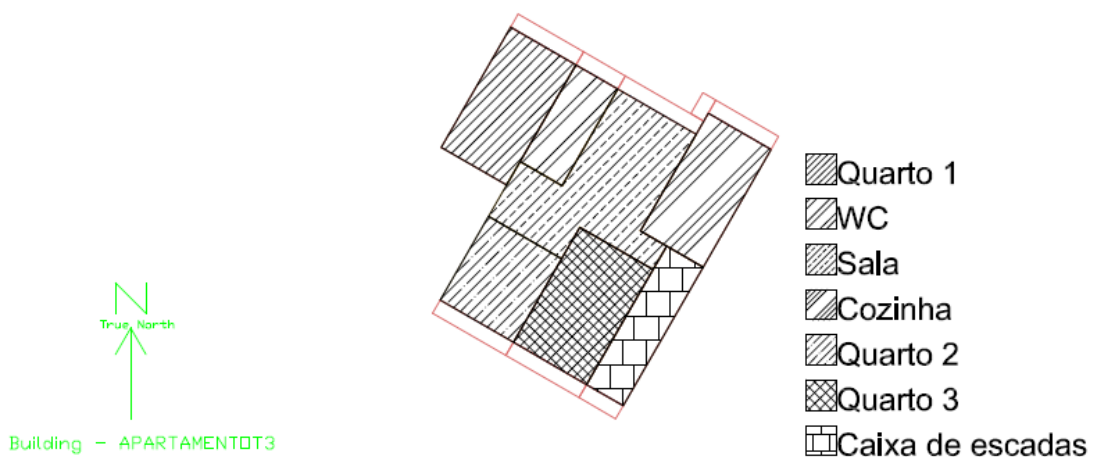


Figura 8 – Planta da habitação

Quanto à composição dos elementos construtivos os quadros 2 a 7 contêm a sua descrição e os materiais utilizados.

Quadro 2 – Constituição das paredes exteriores Sudoeste e Nordeste

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]
Tijolo face à vista	0,11	0,861	1788	868
Caixa de ar	0,04	0,23	1,3	1000
Tijolo vazado	0,11	0,42	900	850
Reboco	0,02	0,8	1900	850

Quadro 3 – Constituição da Cobertura

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]
Poliestireno Extrudido	0,08	0,04	20	1500
Betão	0,25	0,42	2104	776

Quadro 4 – Constituição do Pavimento

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]
Cerâmica vidrada	0,005	1,2	2000	850
Camada de Regularização	0,05	0,46	1200	850
Betão	0,25	0,42	2104	776
Reboco	0,02	0,8	1900	850

Quadro 5 – Constituição das Paredes Interiores

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]
Reboco	0,015	0,8	1900	850
Tijolo Vazado	0,07	0,42	900	850
Reboco	0,015	0,8	1900	850

Quadro 6 – Constituição da Parede de separação da caixa de escadas

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]
Betão	0,2	1,373	2104	776

Quadro 7 – Características das Janelas

Janelas	U [W/m ² .K]	Fator Solar	Transmissão luminosa
Janela Giratória – Quartos e Instalações Sanitárias	2,8	0,78	0,8
Janela de Correr – Sala	3	0,78	0,8
Janela de Correr - Lavandaria	4,8	0,82	0,8
Janela da Caixa de Escadas	4,8	0,82	0,8

3.4. GANHOS INTERNOS

Define-se por ganhos internos os ganhos de calor derivados dos ocupantes e iluminação.

Para a quantificação do calor produzido pelos habitantes do apartamento é necessário recorrer à norma ISO 7730 onde existe um quadro que nos indica a produção de calor em função de diferentes atividades. No caso em estudo considerou-se que dentro da habitação só teríamos atividade sedentária, o que de acordo com a norma ISO 7730 corresponde a uma taxa metabólica de 70W/m², considerando a área da pele 1,8m² concluímos que a taxa metabólica corresponde a uma produção de 126W/pessoa no interior de cada divisão [11]. A figura 9 demonstra o campo no EnergyPlus onde se inserem estes fatores.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		Pessoas "Cávéedel"	Pessoas "Sala"	Pessoas "Cozinhael"	Pessoas "Quarto1"	Pessoas "Quarto2"	Pessoas "Quarto3"	"banhos"	"cozinhar"
Zone or ZoneList Name		Z2-Casa de Banho	Z3-Sala	Z4-CozinhaeLavanc	Z1-Quarto1	Z5-Quarto 2	Z6-Quarto 3	Z2-Casa de Banho	Z4-CozinhaeLavanc
Number of People Schedule Name		sch_ocupação_Z2	sch_ocupação_Z3	sch_ocupação_Z4	sch_ocupação_Z1	sch_ocupação_Z12	sch_ocupação_Z12	banho	cozinhar
Number of People Calculation Method		People	People	People	People	People	People	People	People
Number of People		1	5	5	2	2	1	1	1
People per Zone Floor Area	person/m2								
Zone Floor Area per Person	m2/person								
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	0	0
Activity Level Schedule Name		sch_actividade	sch_actividade	sch_actividade	sch_actividade	sch_actividade	sch_actividade	banho	cozinhar
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W								
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		No	No	No	No	No	No	No	No
Mean Radiant Temperature Calculation Type									
Surface Name/Angle Factor List Name									
Work Efficiency Schedule Name									
Clothing Insulation Schedule Name									
Air Velocity Schedule Name									
Thermal Comfort Model 1 Type									
Thermal Comfort Model 2 Type									
Thermal Comfort Model 3 Type									
Thermal Comfort Model 4 Type									

Figura 9 – Campo *People* no EnergyPlus

Para a iluminação considera-se uma potência de 15W/m², e como horário de utilização o mesmo horário de ocupação das zonas.

No entanto estes valores não podem estar sempre ativos no apartamento, assim foi necessário definir horários de utilização das diversas zonas da habitação em que se definia o número de ocupantes e o tempo em que permaneciam nas zonas durante um dia típico:

- A zona da cozinha e lavandaria têm durante a semana uma utilização das [10:00-11:00] e das [19:00-20:00] e aos fins-de-semana das [11:00-12:00] e das [19:00-20:00];
- A sala tem uma utilização semanal das [21:00-24:00];
- A casa de banho tem durante a semana uma utilização das [09:00-10:00] e das [21:00-22:00] e aos fins-de-semana das [10:00-11:00] e das [19:00-20:00];

- Os quartos têm uma ocupação semanal das [24:00-08:00];

A figura 10 mostra alguns dos horários de utilização inseridos no EnergyPlus de forma a podermos obter uma simulação higrotérmica credível.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		sch_schviddsch	Sch_Palas	sch_ocupação_24	sch_infiltração_Z12	sch_infiltração_Z7	sch_ocupação_23	sch_ocupação_22	sch_ocupação_Z12	sch_infiltração_gen	sch_fechar
Schedule Type Limits Name		any number	any number	any number	any number	any number	any number	any number	any number	any number	any number
Field 1	varies	Through:12/31	through:12/31	Through:12/31	Through:5/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31
Field 2	varies	For:alldays	For:alldays	For:weekdays	For:alldays	For:alldays	For:alldays	For:weekdays	For:alldays	For:alldays	For:alldays
Field 3	varies	Until:24:00	Until:24:00	Until:10:00	Until:24:00	Until:24:00	Until:21:00	Until:9:00	Until:8:00	Until:24:00	Until:24:00
Field 4	varies	126	0	0	4	1	0	0	1	1	0
Field 5	varies			Until:11:00	Through:09/30		Until:24:00	Until:10:00	Until:24:00		
Field 6	varies			1	For:alldays		1	1	0		
Field 7	varies			Until:19:00	Until:8:00			Until:21:00			
Field 8	varies			0	1			0			
Field 9	varies			Until:20:00	Until:22:00			Until:22:00			
Field 10	varies			1	4			1			
Field 11	varies			Until:24:00	Until:24:00			Until:24:00			
Field 12	varies			0	1			0			
Field 13	varies			For:weekends	Through:12/31			For:weekends			
Field 14	varies			Until:11:00	For:alldays			Until:10:00			
Field 15	varies			0	Until:24:00			0			
Field 16	varies			Until:12:00	4			Until:11:00			
Field 17	varies			1				1			
Field 18	varies			Until:19:00				Until:19:00			

Figura 10 – Campo *Schedule:Compact* no EnergyPlus

3.5. RENOVAÇÃO DE AR

A renovação do ar interior é um fator fundamental para a saúde dos ocupantes. Assim foi necessário encontrar soluções de forma a renovar o ar nos compartimentos. A habitação em estudo possui um sistema de ventilação misto. A solução adotada foi a instalação de grelhas auto-reguláveis nos principais compartimentos da habitação como evidenciado na figura 11 [11].



Figura 11 – Grelhas auto-reguláveis na Sala

Na cozinha e casa de banho foi adotado um sistema de extração mecânica, em que na cozinha o seu funcionamento é constante ao longo do dia, tendo um caudal máximo nos períodos de maior produção de vapor. Na casa de banho o seu funcionamento é coincidente com a sua utilização. A figura 12 mostra os dispositivos de extração mecânica na cozinha e casa de banho [11].



Figura 12 – Dispositivos de extração mecânica

4

SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA DO EDIFÍCIO

4.1. MODELAÇÃO DO APARTAMENTO

4.1.1. INTRODUÇÃO

A caracterização da habitação feita no capítulo anterior será complementada neste subcapítulo com os parâmetros de simulação de maior relevância para o nosso caso de estudo. Não será feita uma análise exaustiva de todos os parâmetros inseridos no EnergyPlus.

O modelo base da habitação foi fornecido pelo Engenheiro António Curado, aluno de Doutoramento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

4.1.2. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

De forma a se obter uma simulação higrótérmica completa do apartamento em estudo, é necessário estabelecer os critérios que permitem ao EnergyPlus correr as simulações. Tal é feito utilizando o campo *SimulationControl* como se evidencia na figura 13.

Field	Units	Obj1
Do Zone Sizing Calculation		No
Do System Sizing Calculation		No
Do Plant Sizing Calculation		No
Run Simulation for Sizing Periods		No
Run Simulation for Weather File Run Periods		Yes

Figura 13 – Parâmetros da simulação

De seguida é preciso definir o modelo de transferência de calor e humidade nos elementos construtivos utilizando o *HeatBalanceAlgoritm*. Como o modelo escolhido foi o EMPD é o que está definido na figura 14.

Field	Units	Obj1
Algorithm		MoisturePenetration
Surface Temperature Upper Limit	C	200
Minimum Surface Convection Heat Transfer Coefficient	W/m2-K	0,1
Maximum Surface Convection Heat Transfer Coefficient	W/m2-K	1000

Figura 14 – Campo de selecção do algoritmo

O campo *RunPeriod* permite-nos definir o período de simulação bem como as especificações do ficheiro climático a utilizar na simulação. No nosso caso foram apenas utilizados os indicadores de chuva e neve do ficheiro climático como demonstrado na figura 15.

Field	Units	Obj1
Name		Prt_Porto.085450_1\
Begin Month		1
Begin Day of Month		1
End Month		12
End Day of Month		31
Day of Week for Start Day		UseWeatherFile
Use Weather File Holidays and Special Days		No
Use Weather File Daylight Saving Period		No
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated		1
Increment Day of Week on repeat		
Start Year		

Figura 15 – Campo *RunPeriod*

A definição dos materiais utilizados na construção e as suas propriedades entram no campo *Material*. Neste campo os valores das propriedades dos materiais foram obtidos utilizando valores retirados do programa WUFI 5.1 Light [11], onde se procuraram materiais com características semelhantes aos materiais no presente caso de estudo.

Na base de dados do WUFI são fornecidas propriedades muito específicas dos materiais, entre as quais se inserem o comportamento face à humidade, indispensável para as simulações.

A figura 16 demonstra alguns dos materiais utilizados na construção do apartamento e as respetivas propriedades. Devido ao grande número de materiais diferentes utilizados a figura apenas mostra alguns. Os parâmetros das propriedades já foram referidos no ponto 3.3.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	Tijolo Vazado 11	betão 25 cm	Tijolo Vazado 7	betão 20 cm	reboco 1.5 cm	camada Regularizadora	poliestireno extrudido	lã de rocha
Roughness		VeryRough	Rough	Rough	VeryRough	Rough	Rough	Rough	Rough	MediumRough	MediumRough
Thickness	m	0.11	0.02	0.11	0.25	0.07	0.2	0.015	0.05	0.08	0.01
Conductivity	W/m-K	0.861	0.8	0.42	1.373	0.42	1.373	0.8	0.46	0.04	0.04
Density	kg/m3	1788	1900	900	2104	900	2104	1900	1200	20	60
Specific Heat	J/kg-K	868	850	850	776	850	776	850	850	1500	850
Thermal Absorptance		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Solar Absorptance		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Visible Absorptance		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Figura 16 – Campo *Material*

De seguida define-se a constituição dos diversos elementos construtivos no campo *Construction*. Neste campo os materiais são dispostos conforme a sua localização nos elementos construtivos, do exterior para o interior.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		Exterior - S1	Parede Exterior - Nc	Parede Exterior - Nc	Cobertura	Pavimento	Parede Separação I	Paredes Divisórias I	Janela Sala	Janela Quarto	Janela Lavandaria
Outside Layer		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	Tijolo Face à vista	caixa de ar	poliestireno extrudido	cerâmica vidrada	canalada Regularizada	reboco 20 cm	reboco 1.5 cm	reboco 1.5 cm
Layer 2		Tijolo Vazado 11	Iã de rocha	Tijolo Vazado 11	Placa Gesso Carton	reboco 25 cm	reboco 25 cm	reboco 1.5 cm			
Layer 3		reboco 2 cm	Placa Gesso Carton	reboco 2 cm							
Layer 4		Iã de rocha		Iã de rocha							
Layer 5		Placa Gesso Carton		Placa Gesso Carton							
Layer 6											
Layer 7											
Layer 8											
Layer 9											
Layer 10											

Figura 17 – Campo *Construction*

A modelação das superfícies faz-se na campo *BuildingSurface:Detailed*, onde para cada superfície do apartamento se define a exposição ao sol e ao vento.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		ParedeExteriorQuart	ParedeQuarto1/Cas	ParedeQuarto1/Sal	ParedeQuarto1/Out	ParedeQuarto1/Out
Surface Type		Wall	Wall	Wall	Wall	Wall
Construction Name		Parede Exterior - Nc	Paredes Divisórias I	Paredes Divisórias I	Paredes Divisórias I	Paredes Divisórias I
Zone Name		Z1-Quarto1	Z1-Quarto1	Z1-Quarto1	Z1-Quarto1	Z1-Quarto1
Outside Boundary Condition		Outdoors	Zone	Zone	Adiabatic	Adiabatic
Outside Boundary Condition Object			Z2-Casa de Banho	Z3-Sala		
Sun Exposure		SunExposed	NoSun	NoSun	NoSun	NoSun
Wind Exposure		WindExposed	NoWind	NoWind	NoWind	NoWind
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	2,5	2,5	2,5	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	4,6	0,9	0	0	4,6
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Vertex 2 X-coordinate	m	2,5	2,5	2,5	0	0
Vertex 2 Y-coordinate	m	4,6	0,9	0	0	4,6
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	0	2,5	2,5	2,5	0
Vertex 3 Y-coordinate	m	4,6	4,6	0,9	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0
Vertex 4 X-coordinate	m	0	2,5	2,5	2,5	0

Figura 18 – Campo *BuildingSurface:Detailed*

Começa-se por definir o nome da superfície, seguido pelo tipo de superfície. Indica-se que elemento construtivo está associado à superfície de forma a obter as suas características físicas bem como a zona onde está inserido.

Pede também a definição do ambiente no exterior do elemento construtivo e, se estiver em contacto com outra zona é necessário indicar no *OutsideBoundaryConditionObject*.

Os envidraçados e as suas características são inseridas no campo imediatamente abaixo do *Material*, no campo *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem* (figura 19).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Janela Giratória "O	Janela de Correr "S	Janela de Correr "L	Janela da Caixa de
U-Factor	W/m2-K	2,8	3	4,8	4,8
Solar Heat Gain Coefficient		0,78	0,78	0,82	0,82
Visible Transmittance		0,8	0,8	0,8	0,8

Figura 19 – Campo *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*

São depois definidos no campo *Construction* e modelados, junto com as portas, no campo *FenestrationSurface:Detailed*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
Name		JanelaQuarto1Nord	JanelaCasaBanhoN	JanelaSalaNordesh	JanelaCozinhaLav	JanelaQuarto2Sudk	JanelaQuarto3Sudk	JanelaCaixadeEscala	PortaCasaBanho	PortaSala
Surface Type		Window	Window	Window	Window	Window	Window	Door	Door	Door
Construction Name		JanelaQuarto	JanelaWC	JanelaSala	JanelaLavandaria	JanelaQuarto	JanelaQuarto	JanelaCaixaEscad	Porta madeira	Porta madeira
Building Surface Name		ParedeExteriorQuar	ParedeExteriorCasa	ParedeExteriorSala	ParedeExteriorCozr	ParedeExteriorQuar	ParedeExteriorQuar	ParedeExteriorCaix	ParedeCasaBanho	ParedeSalaCaixad
Outside Boundary Condition Object									Z2 Casa de Banho	Z3 Sala
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate		
Shading Control Name										
Frame and Divider Name										
Multiplier		1	1	1	1	1	1	1	1	1
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	1.85	1.05	4.1	2.3	0.9	0.9	0.1	0.2	5.6
Vertex 1 Y-coordinate	m	4.6	3.7	5.8	4.5	0	0	0	0	1.25
Vertex 1 Z-coordinate	m	2.1	2.1	2.1	2.45	2.1	2.1	2.3	1.9	1.9
Vertex 2 X-coordinate	m	1.85	1.05	4.1	2.3	0.9	0.9	0.1	0.2	5.6
Vertex 2 Y-coordinate	m	4.6	3.7	5.8	4.5	0	0	0	0	1.25
Vertex 2 Z-coordinate	m	0.9	1.175	0.9	1	0.9	0.9	0.9	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	0.75	0.45	2.1	0.1	2	2	1.3	0.9	5.6
Vertex 3 Y-coordinate	m	4.6	3.7	5.8	4.5	0	0	0	0	2.05
Vertex 3 Z-coordinate	m	0.9	1.175	0.9	1	0.9	0.9	0.9	0	0
Vertex 4 X-coordinate	m	0.75	0.45	2.1	0.1	2	2	1.3	0.9	5.6

Figura 20 - FenestrationSurface:Detailed

Devido à presença de palas a sua modelação tem de ser feita no campo *Shading:Zone:Detailed*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		Pala1	Pala2	Pala3	Pala4	Pala5	Pala6	Pala7	Pala9
Base Surface Name		ParedeExteriorQuar	ParedeExteriorCasa	ParedeExteriorSala	ParedeExteriorCozr	ParedeExteriorCozr	ParedeExteriorQuar	ParedeExteriorQuar	ParedeExteriorCaix
Transmittance Schedule Name									
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0	0	1.6	-0.5	0	0	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	5.1	4.2	6.3	5	5	0	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Vertex 2 X-coordinate	m	0	0	1.6	-0.5	0	0	0	0
Vertex 2 Y-coordinate	m	4.6	3.7	5.8	4.2	4.5	-0.5	-0.5	-0.5
Vertex 2 Z-coordinate	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Vertex 3 X-coordinate	m	2.5	1.6	4.6	0	2.4	2.8	2.8	1.4
Vertex 3 Y-coordinate	m	4.6	3.7	5.8	4.2	4.5	-0.5	-0.5	-0.5
Vertex 3 Z-coordinate	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Vertex 4 X-coordinate	m	2.5	1.6	4.6	0	2.4	2.8	2.8	1.4
Vertex 4 Y-coordinate	m	5.1	4.2	6.3	5	5	0	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Vertex 5 X-coordinate	m								
Vertex 5 Y-coordinate	m								
Vertex 5 Z-coordinate	m								
Vertex 6 X-coordinate	m								
Vertex 6 Y-coordinate	m								

Figura 21 – Campo *Shading:Zone:Detailed*

É importante referir que toda a geometria do apartamento foi importada de um modelo elaborado no programa SketchUp. A figura 22 mostra uma representação 3D do apartamento feita no SketchUp.

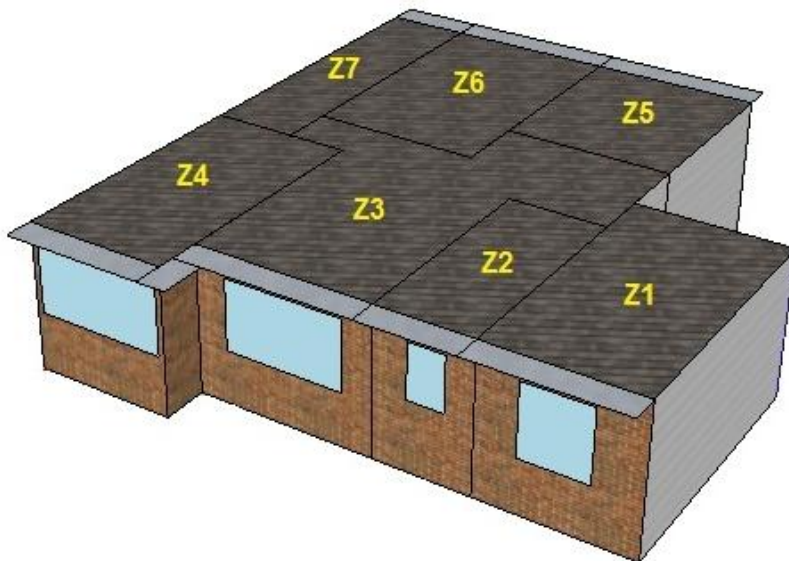


Figura 22 – Modelo 3D do apartamento em estudo

No que diz respeito ao EMPD foi necessário introduzir um campo específico onde se definem os parâmetros do material que se considera determinante para a inércia higroscópica, que como foi referido no ponto 2.2.4 é a camada interior. No caso em estudo utiliza-se uma placa de gesso cartonado com espessura de 125mm.

Assim foi necessário quantificar os coeficientes a , b , c e d e o valor da espessura δ_M . Os coeficientes determinam-se fazendo um ajuste da curva higroscópica do material a ser utilizado, apresentada na figura 23 [11] e o valor de δ_M através da equação (8).

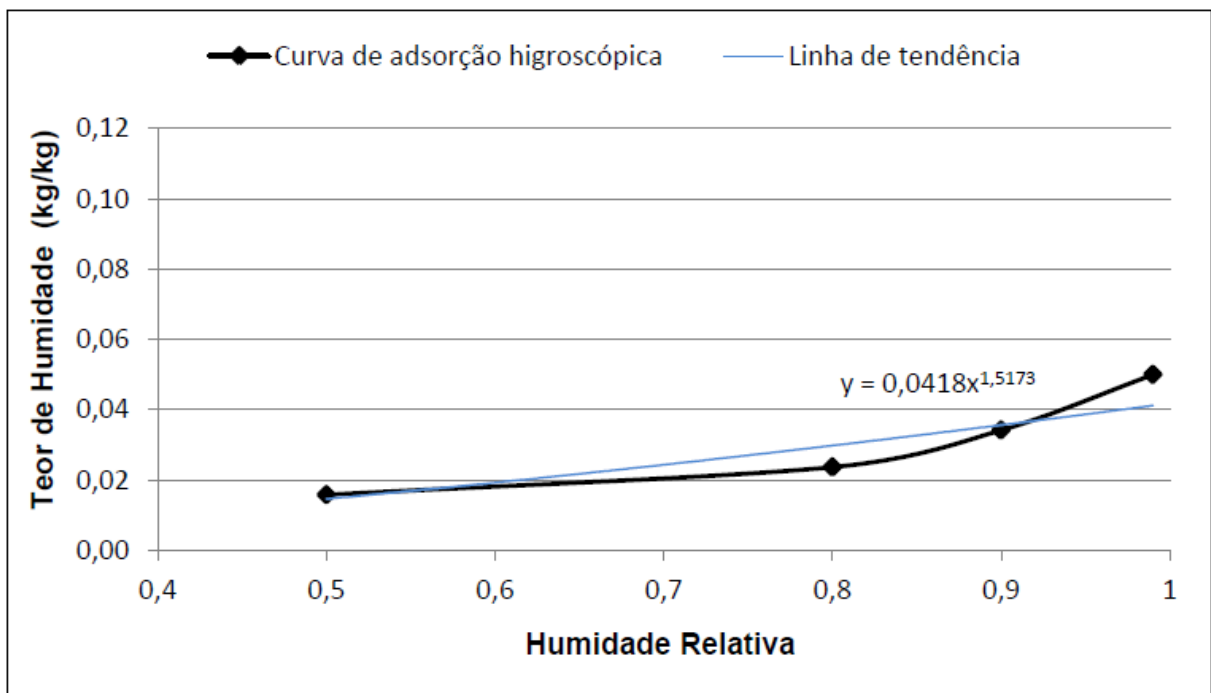


Figura 23 – Ajuste da curva de adsorção higroscópica

Assim de acordo com este ajuste os coeficientes tomam os seguinte valores: $a=0.0418$, $b=1.5173$, $c=0$ e $d=1$.

$$\delta_M = \sqrt{\frac{\delta_{\text{mat}} \cdot P_{\text{sat}} \cdot t_p}{\rho \cdot \xi \cdot \pi}} \quad (8)$$

Em que:

δ_M - espessura de penetração de humidade [m];

δ_{sat} - permeabilidade ao vapor do material;

P_{sat} - pressão de saturação;

t_p - período de um ciclo de variação de humidade

ρ - massa volúmica do material;

ξ - capacidade higroscópica do material;

Resolvendo a equação (8) obtemos um δ_M de 0,0025m.

O modelo EMPD vai focar todo o seu cálculo na camada de gesso cartonado, logo a sua espessura δ_M tem uma grande influência nos resultados das simulações. Assim decidiu-se simular a habitação admitindo uma maior adsorção por parte do material higroscópico, considerando um δ_M de 0,004m em detrimento dos 0,0025m calculados com a equação (8) [11].

A figura 24 mostra o campo onde se inserem os valores determinados.

Field	Units	Obj1
Name		Placa Gesso Carton
Moisture Penetration Depth	m	0,004
Moisture Equation Coefficient a	dimensionless	0,0418
Moisture Equation Coefficient b	dimensionless	1,5173
Moisture Equation Coefficient c	dimensionless	0
Moisture Equation Coefficient d	dimensionless	1

Figura 24 – Campo *MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings*

Foi necessário definir um regime de ventilação. Como um dos objectivos primordiais da presente dissertação é a simulação higrotérmica do apartamento foram corridas simulações para diferentes regimes de ventilação.

Numa primeira etapa considerou-se um regime de ventilação constante em todo o apartamento durante todo o dia. Por outro lado numa segunda etapa submeteu-se o apartamento a um regime de ventilação variável ao longo do dia. O EnergyPlus refere a ventilação como “*taxa de renovação horária*”, ou seja Rph.

É importante referir o processo de quantificação do regime de ventilação permanente no apartamento em estudo. Para tal recorre-se ao campo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, onde se define as zonas afetadas pela ventilação, o horário de ventilação previamente definido num *Schedule* próprio (figura 24), o método de cálculo utilizado pelo EnergyPlus já referido como *taxa de renovação horária* e por fim o valor de Rph pretendido.

Field	Units	Obj9
Name		sch_infiltração_gen
Schedule Type Limits Name		any number
Field 1	varies	Through:12/31
Field 2	varies	For:alldays
Field 3	varies	Until:24:00
Field 4	varies	1
Field 5	varies	

Figura 25 – *Schedule* de ventilação constante

A figura 25 mostra o campo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate* onde se define a ventilação. Neste caso mostra um regime de ventilação constante com uma taxa de renovação de $0,6h^{-1}$.

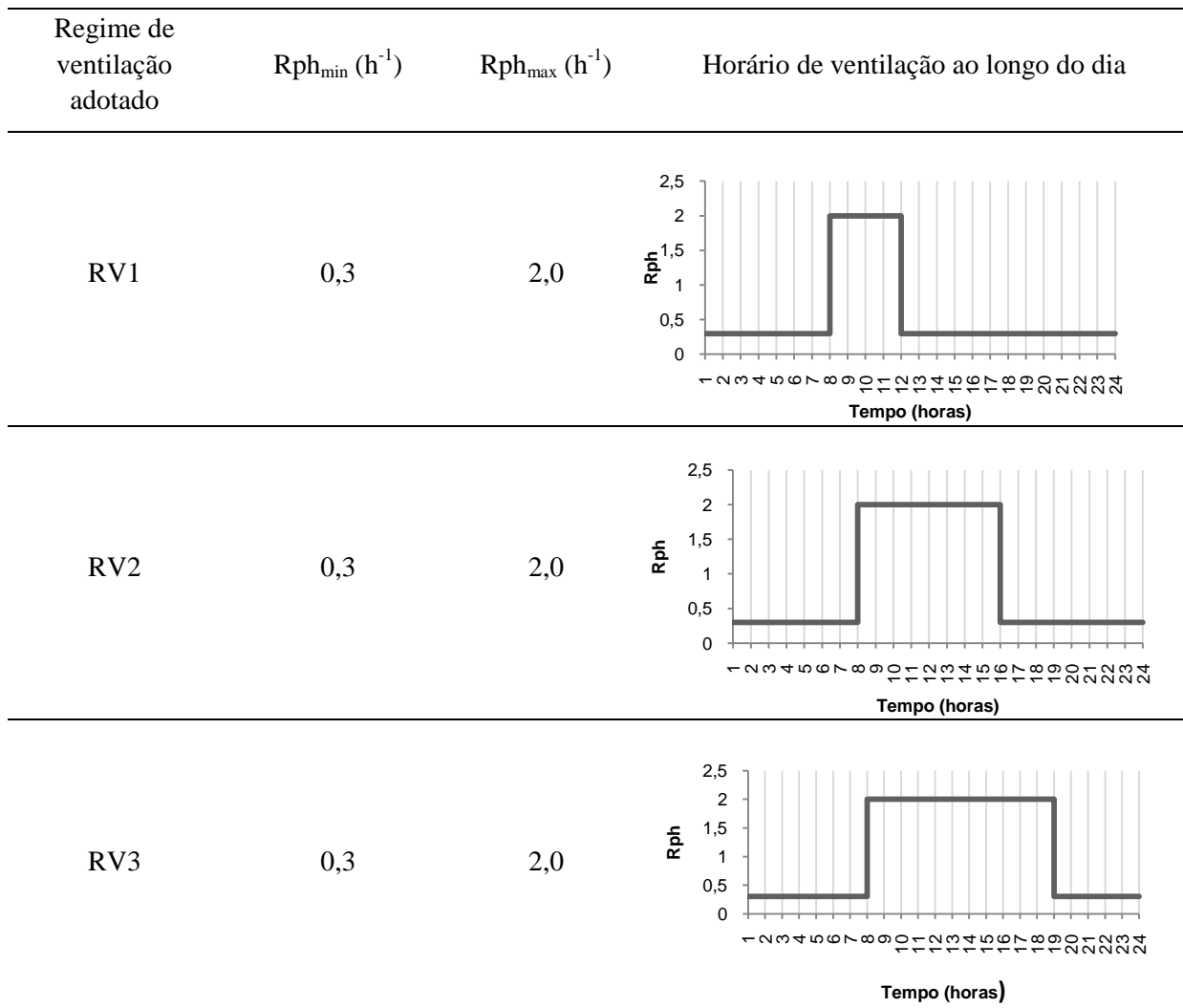
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Infiltração Sala	Infiltração Quarto 1	Infiltração Quarto 2	Infiltração WC	Infiltração Cozinha	Infiltração Quarto 3	Infiltração Escadas
Zone or ZoneList Name		Z3-Sala	Z1-Quarto1	Z5-Quarto 2	Z2-Casa de Banho	Z4-CozinhaeLavanc	Z6-Quarto 3	Z7-Caixa de Escadas
Schedule Name		sch_infiltração_gen	sch_infiltração_gen	sch_infiltração_gen	sch_infiltração_gen	sch_infiltração_gen	sch_infiltração_gen	sch_infiltração_gen
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s							
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2							
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2							
Air Changes per Hour	1/hr	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Constant Term Coefficient		1	1	1	1	1	1	1
Temperature Term Coefficient								
Velocity Term Coefficient								
Velocity Squared Term Coefficient								

Figura 26 – Campo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*

De seguida no quadro 8 são apresentados os regimes de ventilação adotados. Foram simuladas situações com regime constante durante o dia e regime variável.

Quadro 8 – Regimes de ventilação adotados

Regime de ventilação adotado	$R_{ph_{min}}$ (h^{-1})	$R_{ph_{max}}$ (h^{-1})	Horário de ventilação ao longo do dia
RC1	0,3	0,3	
RC2	0,6	0,6	
RC3	1,0	1,0	
RC4	1,5	1,5	
RC5	2,0	2,0	



Para um regime de ventilação constante (*RC*) considerou-se cinco taxas de renovação horárias.

Naturalmente, para cada regime de ventilação o comportamento higrotérmico do apartamento será diferente.

Na simulação para regime variável (*RV*) é necessário fazer algumas alterações nos dados do EnergyPlus. Cada regime de ventilação variável terá de ter o seu próprio *Schedule* no campo *Schedule:Compact*, na figura 26 demonstra-se o horário de infiltração para o regime variável 1 (*RV1*).

Field	Units	Obj15
Name		sch_infiltração_RV1
Schedule Type Limits Name		any number
Field 1	varies	Through:12/31
Field 2	varies	For:alldays
Field 3	varies	Until:8:00
Field 4	varies	.3
Field 5	varies	Until:12:00
Field 6	varies	2
Field 7	varies	Until:24:00
Field 8	varies	.3

Figura 27 – Schedule RV1

De acordo com este *Schedule* para o RV1 temos um período de tempo P_1 que se inicia às 8:00h com uma ventilação de $2h^{-1}$ e que se prolonga até às 12:00h, de seguida entre as 12:00h e as 8:00h temos um período de tempo P_2 com uma renovação de ar de $0,3h^{-1}$. Neste caso temos um fator P_1/P_2 de 0,2

De forma a que todas as zonas estejam submetidas a um regime de ventilação constante temos de escolher o *Schedule* correspondente e aplicá-lo às zonas pretendidas no campo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*. Contudo o parâmetro *Air Changes per Hour* deverá ter o valor de 1 em todas as zonas.

Para o presente trabalho os três regimes de ventilação variável considerados são apresentados no quadro 9 com os respetivos valores médios.

Quadro 9 – Regimes de ventilação variáveis

	RV1	RV2	RV3
Rph_{min} (h⁻¹)	0,3	0,3	0,3
Rph_{max} (h⁻¹)	2,0	2,0	2,0
P₁/P₂	0,2	0,5	0,85
Rph_{médio} (h⁻¹)	0,58	0,87	1,08

Por fim para comparação de resultados com o programa de otimização foi definido o campo para um sistema de aquecimento. A figura 28 demonstra o campo *ElectricEquipment*.

Field	Units	Obj1
Name		aquecedor_quarto1
Zone or ZoneList Name		Z1-Quarto1
Schedule Name		sch_ocupação_Z1z
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel
Design Level	W	200
Watts per Zone Floor Area	W/m2	
Watts per Person	W/person	
Fraction Latent		0
Fraction Radiant		1
Fraction Lost		0
End-Use Subcategory		General

Figura 28 – Campo *ElectricEquipment*

É possível assim simular o comportamento higrotérmico de uma zona com um sistema de aquecimento. No presente caso foi colocado um aquecedor no Quarto 1 com uma potência de 200W.

4.1.3. VARIÁVEIS DE SAÍDA

As variáveis pretendidas com a simulação são: a temperatura interior, temperatura superficial interior, ganhos internos, ganhos solares e a humidade relativa interior.

Para obter os ganhos solares é necessário utilizar os outputs: energia solar transmitida à zona em estudo e radiação direta e difusa transmitidas pela janela.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Key Value		*	*	*	*	*
Variable Name		Surface Inside Face	Window Transmitter	Zone/Sys Air Temp	Zone Total Internal	Window Transmitter
Reporting Frequency		Hourly	Hourly	Hourly	Hourly	Hourly
Schedule Name						

Figura 29 – Campo *Output:Variable*

Para definir as variáveis recorreremos ao campo *Output:Variable* como demonstrado na figura 29.

4.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO BASE

No presente subcapítulo serão apresentados alguns resultados de temperaturas e humidades relativas para um cenário base de forma a ter uma primeira noção do comportamento higrotérmico do apartamento. Este cenário corresponde às simulações feitas para um regime de ventilação constante com um Rph de $0,6h^{-1}$.

4.2.1. TEMPERATURA

Na figura 30 demonstra-se as variações de temperatura interior nas várias zonas da habitação em

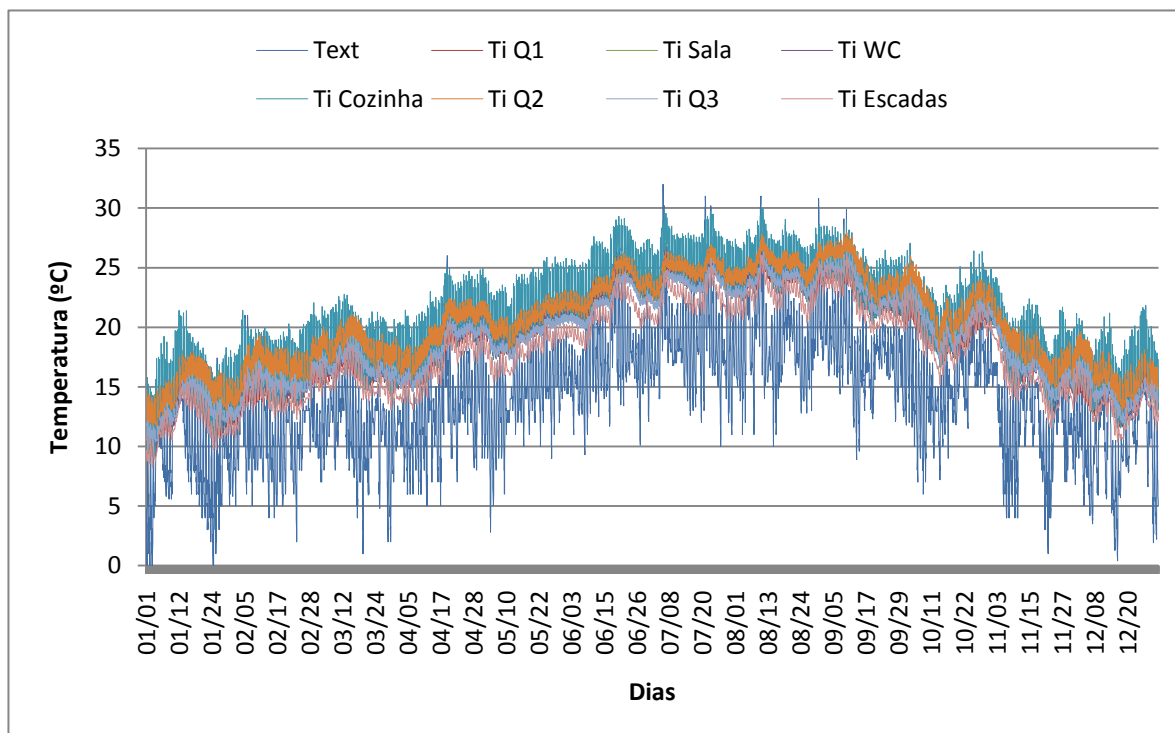


Figura 30 – Variação das temperaturas interiores dos diversos compartimentos

estudo. Estas temperaturas são comparadas com a temperatura exterior fornecida pelo EnergyPlus.

Pela análise da figura 28 pode-se concluir que, como esperado as temperaturas são mais baixas nos meses de Inverno e mais altas nos meses de Verão. A influência da temperatura exterior nas

temperaturas interiores é evidente, pois os seus comportamentos são muito semelhantes durante todo o ano de estudo.

Para se ter uma melhor noção das temperaturas a figura 31 mostra a variação das temperaturas interiores e a temperatura exterior na primeira semana de Janeiro.

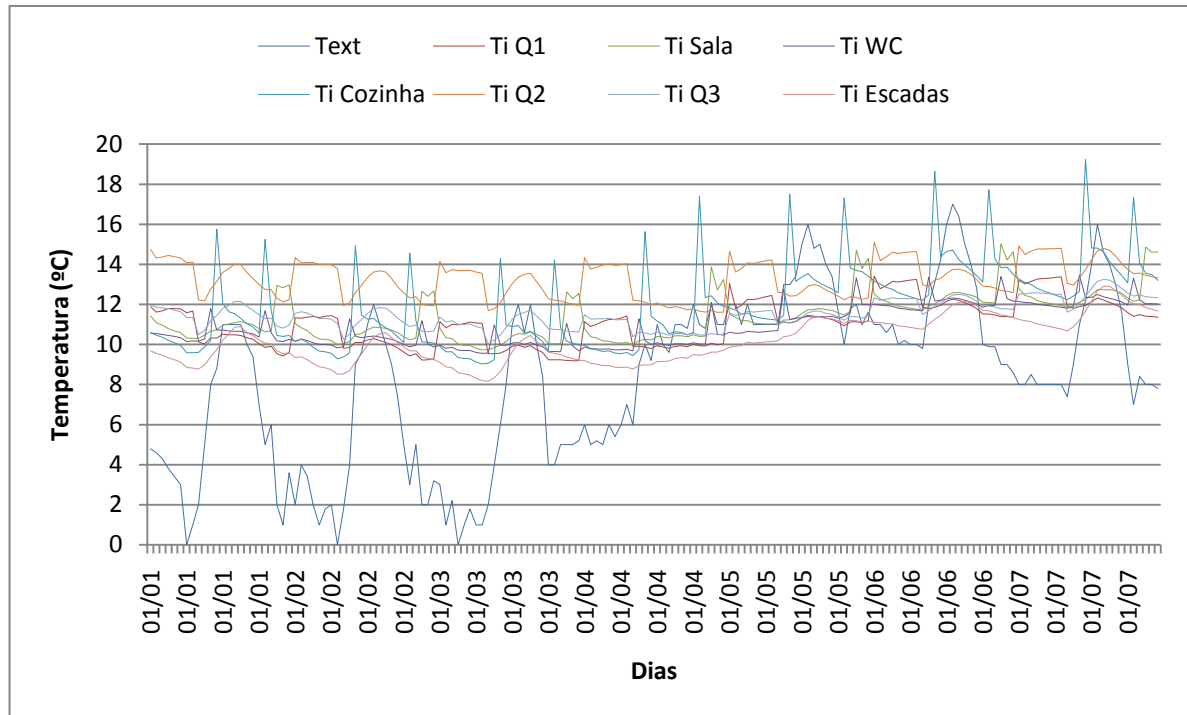


Figura 31 – Variação das temperaturas interiores durante o mês de Janeiro

É facilmente perceptível que enquanto que as temperaturas exteriores têm uma grande variação nos seus valores ao longo do dia as temperaturas interiores são mais constantes. As maiores variações nas temperaturas interiores dos quartos ocorrem das 00:00h às 8:00h de cada dia, o que coincide com a presença das pessoas na zona.

Um fator muito importante no comportamento higrotérmico do apartamento é a temperatura superficial das superfícies em contato com o ambiente exterior. A figura 32 mostra, a título de exemplo, a variação da temperatura superficial interior com a temperatura interior no quarto 1, bem como a variação da temperatura exterior durante o ano.

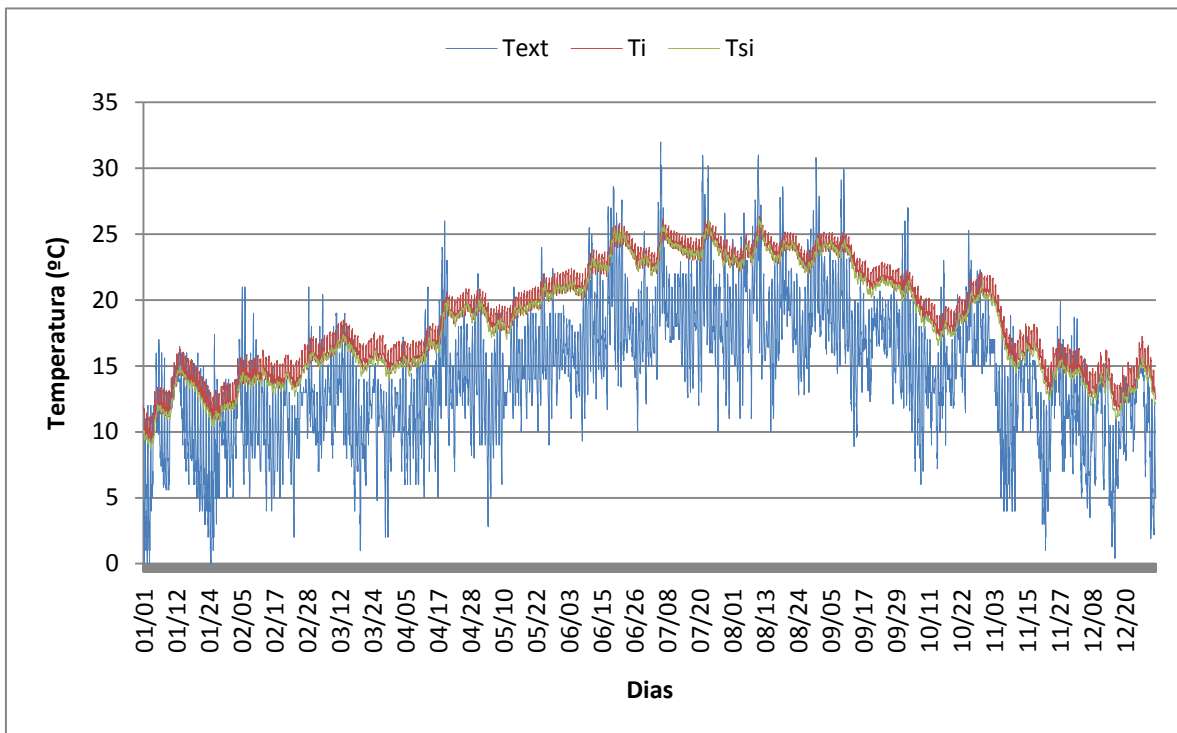


Figura 32 – Variação anual da temperatura superficial interior do Quarto 1

Como esperado a temperatura superficial interior tem um valor ligeiramente mais baixo que a temperatura interior no quarto 1.

4.2.2. HUMIDADE

A figura 33 mostra a variação da humidade relativa interior para as diferentes zonas da habitação.

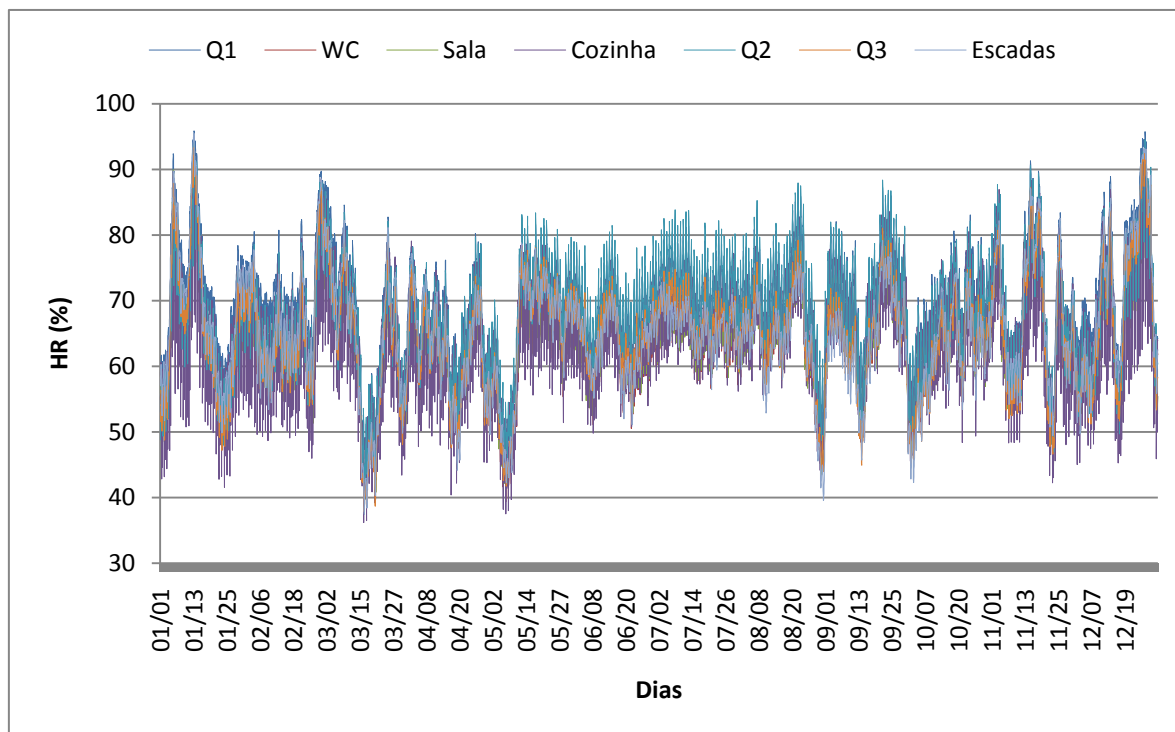


Figura 33 – Variação da humidade relativa interior

Pode concluir-se que existe uma maior variação da humidade relativa nos meses mais frios em comparação com os meses mais quentes em que a amplitude de oscilação é menor. Comparando todas as zonas na mesma figura verifica-se que as variações entre zonas são muito pequenas.

É importante referir que as variações de humidade nas diferentes zonas são causadas por diversos fatores [11]:

- Área e orientação dos envidraçados existentes em cada zona térmica
- Período de ocupação da zona térmica
- Volume da zona térmica
- Propriedades dos materiais que constituem a zona térmica

De seguida, tal como na temperatura para ter uma melhor noção dos valores da humidade relativa apresenta-se a sua variação para a primeira semana de Janeiro.

Assim a figura 34 demonstra a evolução da humidade relativa interior em cada compartimento para a primeira semana de Janeiro.

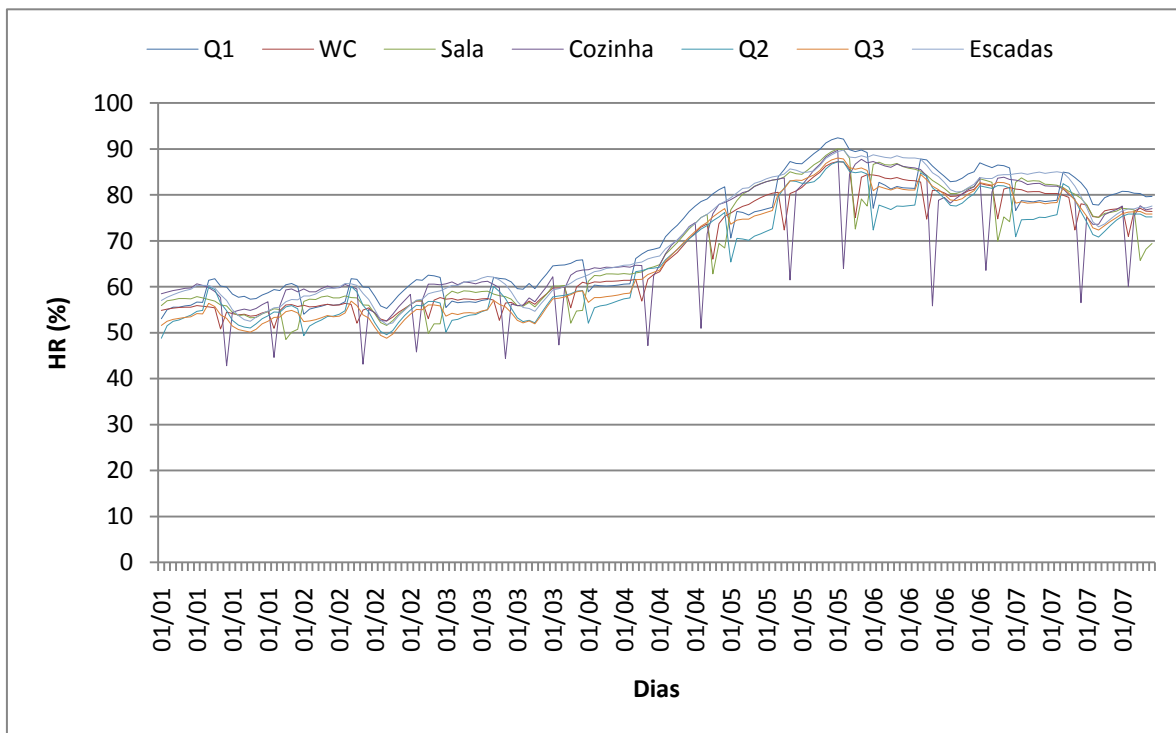


Figura 34 – Variação da umidade relativa na primeira semana de Janeiro

Como se pode observar na figura as humidades relativas interiores são muito semelhantes de compartimento para compartimento, variando entre os 50% e os 60% nos primeiros dias e dando depois um salto para uma variação entre os 70% e os 90%. As quebras nas humidades relativas devem-se ao fato de não haver atividade na zona durante essa altura.

Para além das humidades relativas no interior existe um outro parâmetro fornecido pelo EnergyPlus que nos permite avaliar o comportamento higrotérmico da habitação, a temperatura ponto de orvalho.

Esta temperatura funciona como um indicador de humidade absoluta, logo passível de se relacionar com outras características como a produção de vapor interior e a ventilação [11].

Assim a figura 35 mostra a variação da temperatura ponto de orvalho para as várias zonas da habitação durante a primeira semana de Janeiro, fazendo também uma comparação com a temperatura ponto de orvalho exterior nessa semana.

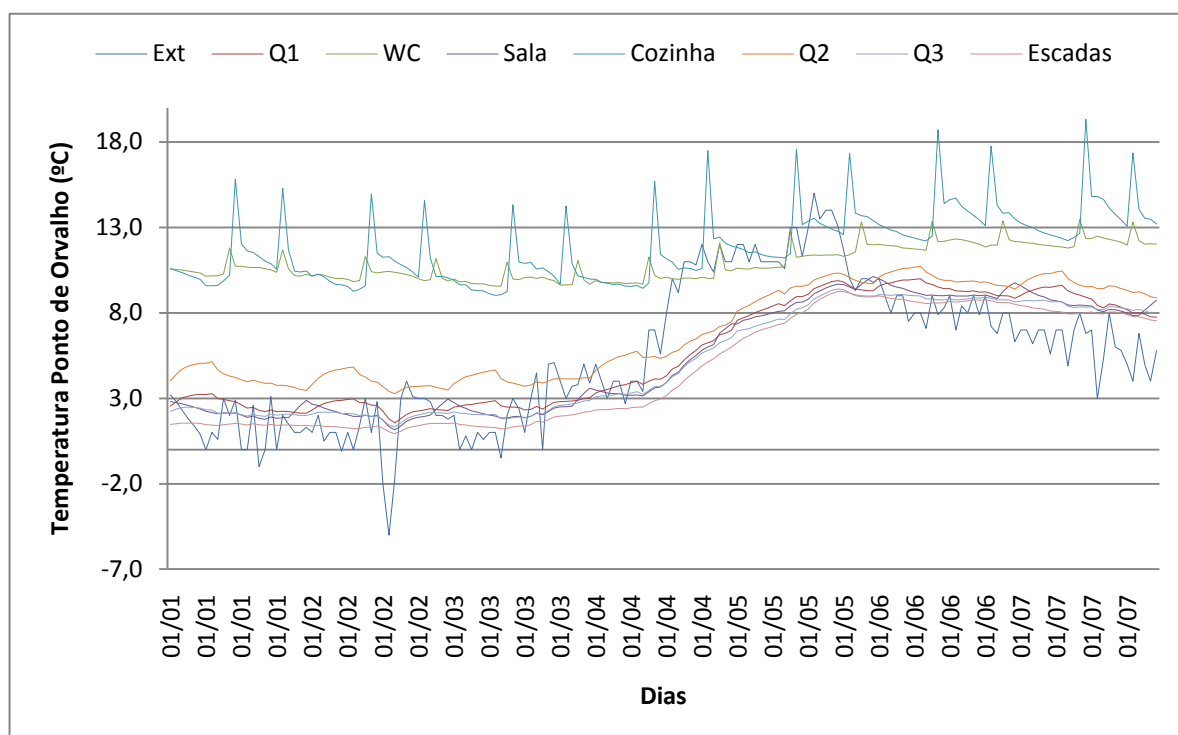


Figura 35 – Variação das temperaturas ponto de orvalho durante a primeira semana de Janeiro

Observando a figura 35 pode-se concluir que a evolução da temperatura ponto de orvalho nos compartimentos principais é muito semelhante, sendo que por causa da produção de vapor existe uma grande diferença entre os compartimentos principais e os compartimentos de serviço.

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Como foi referido no ponto 4.1.2. foram feitas simulações para diferentes regimes de ventilação constante e variável. Através dessa análise conseguimos ter uma melhor noção das variações de temperaturas e humidades relativas quando se modifica a ventilação no apartamento. Para tal procedeu-se ao cálculo de algumas variáveis estatísticas: valor médio (V_{med}), percentil 10 ($P10$) e percentil 90 ($P90$).

Um dos objetivos principais desta dissertação é otimizar o apartamento, ou seja reduzir ao máximo as humidades relativas superficiais e o fator TOW ao longo do ano. Para tal utilizou-se o EnergyPlus para introduzir uma nova camada de isolamento pelo interior nas superfícies em contacto com o exterior.

Assim serão apresentados os valores médios e das frequências acumuladas das temperatura e humidade relativa superficiais.

A figura 36 demonstra a evolução das temperaturas interiores durante o mês de Janeiro do quarto 1 para os diferentes regimes de ventilação adotados. Representam-se as curvas dos valores médios e percentis 10 e 90.

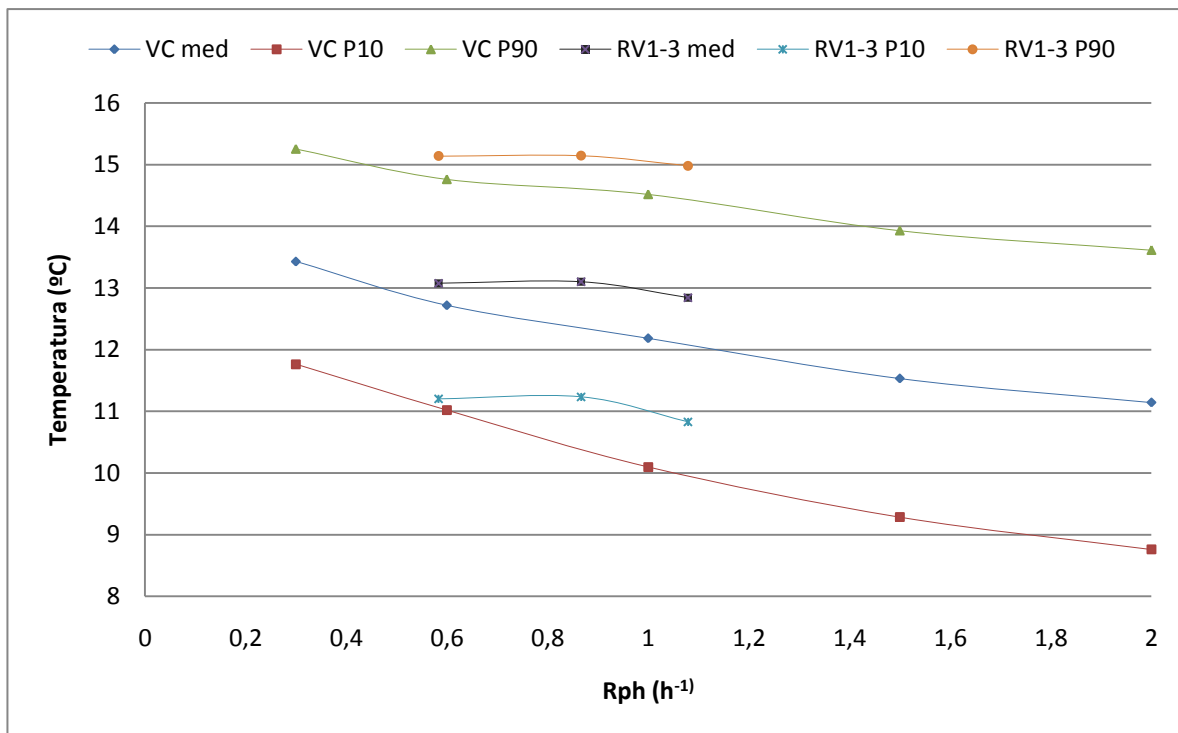


Figura 36 – Análise da temperatura do Quarto 1 para Janeiro

As temperaturas diminuem claramente com o aumento da ventilação como evidenciado pelos indicadores utilizados. Em regime de ventilação constante (*RC*) a descida de temperatura é relativamente constante, contudo em regime de ventilação variável (*RV*) tal não acontece, tendo mesmo uma diferença de quase 1°C em comparação com o regime constante no indicador percentil 10.

De seguida na figura 37 será apresentada a evolução das temperaturas superficiais interiores com o aumento da espessura de isolamento no Quarto 1.

Relembra-se que as temperaturas e humidades relativas superficiais interiores são referentes à superfície em contacto com o ar exterior, ou seja a parede exterior.

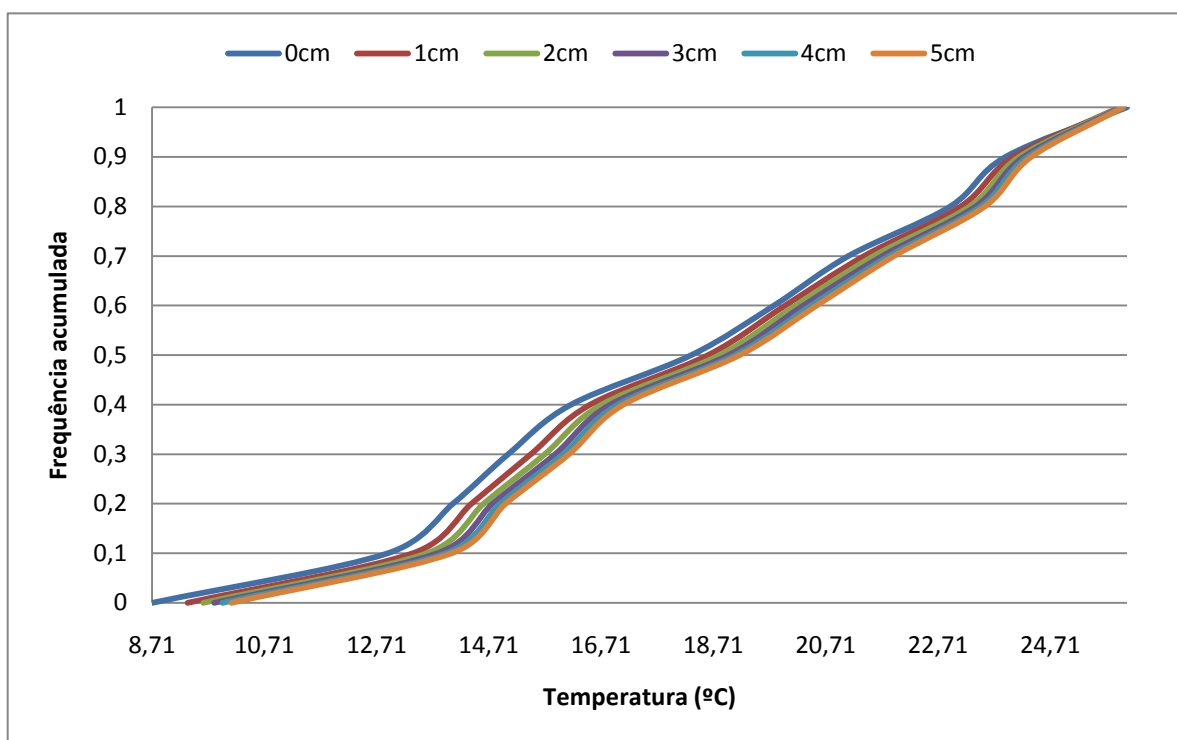


Figura 37 – Frequência acumulada dos valores da Tsi no Quarto 1

Na figura 38 demonstra-se a evolução das temperaturas superficiais médias do Quarto 1.

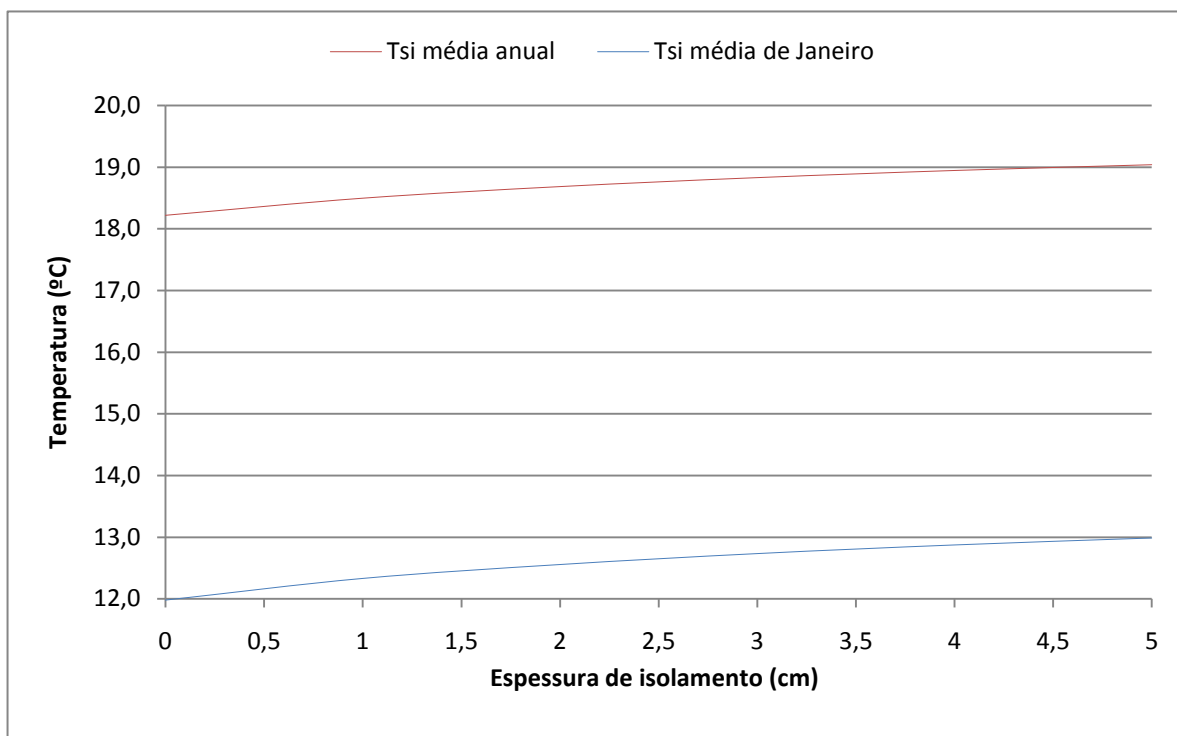


Figura 38 – Valores médios da Tsi no quarto 1

Analisando a figura 38 conclui-se que, como esperado, as temperaturas aumentam com a espessura de isolamento, implicando assim um aumento das temperaturas médias, sendo que existe uma diferença de quase 1°C entre o cenário sem nova espessura de isolamento e com 5 cm de espessura.

A humidade relativa interior, tal como a temperatura, varia conforme o regime de ventilação. A figura 39 mostra essa variação.

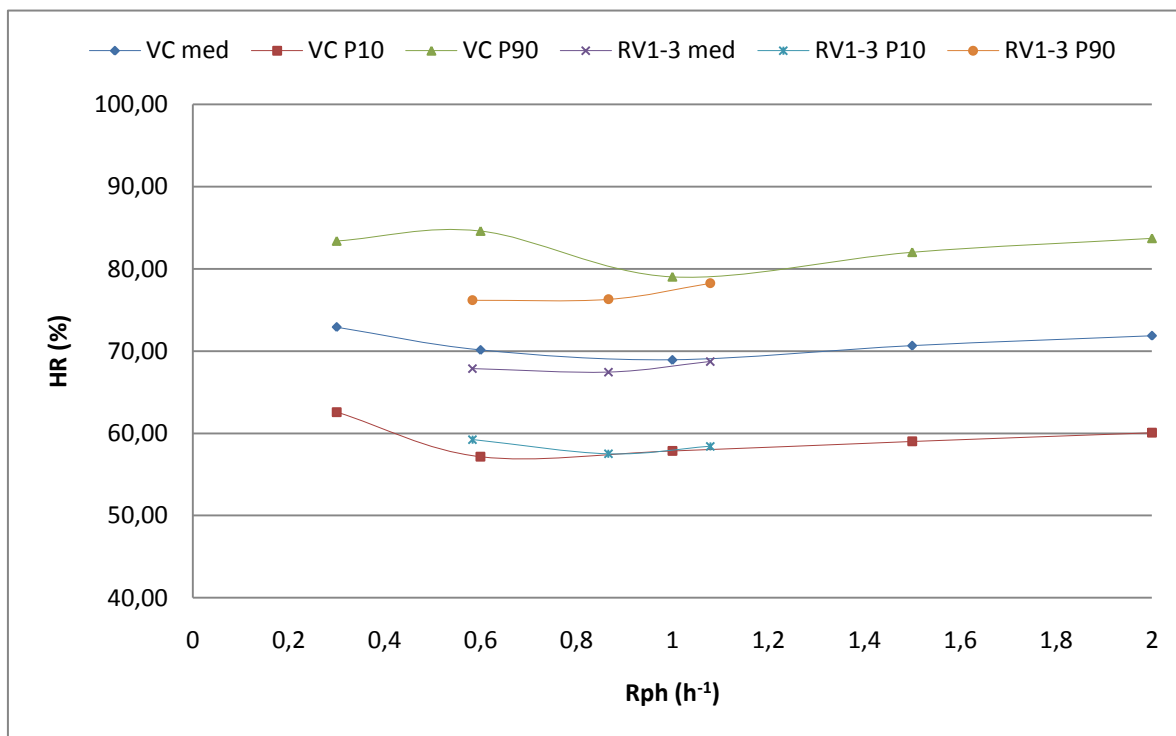


Figura 39 – Análise da Humidade Relativa no Quarto 1 para o mês de Janeiro

As humidades relativas, com o aumento das renovações horárias no quarto 1, tendem a ter uma ligeira diminuição seguida de um aumento a partir das 1h⁻¹. Tal aumento é esperado, pois as humidades relativas estão relacionadas com a temperatura e, quando esta baixa, a humidade relativa tende a aumentar.

De seguida na figura 40 será apresentada a evolução, segundo as variáveis estatísticas, da temperatura ponto de orvalho para o mês de Janeiro no quarto 1.

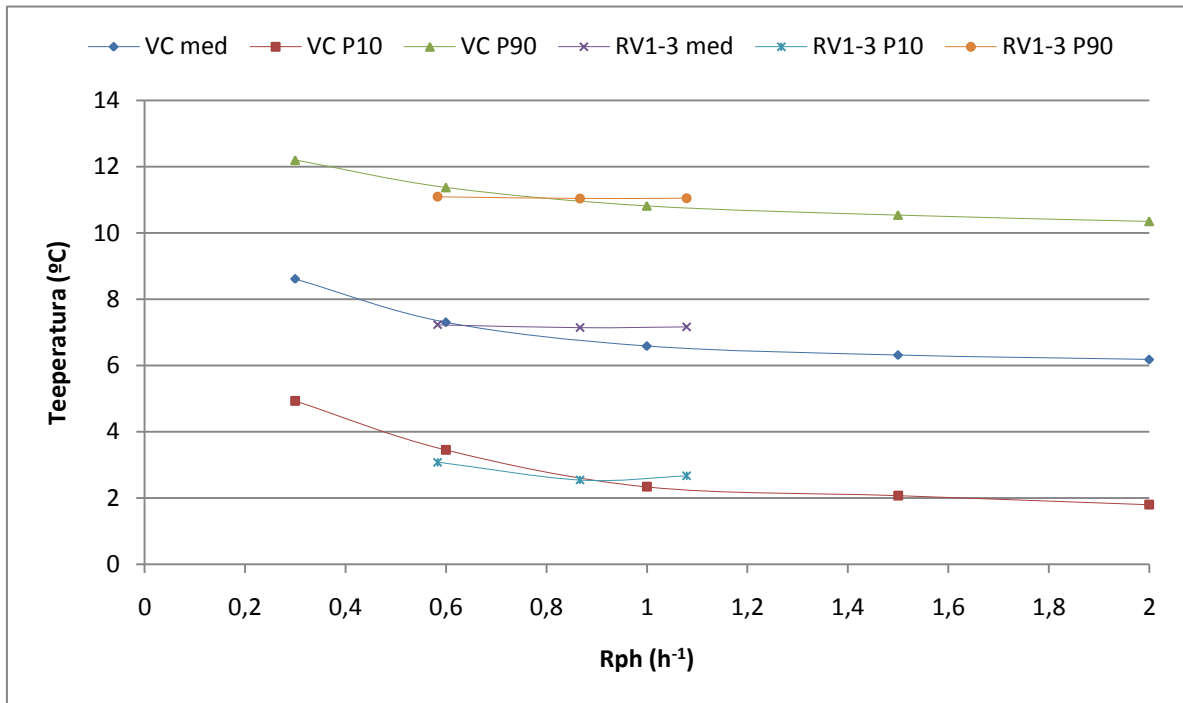


Figura 40 – Análise da temperatura ponto de orvalho para o quarto 1 no mês de Janeiro

Tal como esperado a temperatura ponto de orvalho decresce à medida que se aumenta a ventilação no quarto. Esta diminuição de temperatura deve-se à higrometria no quarto 1. Matematicamente, para os regimes de ventilação constantes, é explicado pela fórmula da higrometria (9).

$$W_i = W_e + 0,825 \times \frac{w}{Rph \cdot V} \quad (9)$$

Em que:

W_i – teor de humidade do ar interior [kg/kg];

W_e – teor de humidade do ar exterior [kg/kg];

w – produção de vapor no interior [kg/h];

Rph – taxa horária de renovação de ar [h^{-1}];

V – volume interior [m^3];

O crescente valor de Rph aliado à constante produção de vapor provoca uma higrometria cada vez mais reduzida, assim as condições exteriores influenciam cada vez mais o interior do quarto.

De seguida a figura 41 demonstra as frequências acumuladas das humidades relativas superficiais no quarto 1 para as cinco espessuras de isolamento definidas no EnergyPlus.

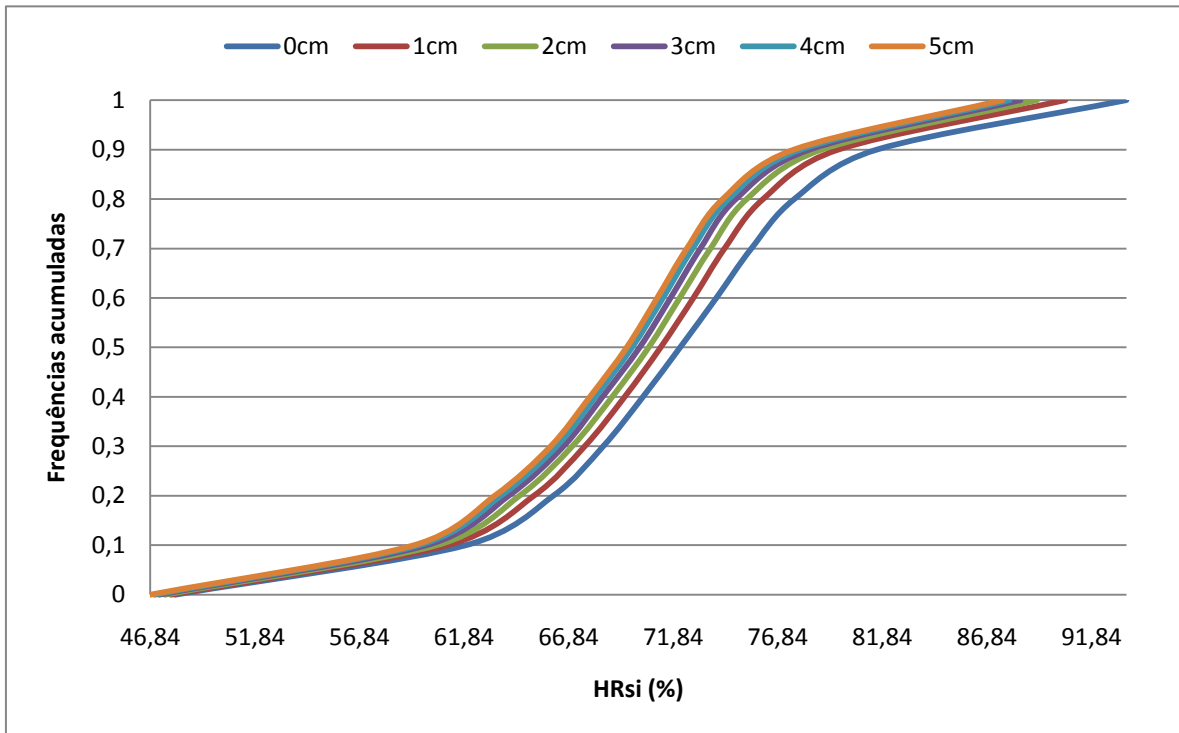


Figura 41 – Frequência acumulada dos valores das HRsi no quarto 1

Na figura 42 compara-se os valores médios com os valores de percentil 90.

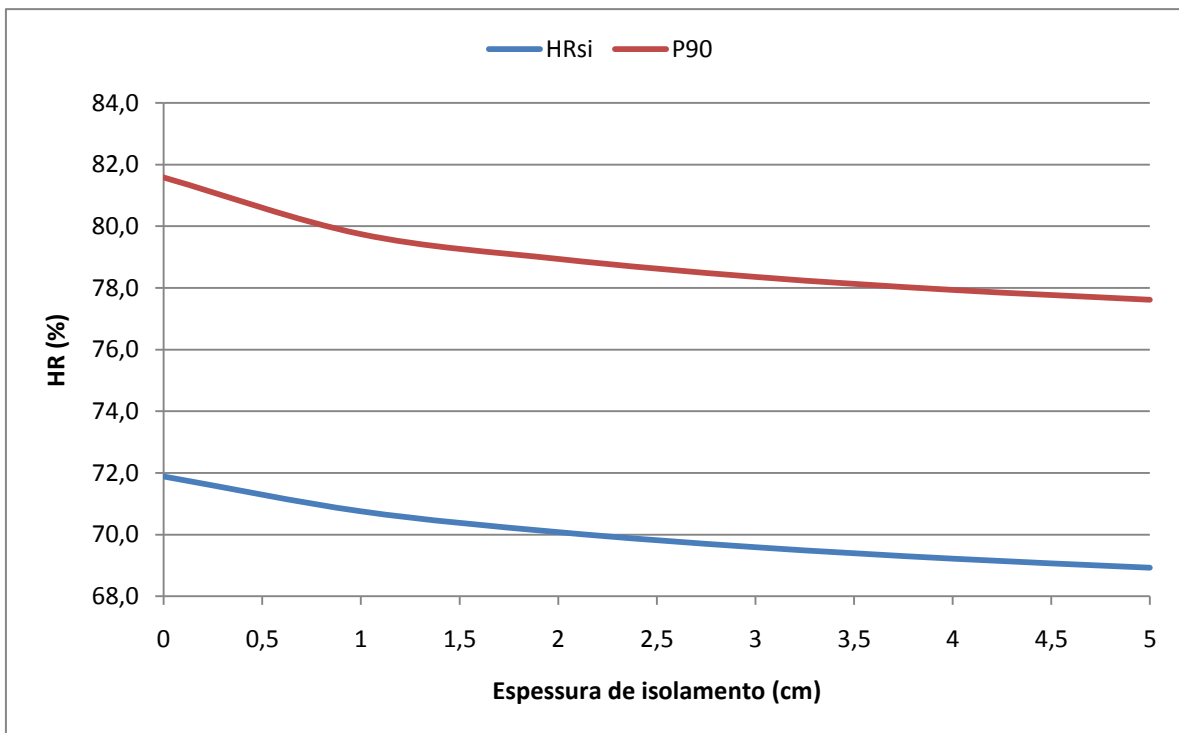


Figura 42 – Valores médios e P90 da HRsi no quarto 1

Existe um claro decréscimo dos valores da humidade relativa com o aumento de espessura de isolamento.

De notar é o fato de no percentil 90 da situação sem isolamento a humidade relativa está acima dos 80%, o que pode provocar problemas, mas com a adição de apenas 1 cm de isolamento já passa a estar abaixo do patamar dos 80%, sendo assim evidentes as melhorias nas condições de habitabilidade.

4.4. RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS

A existência de condensações é uma condicionante ao bem-estar dos ocupantes. Assim foi necessário determinar a existência de condensações no apartamento através da humidade relativa superficial. O critério utilizado foi que se a humidade relativa superficial fosse igual a 100% existiam condensações.

De acordo com a norma EN 13788 existe risco de desenvolvimento de fungos quando a humidade relativa superficial é superior a 80% durante vários dias. Assim é necessário determinar o número de dias em que esse fenómeno se verifica.

Um outro fator verificado foi o Time of Wetness. A diferença entre o TOW e a humidade relativa superficial consiste no facto de enquanto que a humidade relativa superficial ser determinada hora a hora o TOW corresponde ao quociente entre o número de horas por dia em que a humidade relativa superficial está acima dos 80% e o número total de horas por dia. Como já foi referido no capítulo 2 um dia é considerado problemático quando o fator TOW está acima dos 0,5, ou seja durante mais de 12 horas num dia a humidade relativa superficial está acima dos 80%.

Para tal utiliza-se o EnergyPlus de forma a obter a temperatura superficial e a concentração de vapor no ar do ar interior. Utilizando a equação (4) determina-se assim a humidade relativa superficial nos elementos em contato com o ar exterior, visto que são os que teoricamente poderão provocar mais problemas.

Para o caso em estudo foram utilizados os regimes de ventilação constante de $0,3h^{-1}$ e $0,6h^{-1}$ na determinação dos fatores acima descritos. Os compartimentos para os quais foi feita esta análise foram o quarto 1, quarto 2 e a sala. Nos quadros 10, 11 e 12 estão apresentados os valores determinados para um ano típico no Porto.

É importante referir que os dados retirados do EnergyPlus são dados horários e que as zonas da habitação em estudo estão sem aquecimento.

Quadro 10 – Fatores de análise do Quarto 1

	Rph=0,3h ⁻¹	Rph=0,6h ⁻¹
Nº horas condensações	0,00	0,00
Nº horas HR>80%	4866,00	1926,00
Nº dias HR>80%	256,00	168,00
Nº dias TOW>0,5	211,00	81,00
HRsi Máximo (%)	98,41	96,88
HRsi Mínimo (%)	35,81	16,63

Quadro 11 – Fatores de análise do Quarto 2

	Rph=0,3h⁻¹	Rph=0,6h⁻¹
Nº horas condensações	0,00	0,00
Nº horas HR>80%	4561,00	1690,00
Nº dias HR>80%	245,00	151,00
Nº dias TOW>0,5	198,00	59,00
HRsi Máximo (%)	95,28	96,16
HRsi Mínimo (%)	22,15	25,17

Quadro 12 – Fatores de análise da Sala

	Rph=0,3h⁻¹	Rph=0,6h⁻¹
Nº horas condensações	0,00	0,00
Nº horas HR>80%	1117,00	562,00
Nº dias HR>80%	101,00	41,00
Nº dias TOW>0,5	48,00	25,00
HRsi Máximo (%)	89,48	92,31
HRsi Mínimo (%)	22,79	11,24

Através da análise dos quadros acima facilmente se verifica que não existem condensações durante todo o ano nos compartimentos em análise uma vez que a humidade relativa máxima é de 98,60% no quarto 2.

Quanto à humidade relativa é preciso salientar a grande diferença de horas/dias entre os dois regimes de ventilação adotados. Tal diferença era esperada, pois ao existir uma maior renovação de ar interior a temperatura ponto de orvalho diminui, diminuindo assim as humidades relativas superficiais.

As figuras 43 e 44 comparam, para diferentes Rph, as temperaturas superficiais e a concentração de vapor no ar repetivamente.

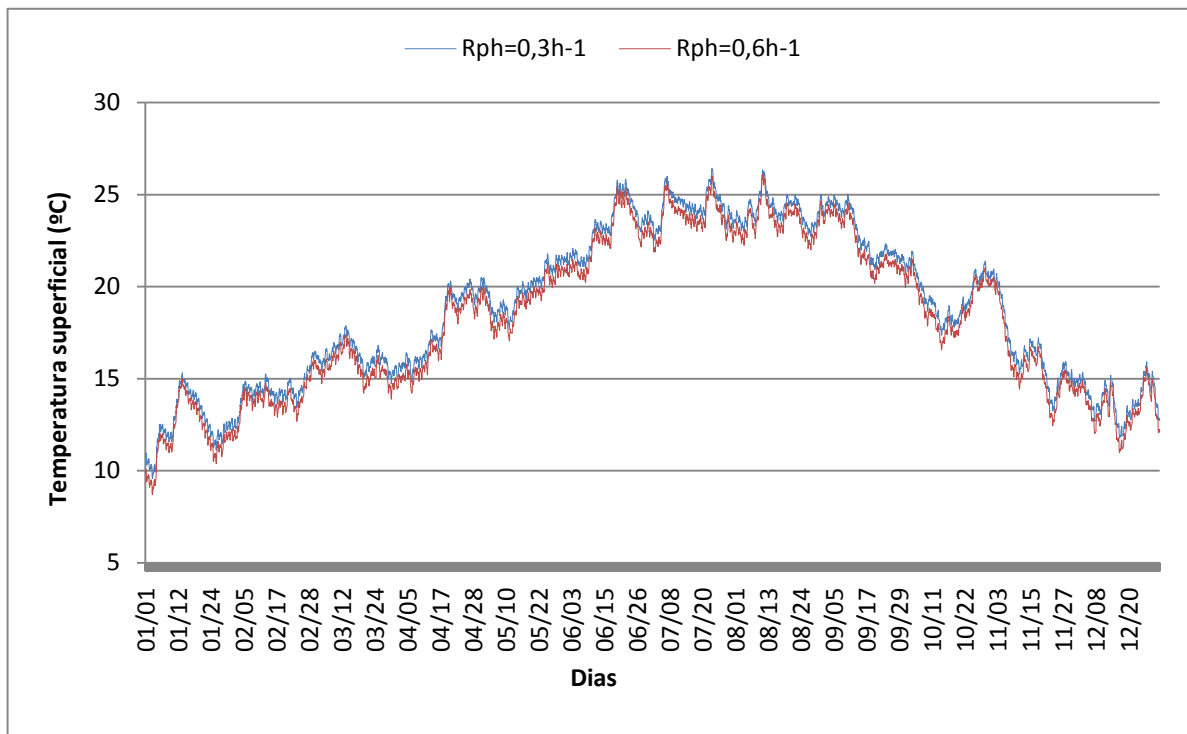


Figura 43 - Comparação da temperatura superficial para diferentes Rph no quarto 1

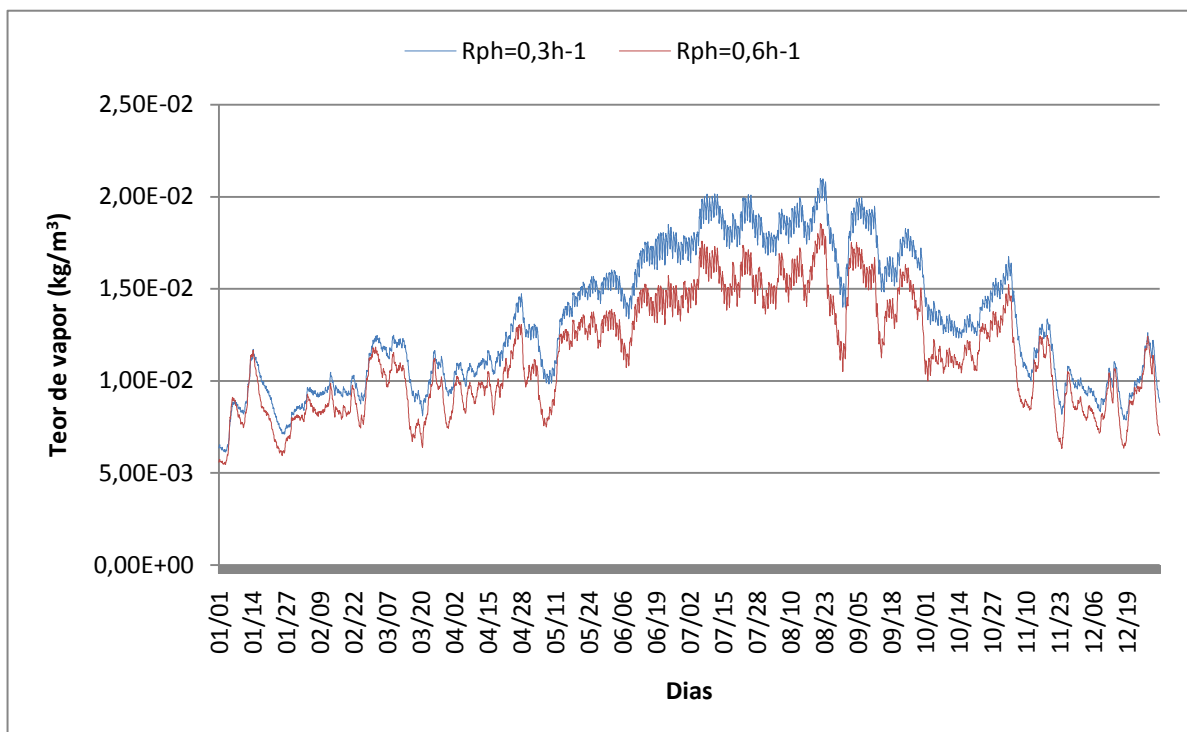


Figura 44 - Comparação da concentração de vapor no ar para diferentes Rph no quarto 1

Como a humidade relativa superficial tem um decréscimo o mesmo acontece no fator TOW.

Como já foi referido anteriormente procedeu-se à introdução de camadas de isolamento de forma a tentar prevenir o aparecimento de problemas de carácter higrotérmico. A introdução das novas camadas de isolamento modificou a constituição dos elementos construtivos da habitação, em particular das paredes. Assim a nova constituição das superfícies em contacto com o exterior é assim apresentada no quadro 13.

Quadro 13 – Nova constituição das paredes exteriores Sudoeste e Nordeste

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]
Tijolo face à vista	0,11	0,861	1788	868
Caixa de ar	0,04	0,23	1,3	1000
Tijolo vazado	0,11	0,42	900	850
Reboco	0,02	0,8	1900	850
Lã de rocha	-	0,04	60	850
Placa de Gesso Cartonado	0,0125	0,2	850	850

Foi assim simulada a habitação para diferentes valores da espessura da lã de rocha de forma a determinar uma espessura que permita resolver o máximo de problemas relacionados com a humidade possível. Os quadros 14, 15 e 16 mostram a evolução dos fatores analisados para os três compartimentos estudados anteriormente com as respetivas variações do regime de ventilação.

Quadro 14 – Simulações do EnergyPlus para diferentes espessuras de isolamento no Quarto 1

		Espessura (cm)					
		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Rph=0,3 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	4866,00	4631,00	4477,00	4371,00	4278,00	4207,00
	Nº dias HR>80%	256,00	238,00	232,00	226,00	224,00	222,00
	Time of Wetness	211,00	201,00	191,00	187,00	182,00	176,00
	Máximo	98,41	96,70	96,03	95,65	95,40	95,21
	HRsi Mínimo (%)	35,81	35,80	35,75	34,93	35,00	35,05
Rph=0,6 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	1926,00	1594,00	1406,00	1297,00	1220,00	1171,00
	Nº dias HR>80%	168,00	146,00	137,00	126,00	120,00	113,00
	Nº dias TOW>0,5	81,00	56,00	48,00	45,00	41,00	41,00
	HRsi Máximo (%)	96,88	94,81	93,73	93,12	92,70	92,43
	HRsi Mínimo (%)	16,63	16,76	16,81	16,85	16,89	16,92

Quadro 15 - Simulações do EnergyPlus para diferentes espessuras de isolamento no Quarto 2

		Espessura (cm)					
		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Rph=0,3 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	4561,00	4298,00	4036,00	3562,00	3358,00	3116,00
	Nº dias HR>80%	245,00	234,00	231,00	225,00	221,00	220,00
	Nº dias TOW>0,5	198,00	197,00	187,00	181,00	175,00	164,00
	HRsi Máximo (%)	95,28	95,15	94,97	94,81	94,82	94,77
	HRsi Mínimo (%)	22,15	22,10	22,07	21,98	21,93	21,80
Rph=0,6 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	1690,00	1450,00	1352,00	1266,00	1185,00	1116,00
	Nº dias HR>80%	151,00	144,00	130,00	128,00	128,00	125,00
	Nº dias TOW>0,5	59,00	44,00	40,00	37,00	35,00	33,00
	HRsi Máximo (%)	96,16	93,99	92,94	92,37	92,02	91,79
	HRsi Mínimo (%)	25,17	24,96	24,78	24,62	24,50	24,41

Quadro 16 - Simulações do EnergyPlus para diferentes espessuras de isolamento na Sala

		Espessura (cm)					
		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Rph=0,3 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	1117,00	829,00	695,00	615,00	554,00	492,00
	Nº dias HR>80%	101,00	79,00	69,00	65,00	63,00	57,00
	Nº dias TOW>0,5	48,00	33,00	24,00	21,00	19,00	17,00
	HRsi Máximo (%)	89,48	88,23	87,43	87,01	86,50	86,24
	HRsi Mínimo (%)	22,79	22,65	22,58	22,28	22,15	22,14
Rph=0,6 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	562,00	466,00	414,00	381,00	353,00	322,00
	Nº dias HR>80%	41,00	34,00	34,00	33,00	31,00	30,00
	Nº dias TOW>0,5	25,00	20,00	17,00	15,00	12,00	12,00
	HRsi Máximo (%)	92,31	90,97	90,41	90,01	89,75	89,57
	HRsi Mínimo (%)	11,24	11,21	11,13	11,09	11,12	11,15

Com esta análise pode se concluir que o quarto 1 é onde existem mais problemas de humidades relativas e TOW.

Feita esta análise é importante ter uma melhor noção da evolução das temperaturas com o aumento da espessura de isolamento.

As figuras 45 e 46 representam essa evolução.

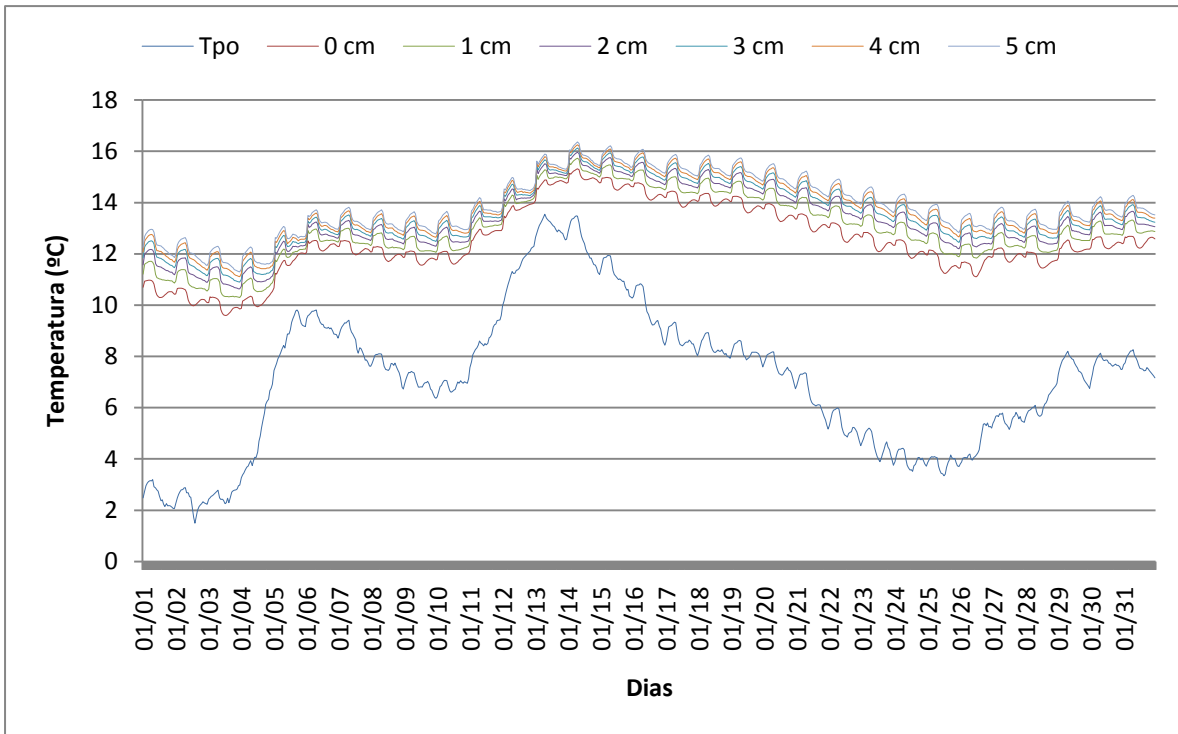


Figura 45 – Evolução em Janeiro das temperaturas superficiais com $R_{ph}=0,3h^{-1}$

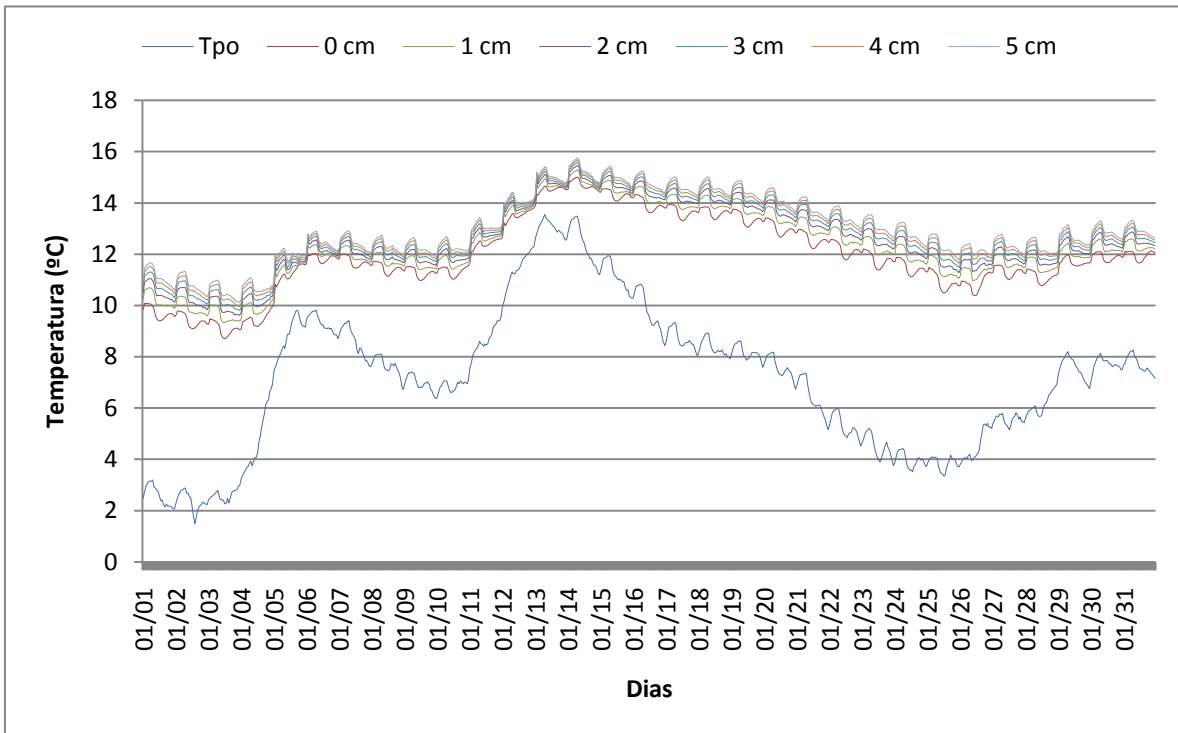


Figura 46 – Evolução em Janeiro das temperaturas superficiais com $R_{ph}=0,6h^{-1}$

Como se pode observar as temperaturas para um Rph de $0,3h^{-1}$ são ligeiramente superiores às temperaturas de um Rph de $0,6h^{-1}$. Nota-se igualmente um ligeiro aumento nas temperaturas à medida que a espessura de isolamento é maior afastando assim as temperaturas superficiais da temperatura ponto de orvalho. Contudo ainda existem algumas intersecções, o que significa que essas são as horas/dias em que surgem problemas de humidades.

Quanto maior for a diferença entre a temperatura ponto de orvalho e as temperaturas superficiais mais difícil será a resolução do problema de humidades, pois irá implicar uma camada de isolamento muito espessa. Este problema apenas será resolvido recorrendo-se a aquecimento ou desumidificadores.

Assim o comportamento do quarto 1 será agora simulado utilizando aquecedores.

Foi simulado o comportamento do quarto 1 utilizando dois cenários, 200W e 400W, com horários de funcionamento correspondendo a uma utilização contínua de 24 horas e outro com o período de ocupação do quarto, pré-definido das 24:00 às 08:00.

Nos quadros 17 e 18 são apresentados os resultados correspondentes ao horário de aquecimento contínuo.

Quadro 17 – Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento contínuo com potência de 200W

		Espessura (cm)					
		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Rph=0,3 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	1421,00	593,00	304,00	187,00	123,00	71,00
	Nº dias HR>80%	137,00	55,00	24,00	15,00	12,00	10,00
	Nº de dias TOW>0,5	43,00	21,00	15,00	10,00	5,00	0,00
	HRsi Máximo (%)	88,70	85,29	83,67	82,82	81,94	81,19
	HRsi Mínimo (%)	56,79	56,23	55,73	54,99	54,43	54,01
Rph=0,6 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	74,00	14,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº dias HR>80%	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº de dias TOW>0,5	3,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	HRsi Máximo (%)	83,51	80,94	79,64	78,81	78,22	77,76
	HRsi Mínimo (%)	41,55	40,96	40,39	39,62	39,35	39,35

Quadro 18 - Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento contínuo com potência de 400W

		Espessura (cm)					
		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Rph=0,3 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	91,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº dias HR>80%	17,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº de dias TOW>0,5	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	HRsi Máximo (%)	82,72	79,09	77,34	76,21	75,28	74,56
	HRsi Mínimo (%)	50,98	50,15	49,55	48,79	48,13	47,63
Rph=0,6 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº dias HR>80%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº de dias TOW>0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	HRsi Máximo (%)	75,20	72,39	70,65	69,58	68,76	68,09
	HRsi Mínimo (%)	36,13	34,92	34,07	69,58	32,99	32,59

Comparando os dados de sem aquecimento com aquecimento pode-se determinar que existe uma diminuição acentuada em todos os parâmetros higrotérmicos. Um aquecedor de potência de 200 W permite resolver os dias com TOW superiores a 0,5 com apenas 2 cm de isolamento para um Rph de 0,6h⁻¹, enquanto que com uma potência de 400W para o mesmo número de renovações horárias nem HR acima dos 80% existem mesmo sem isolamento.

Contudo estes resultados pressupõem um funcionamento contínuo de aquecedores no quarto durante todo o dia, como a habitação em estudo está inserida num bairro social as famílias residentes não conseguem arcar com os gastos monetários relacionados. Assim nos quadros 19 e 20 estão apresentados os valores fornecidos pelo EnergyPlus para um aquecimento durante o período de ocupação do quarto 1.

Quadro 19 - Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento de 8h com potência de 200W

		Espessura (cm)					
		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Rph=0,3 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	3452,00	2599,00	1963,00	1626,00	1360,00	1193,00
	Nº dias HR>80%	195,00	149,00	114,00	94,00	83,00	76,00
	Nº de dias TOW>0,5	154,00	114,00	88,00	75,00	56,00	53,00
	HRsi Máximo (%)	91,67	88,54	87,29	86,54	86,11	85,79
	HRsi Mínimo (%)	59,71	59,48	59,09	58,77	58,31	57,92
Rph=0,6 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	647,00	389,00	253,00	183,00	137,00	124,00
	Nº dias HR>80%	41,00	24,00	16,00	13,00	8,00	7,00
	Nº de dias TOW>0,5	31,00	18,00	11,00	7,00	6,00	5,00
	HRsi Máximo (%)	89,88	87,38	86,07	85,35	84,91	84,63
	HRsi Mínimo (%)	46,39	46,02	45,65	85,35	45,12	44,92

Quadro 20 - Simulações do EnergyPlus para um período de aquecimento de 8h com potência de 400W

		Espessura (cm)					
		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Rph=0,3 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	2371,00	1426,00	926,00	614,00	414,00	339,00
	Nº dias HR>80%	158,00	97,00	65,00	44,00	30,00	24,00
	Nº de dias TOW>0,5	101,00	63,00	41,00	25,00	18,00	15,00
	HRsi Máximo (%)	89,25	86,64	85,13	84,27	83,81	83,70
	HRsi Mínimo (%)	58,84	57,98	57,32	56,82	56,34	55,98
Rph=0,6 (h⁻¹)	Nº horas condensações	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nº horas HR>80%	225,00	83,00	56,00	31,00	16,00	14,00
	Nº dias HR>80%	15,00	5,00	5,00	5,00	2,00	1,00
	Nº de dias TOW>0,5	10,00	4,00	3,00	1,00	1,00	0,00
	HRsi Máximo (%)	85,95	83,61	82,20	81,41	80,95	80,66
	HRsi Mínimo (%)	44,26	43,71	43,21	81,41	42,49	42,26

Como esperado os resultados não são tão bons como os dos quadros 17 e 18, no entanto existe uma descida considerável nos parâmetros em estudo.

De seguida nas figuras 47 e 48 mostra-se a evolução do número de dias em que TOW está acima de 0,5 com o aquecimento. As curvas estão de acordo com um Rph de 0,6h⁻¹.

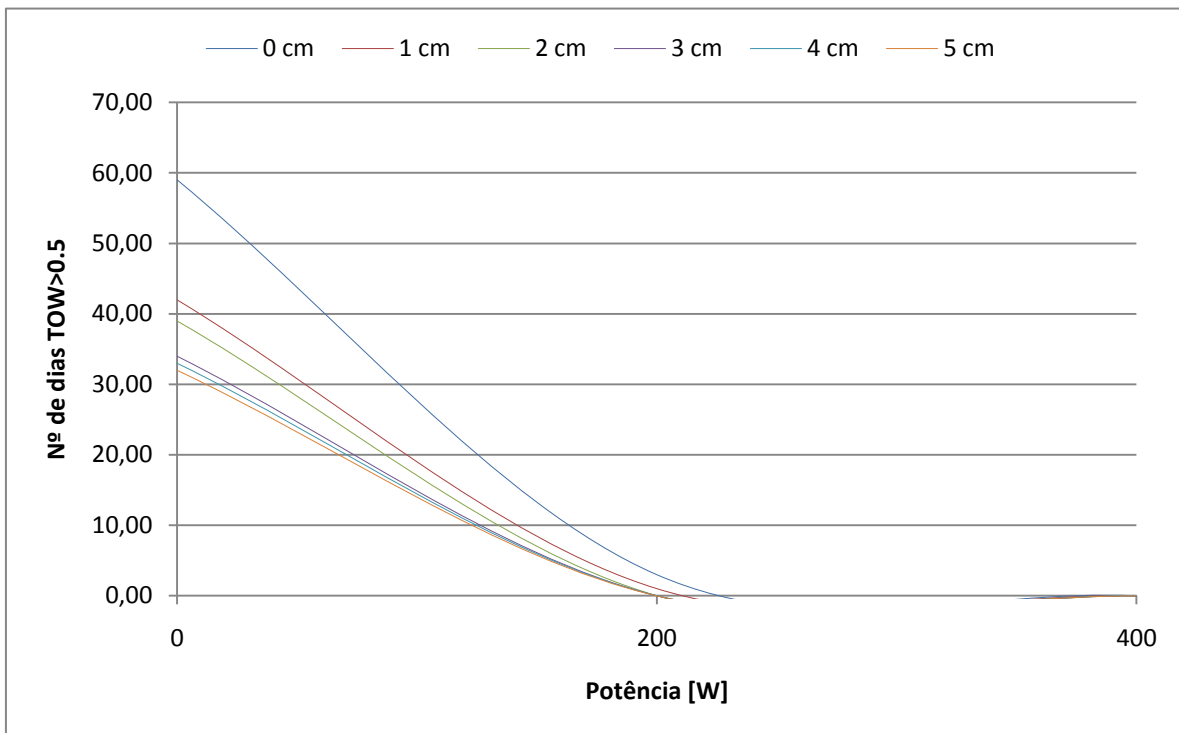


Figura 47 – Evolução do número de dias em que TOW>0,5 com aquecimento contínuo

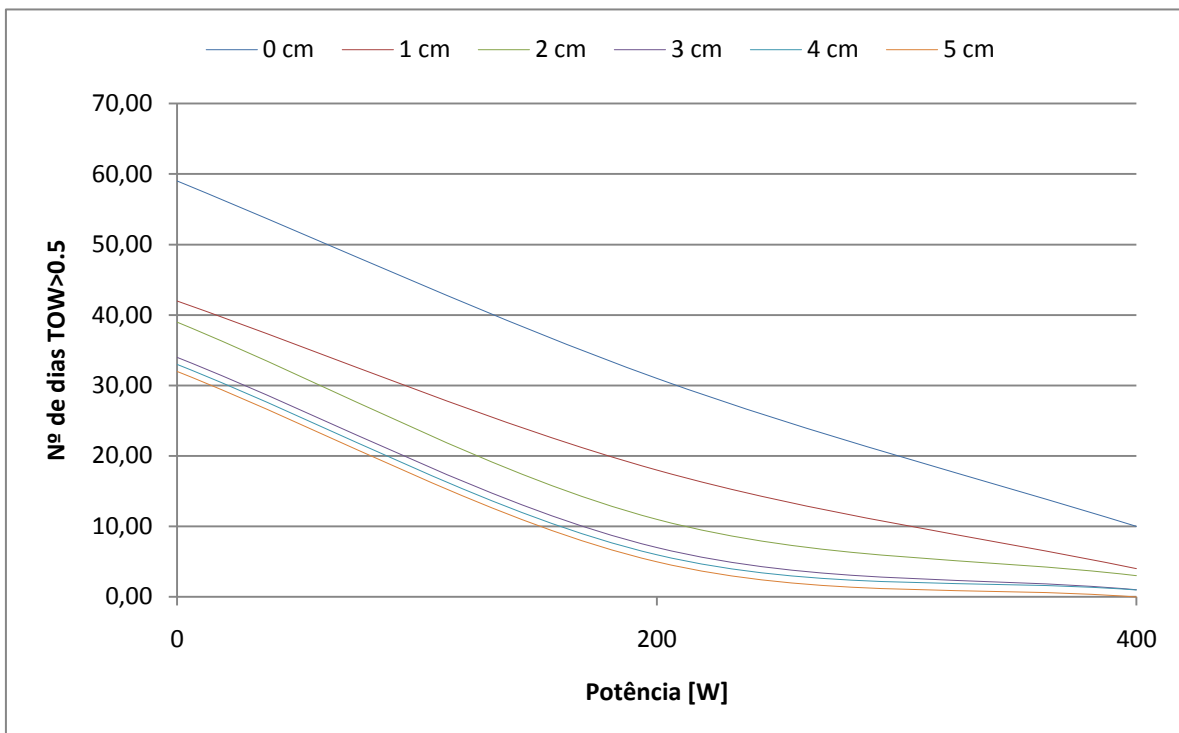


Figura 48 - Evolução do número de dias em que TOW>0,5 com aquecimento durante o horário de ocupação

As vantagens de se utilizar um aquecimento contínuo são evidentes, sendo que a mais clara é o fato de com apenas um aquecedor os dias em que TOW é superior a 0,5 desaparecem. Quando se tem um aquecimento coincidente com o horário de ocupação o número de dias em que TOW é superior a 0,5 diminui de forma constante, contudo para se obter o valor zero são necessários 5 cm de isolamento e dois aquecedores.

Analisando agora as temperaturas interiores para um Rph de $0,6 \text{ h}^{-1}$ nas figuras 49 e 50 pode-se concluir que, tal como esperado, as temperaturas são superiores para um regime de aquecimento contínuo em comparação com o aquecimento em regime de ocupação com um aquecedor.

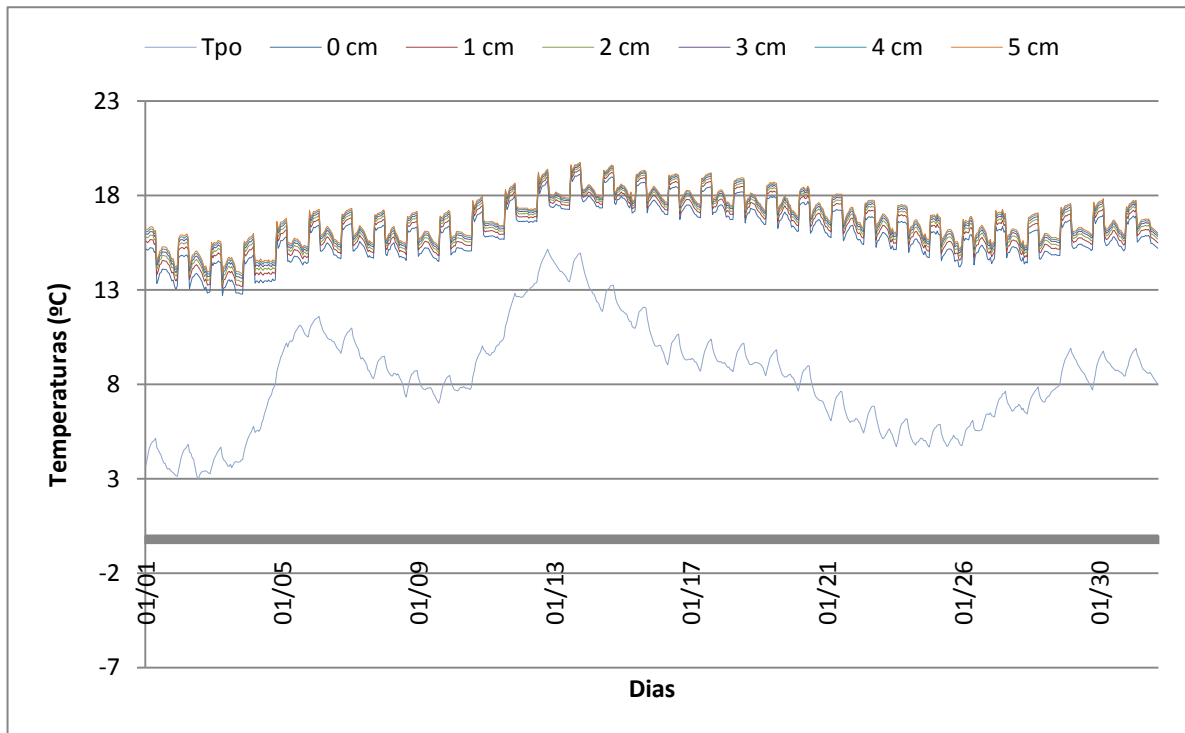


Figura 49 - Evolução das temperaturas em Janeiro para um regime de aquecimento contínuo com potência de 200W

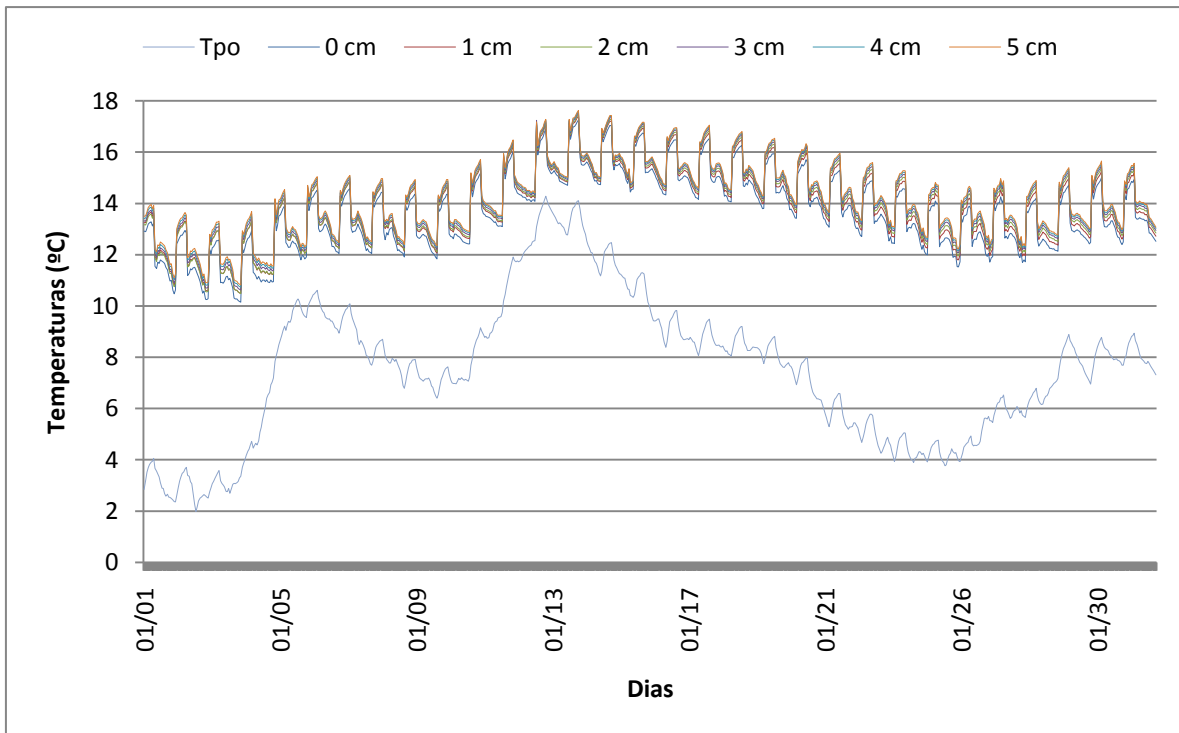
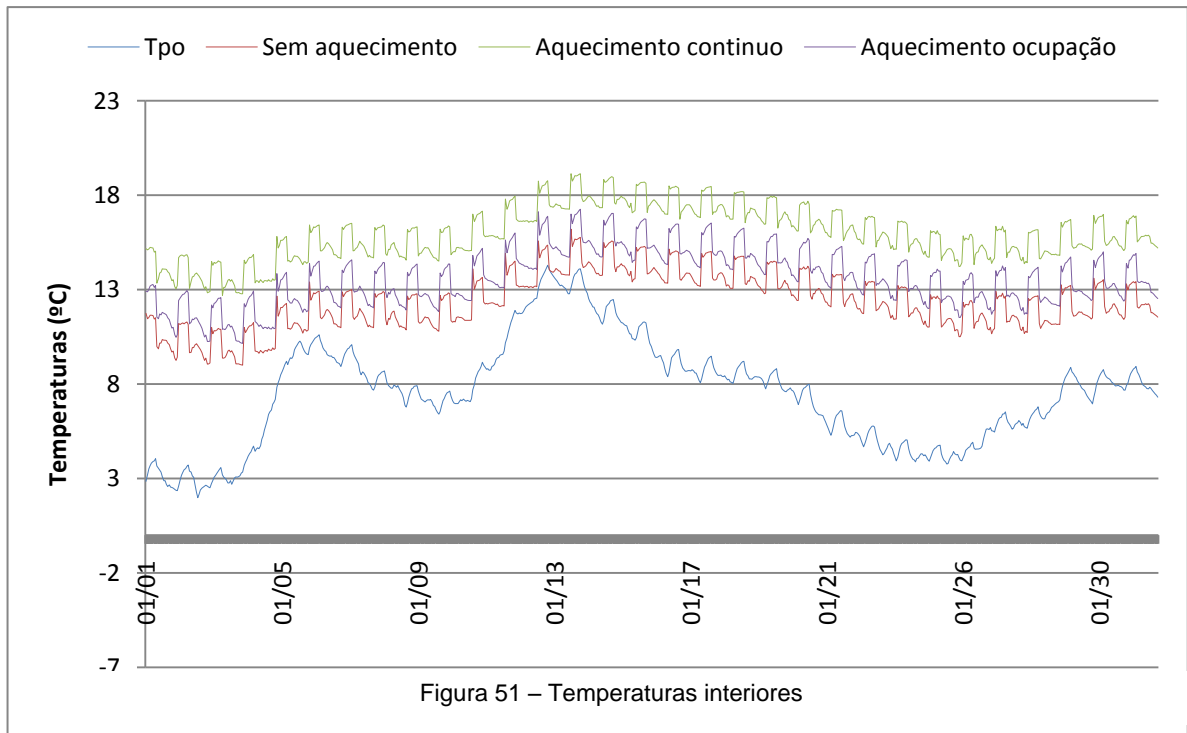


Figura 50 – Evolução das temperaturas em Janeiro para um regime de aquecimento de ocupação com potência de 200W

De notar que utilizando um regime de aquecimento contínuo as temperaturas interiores estão sempre acima das temperaturas ponto de orvalho durante o mês de Janeiro, tal não acontece no aquecimento durante o horário de ocupação.

A figura 51 mostra uma comparação entre as temperaturas interiores para as situações de sem aquecimento, aquecimento contínuo e aquecimento em horário de ocupação para uma espessura de 0 cm e utilização, nos casos de aquecimento, de um aquecedor de potência de 200W.



5

PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

5.1. FORMULAÇÃO DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO

Neste capítulo apresentado com detalhe o programa de otimização.

As restrições do problema em questão têm por base as equações (5) e (7) apresentadas no capítulo 2, enquanto que a função objetivo consiste em minimizar a espessura de isolamento a atribuir aos elementos construtivos.

Em síntese, a formulação completa do modelo de otimização do isolamento dos elementos construtivos traduz-se, como um problema não linear, como a seguir se indica:

$$\text{Minimizar:} \quad \sum_{i=1}^{N_p} A_i (x_i^{mw} + x_i^\alpha) + \sum_{j=N_p+1}^{N_s} A_j x_j^{vid} \quad (10)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad T_t^{int} = \frac{\sum_{o=1}^{N_{sl}} Q_{ot} + \sum_{l=1}^{N_s} h_l A_l T_{lt}^S + m_{inf} C_p T_t^{ext} - \left(\frac{C}{\Delta t}\right) \left(-3T_{t-\Delta t}^{int} + \frac{3}{2} T_{t-2\Delta t}^{int} - \frac{1}{3} T_{t-3\Delta t}^{int}\right)}{\left(\frac{11}{6}\right) \frac{C}{\Delta t} + \sum_{l=1}^{N_s} h_l A_l + m_{inf} C_p} \quad (11)$$

$$\rho^\alpha C_p^\alpha (x_i^\alpha)^2 x_i^{mw} (T_{it}^\alpha - T_{it-1}^\alpha) = (\lambda^\alpha x_i^{mw} (T_t^\alpha - T_{it}^\alpha) + \lambda^{mw} x_i^\alpha (T_{it}^S - T_{it}^\alpha)) \Delta t \quad (12)$$

$$\rho^{mw} C_p^{mw} (x_n^{mw})^2 (T_{nt}^S - T_{nt-1}^S) = \left(\lambda^{mw} (T_{nt}^\alpha - T_{nt}^S) + h_n x_n^{mw} (T_t - T_{nt}^S) + x_n^{mw} \frac{RD^t}{\sum_{l=1}^{N_s} A_l} \right) \Delta t \quad (13)$$

$$\rho^\beta C_p^\beta (x_k^\beta)^2 (T_{kt}^S - T_{kt-1}^S) = (\lambda^\beta (T_t^c - T_{kt}^S) + h_k x_k^\beta (T_t^{int} - T_{kt}^S)) \Delta t \quad (14)$$

$$P \times T_{nt}^S \geq T_p o_t \quad (15)$$

$$T_{min} \leq T_t^{int} \leq T_{max} \quad , \quad \text{se} \quad \sum_{k=1}^{N_{sl}} Q_{ot} > 0 \quad (16)$$

$$x_n^{mw} \geq 0 \quad (17)$$

onde $i=1, \dots, N_{tij}, j=N_{tij+1} \dots, N_p, k=N_{p+1} \dots, N_s, l=1, \dots, N_s, n=1 \dots, N_p, t=1, \dots, N_t, o=1, \dots, N_{sl}, c \in \{ext, int\}, \alpha \in \{tij, bet\}$ e $\beta \in \{vid, tij, bet\}$

No presente caso em estudo x_i^{tij}, x_j^{bet} e x_k^{vid} são valores fixos de 0,3, 0,25 e 0,006 m para as respetivas superfícies, assim a única variável que se pretende minimizar é x_n^{mw} .

Assim os seguintes termos são variáveis do problema:

T_t^{int} – temperatura média do ar interior no instante de tempo t ;

x_n^{mw} – espessura do isolamento térmico do elemento opaco n ;

T_{it}^S – temperatura superficial interior da superfície l no instante de tempo t ;

E em que os seguintes termos são os dados do problema:

N_t – número de intervalo de tempo em análise;

Q_{ot} – ganhos internos no instante de tempo t ;

N_p – número de elementos opacos;

N_{tij} – número de elementos opacos de tijolo;

N_s – número de superfícies;

h_l – coeficiente de transferência da superfície l ;

A_l – área da superfície l ;

m_{inf} – massa de ar infiltrado [kg/s];

T_t^{ext} – temperatura do ar exterior no instante de tempo t ;

T_t^c – temperatura do ar exterior no instante de tempo t se j é o elemento opaco teto. Caso contrário, temperatura do ar interior no instante de tempo t ;

$\left(\frac{C}{\Delta t} \right)$ – energia armazenada no ar no espaço de tempo Δt ;

$T_{t-\Delta t}^{int}$ – temperatura média do ar interior no 1º instante anterior ao instante t ;

$T_{t-2\Delta t}^{int}$ – temperatura média do ar interior no 2º instante anterior ao instante t ;

$T_{t-3\Delta t}^{int}$ – temperatura média do ar interior no 3º instante anterior ao instante t ;

ρ – densidade do material;

C_p – calor específico do material;

x – espessura do material;

λ – condutibilidade térmica do material;

T_{po} – temperatura ponto de orvalho;

T_{min} – temperatura mínima [°C];

T_{max} – temperatura máxima [°C];

Δt – intervalo de tempo considerado;

$t-1$ – instante de tempo anterior ao instante t ;

P – percentagem (0,8);

RD^t – ganhos solares distribuídos pelas superfícies no instante t ;

Para resolver este programa não linear foi utilizado o programa comercial MINOS da colecção GAMS [17].

Esta colecção de programas comerciais foi desenvolvida para resolver problemas de otimização de grande dimensão expressos na seguinte forma:

$$\text{Minimizar:} \quad F(x) + c^T x + d^T y \quad (18)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad f(x) + A_1 y \langle \rangle b_1 \quad (19)$$

$$A_2 x + A_3 y \langle \rangle b_2 \quad (20)$$

$$l \leq x, y \leq u \quad (21)$$

Onde:

c, d, b_1, b_2, l e u – vetores dados;

A_1, A_2 e A_3 – matrizes dadas;

$F(x)$ – função escalar não linear diferenciável;

$f(x)$ – vetor de funções diferenciáveis;

$\langle \rangle$ – indica que as restrições podem ser definidas através do uso dos sinais $\leq, =$ ou \geq ;

x – variáveis não lineares;

y – variáveis lineares;

As expressões (19) e (20) são restrições gerais, respetivamente denominadas por restrições não lineares e lineares [17].

As restrições tipo (21) representam os limites inferiores (l) e superiores (u) das variáveis em estudo, que em alguns problemas de otimização podem ser, respetivamente, $-\infty$ e $+\infty$ [17].

Como no caso em estudo, existem restrições não lineares, isto é, $f(x) \neq 0$, o GAMS possui o solver MINOS capaz de resolver este tipo de problemas. O MINOS aplica um algoritmo de projeção Lagrangeano aumentado baseado no método criado por Robinson na década de 70 [17]. Este processo é constituído por uma sequência de iterações, em que cada uma exige a solução de um subproblema com restrições lineares. Cada um destes subproblemas contém linearizações das restrições não lineares, bem como as restrições lineares originais e os limites das variáveis [17].

Como este assunto não está no âmbito desta dissertação, sugere-se [17] para um estudo mais detalhado.

O objetivo do programa é determinar a espessura de isolamento térmico mínima a colocar nos elementos construtivos do edifício em estudo sem recurso a aquecimento do edifício. No entanto, se o problema em questão for inadmissível, o programa desenvolvido permite determinar a potência mínima de aquecimento a colocar no quarto em estudo, de forma a que as restrições impostas sejam cumpridas. Este aquecimento está de acordo com o utilizado na simulação com o EnergyPlus, tendo uma potência múltipla de 200W e um funcionamento durante a ocupação da divisão.

Como o programa de otimização utilizado é uma ferramenta ainda em desenvolvimento, são utilizadas simplificações do problema em questão que não se verificam em esquemas de modelação mais completos, como sendo o programa EnergyPlus.

Uma importante simplificação é o fato de a parede exterior se considerar constituída apenas por tijolo, e não pela constituição apresentada em 3.3.. De forma a procurar que a parede tenha um comportamento o mais parecido possível com a sua constituição original foi considerado que o tijolo tem uma espessura de 0,3 m. O quarto 1 fica assim com uma parede exterior de tijolo, uma laje de cobertura de betão com isolamento e paredes interiores de betão com 15 cm de espessura.

Outra simplificação passa pela consideração dos ganhos internos por convecção de forma média ao longo de todo o ano, ou seja os valores dos ganhos devidos à ocupação e iluminação são substituídos pelo seu valor médio, nos períodos de ocupação.

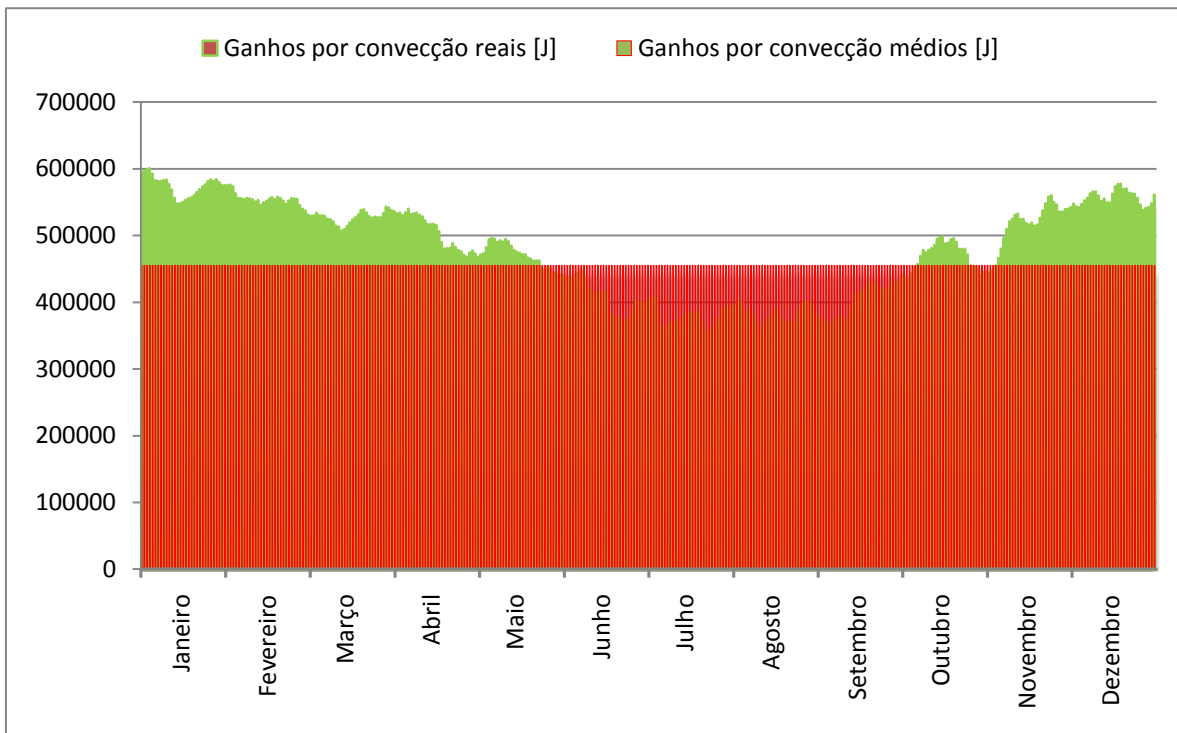
As restrições impostas ao programa serão apresentadas em detalhe posteriormente, contudo é necessário referir que o objetivo principal é encontrar uma espessura de isolamento que permita minimizar o risco de desenvolvimento de fungos na envolvente.

5.2. DADOS INTRODUZIDOS NO PROGRAMA

5.2.1. GANHOS INTERNOS

A parcela Q_{ot} na equação (11) representa os ganhos, em cada instante de tempo, devido à ocupação e iluminação do apartamento. Como simplificação, no programa de otimização, serão utilizados os valores médios.

Na figura 52 são apresentados os valores dos ganhos internos por convecção bem como os seus valores médios durante o ano para o quarto 1.



5.2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A equação (22) representa a transferência de calor por convecção na superfície dos elementos e corresponde à segunda parcela da equação (11).

$$\sum_{l=1}^{N_s} h_l A_l T_{lt}^S \quad (22)$$

O coeficiente de transferência por convecção h_l , depende do sentido do fluxo de calor no elemento.

O quadro 21 demonstra os valores de h_l para os diferentes fluxos de calor passíveis de ter no quarto 1. Como o estudo higrotérmico do edifício está a ser focado nos meses de Inverno, as temperaturas exteriores são inferiores às interiores, originando assim um fluxo ascendente. Assim para o teto tem-se um h de $5,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, e para a parede em contacto com o exterior, com fluxo horizontal, um h de $2,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Como as restantes paredes e chão estão em contacto com outro apartamento e/ou com outras divisões do apartamento são consideradas superfícies adiabáticas.

Quadro 21 – Coeficientes de Transferência de calor

Fluxo de calor	h [W/m ² .K]
Horizontal	2,5
Ascendente	5,0
Descendente	0,7

A variável A_1 representa a área das superfícies do quarto 1. Os valores dessas áreas utilizados no programa de otimização são apresentados no quadro 22.

Quadro 22 – Áreas dos elementos do quarto 1

Elemento	Área [m ²]
Parede exterior	4,93
Janela	1,32
Teto	11,50
Paredes Interiores	39,43

A temperatura superficial interior no instante de tempo t , é obtida recorrendo às equações (12) a (14) apresentadas anteriormente.

5.2.3. INFILTRAÇÃO DO AR EXTERIOR

A parcela da equação (11) que determina a massa de ar infiltrado no quarto 1 é a representada na equação (23).

$$m_{\text{inf}} C_p T_t^{\text{ext}} \quad (23)$$

A variável m_{inf} representa a massa de ar infiltrado na divisão em kg/s. Para a comparação entre o programa de otimização e o EnergyPlus ser fiável foi utilizado o mesmo valor das renovações horárias. Foi utilizado o valor de $0,6h^{-1}$.

No quadro 23 são apresentados os valores atribuídos ao calor específico, C_p , densidade, ρ , e condutibilidade, λ , dos materiais considerados no quarto 1.

Quadro 23 – Valores das características dos materiais

Material	C_p [J/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m.K)]
Lã de rocha	850	60	0,04
Tijolo	850	900	0,42
Betão	776	2104	1,37
Vidro	750	2500	1,1

Os valores da Temperatura exterior em cada instante t , é fornecido pelo EnergyPlus.

5.2.4. CAPACIDADE TÉRMICA

Na equação (11) existe uma parcela que determina a capacidade térmica do quarto em estudo, $\left(\frac{C}{\Delta t}\right)$

A variável C é calculada utilizando a fórmula (24):

$$C = \rho^{\text{ar}} C_p^{\text{ar}} V \quad (24)$$

Em que:

ρ^{ar} – massa volúmica do ar [kg/m³];

C_p^{ar} - calor específico do ar [J/(kg.K)];

V – volume da divisão [m³];

Os valores utilizados para a massa volúmica do ar e para o calor específico do ar são apresentados no quadro 24.

Quadro 24 – Densidade e calor específico do ar

Material	ρ [kg/m ³]	C_p [J/(kg.K)]
Ar	1,3	1004

No caso em estudo o quarto 1 tem um volume de 28,75 m³ (4,6x2,5x2,5).

5.2.5. TEMPERATURA SUPERFICIAL E TEMPERATURA INTERIOR

As equações (16) e (17) impõem as restrições de não existência de condensações superficiais e temperatura de conforto interior.

A condição (16) impõe que a temperatura superficial, calculada pelo programa de otimização, multiplicada por um fator P tem de ser sempre igual ou superior à temperatura ponto de orvalho. Assim, como a temperatura ponto de orvalho nunca é superior à temperatura superficial interior não

existem condensações. O fator P toma valores de 1 quando se quiser impedir as condensações superficiais e 0,8 quando o objetivo for prevenir dias com um TOW superior a 0,5.

A condição (17) define as temperaturas máximas e mínimas que o programa pode gerar. Assim as temperaturas interiores nunca podem ser superiores a 30°C e inferiores a uma temperatura de conforto definida pelo utilizador.

5.2.6. GANHOS SOLARES

Na equação (13) surge a parcela relativa aos ganhos solares, RD^t . Esta parcela é calculada através da equação (25), onde se inserem os dois tipos de radiações solares considerados.

$$RD^t = R \cdot P_d + D \quad (25)$$

Em que:

R – ganhos solares diretos [J]

P_d – percentagem de distribuição dos ganhos solares diretos pelas superfícies (0,6)

D – ganhos solares difusos [J]

As figuras 52 e 53 mostram os ganhos solares diretos e difusos respetivamente fornecidos pelo EnergyPlus

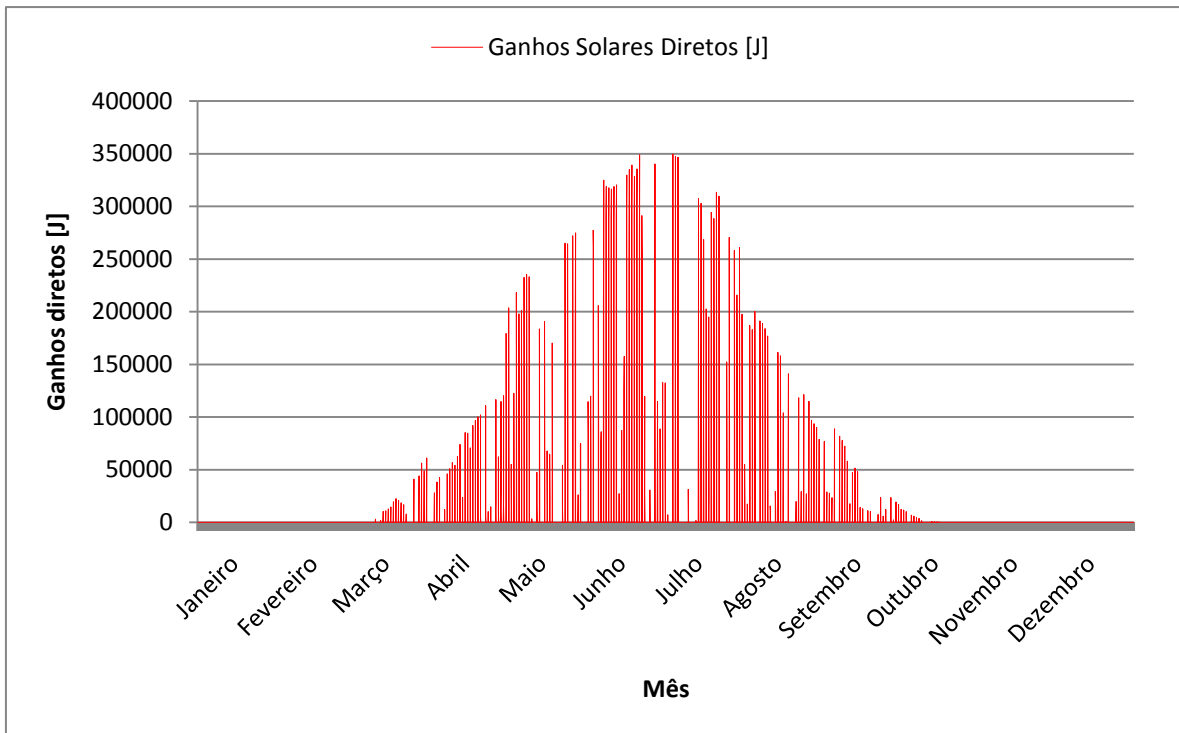


Figura 52 – Ganhos solares diretos no quarto 1

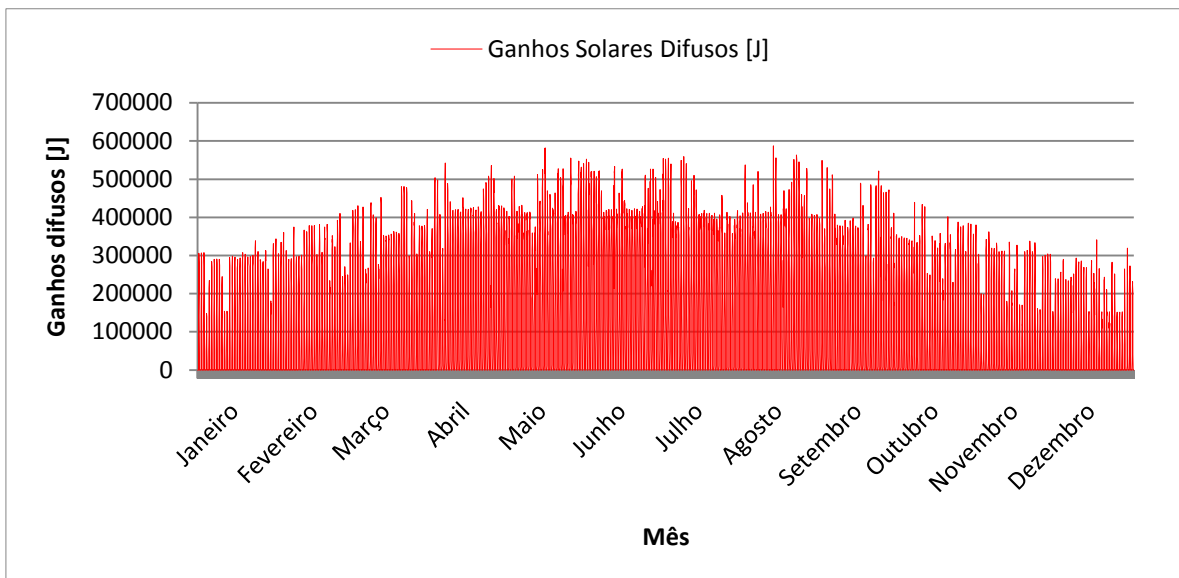


Figura 53 – Ganhos solares difusos no quarto 1

5.3. DIAS A OTIMIZAR

No ponto 4.4. foi feita uma análise anual com o EnergyPlus aos fatores condensações, HR superiores a 80% e dias em que o fator TOW está acima dos 0,5. Foi concluído que o quarto 1 era a divisão estudada que apresentava mais problemas, logo todo o processo de otimização é feito para essa divisão.

O programa permite a simulação de 1, 2 ou 3 dias consecutivos, e pelos testes efetuados por Esteves [20] a precisão de resultados não aumenta com o número de dias simulados.

O próximo passo é a determinação dos dias exatos em que existem problemas relacionados com os fatores determinados.

De acordo com o quadro 14 não existe risco de condensações, logo o processo de otimização será concentrado no fator TOW. Os meses de Janeiro e Dezembro são considerados os mais problemáticos devido às baixas temperaturas, assim escolheram-se dias desses meses para se fazer a otimização.

Assim para Janeiro utilizaram-se os dias 5 e 6 com TOW de 0,58 cada um, e para Dezembro o dia 23 com um TOW de 0,71.

De seguida nas figuras 54 e 55 são apresentadas as temperaturas superficiais e de ponto de orvalho interiores, fornecidas pelo EnergyPlus, nos dias escolhidos.

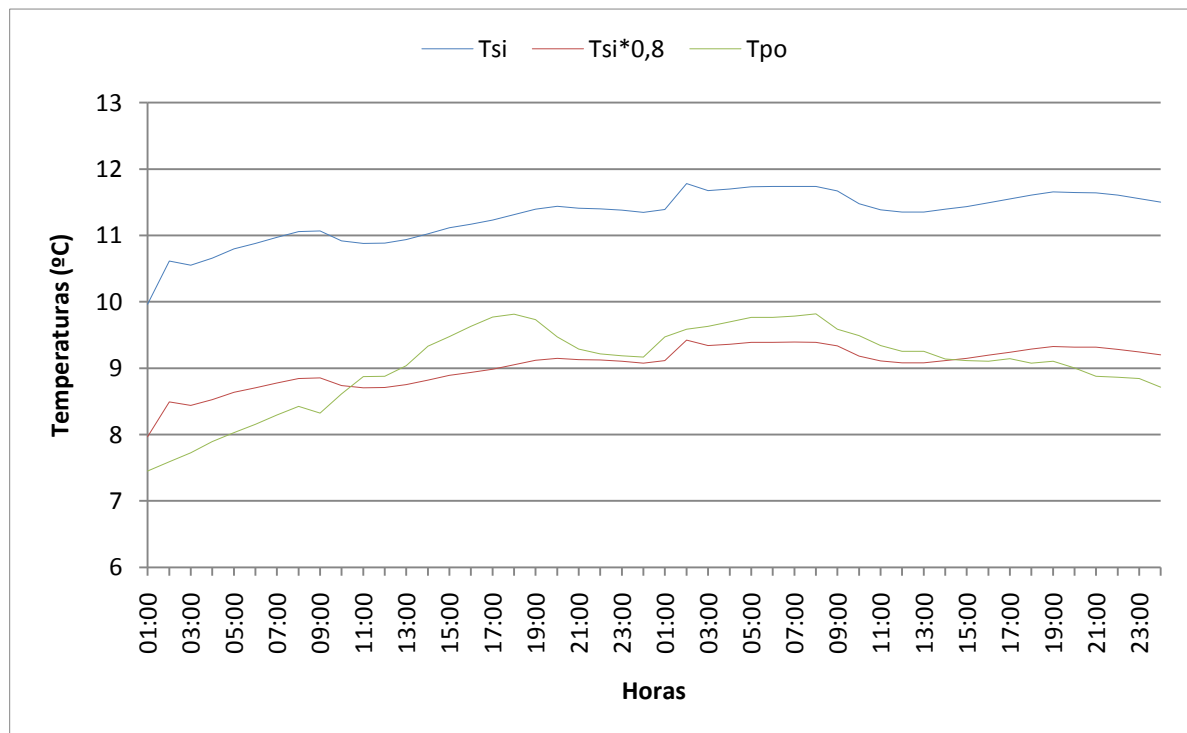


Figura 54 – Temperaturas nos dias 5 e 6 de Janeiro

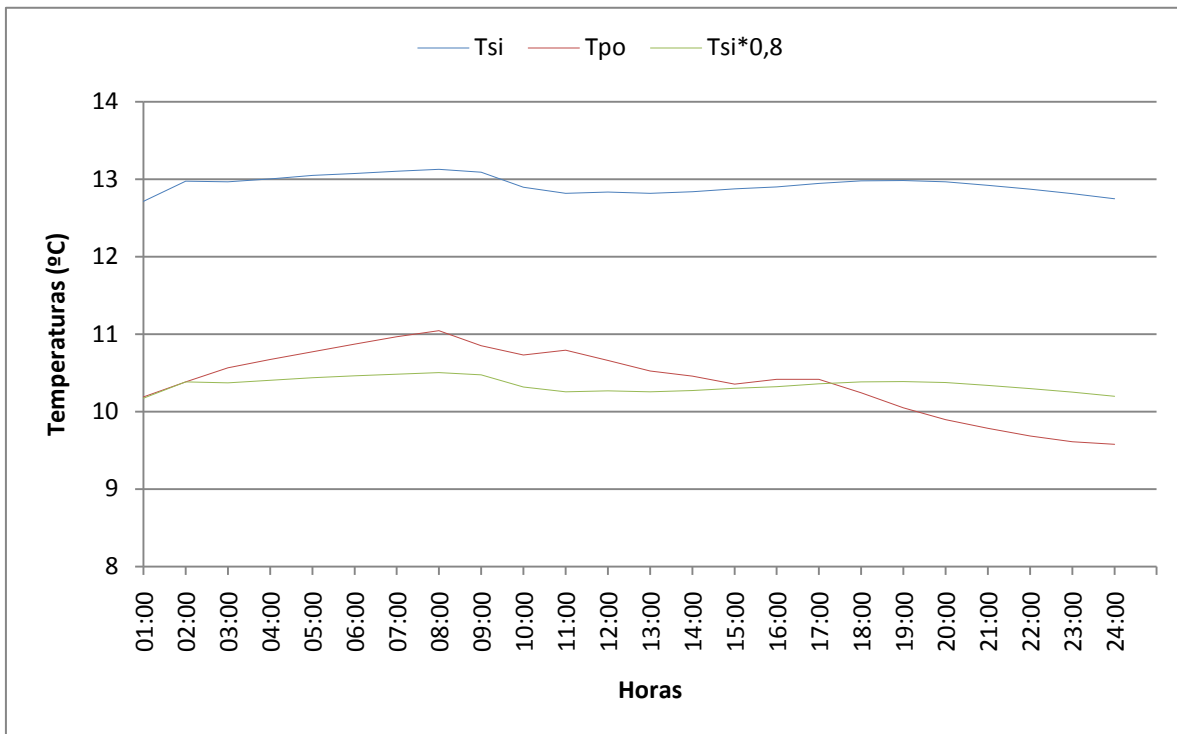


Figura 55 – Temperaturas no dia 23 de Dezembro

Nas figuras é visível que ao considerar 80% das temperaturas superficiais estas ficam inferiores à temperatura ponto de orvalho, tendo assim nestes dias um fator TOW superior a 0,5.

É importante também demonstrar graficamente os ganhos ao longo do período em estudo. Assim as figuras 56 e 57 demonstram os ganhos internos por convecção e os ganhos solares por radiação difusa para o dia de 23 de Dezembro.

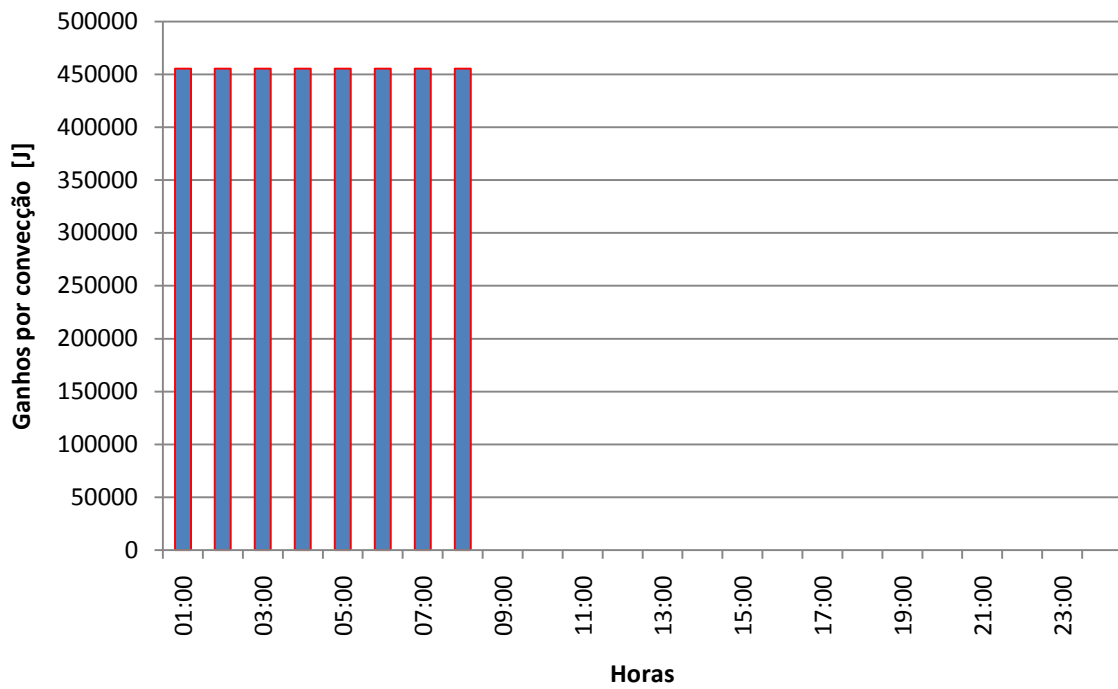


Figura 56 – Ganhos por convecção para o dia 23 de Dezembro

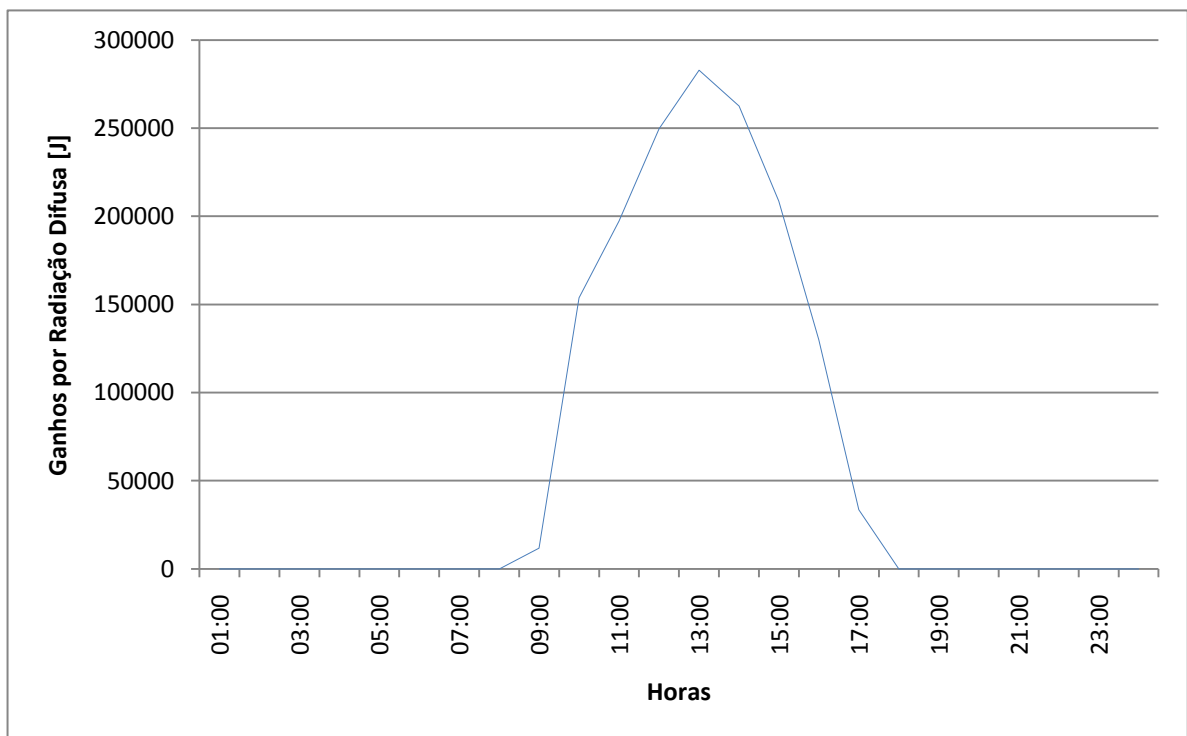


Figura 57 – Ganhos por Radiação Difusa para o dia 23 de Dezembro

Não existem ganhos por radiação direta nestes dias.

O comportamento dos dias 5 e 6 de Janeiro para estes fatores é semelhante.

5.4. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO COM ISOLAMENTO

Serão agora apresentados os resultados das simulações com o programa de otimização sem considerar aquecimento.

Para os dias simulados são apresentados no quadro 25 as espessuras de isolamento que o programa de otimização determinou de modo a cumprir as condições impostas:

Quadro 25 – Resultados da espessura de isolamento

Dias	Espessura (cm)
5/6 de Janeiro	0,0
23 de Dezembro	0,9

Assim, considerando apenas os ganhos internos e por convecção, para os dias 5 e 6 de Janeiro o programa de otimização define que não é necessário qualquer tipo de isolamento, enquanto que para o dia 23 de Dezembro são necessários 0,9 cm para prevenir que o fator TOW esteja acima dos 0,5.

5.5. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO COM ISOLAMENTO E AQUECIMENTO

Inserindo agora o aquecimento na resolução do problema são apresentados os valores determinados pelo programa de otimização para o uso de 1 aquecedor com potência de 200W no quadro 26.

Quadro 26 – Resultados da espessura de isolamento com 1 aquecedor

Dias	Espessura (cm)
5/6 de Janeiro	0,0
23 de Dezembro	0,0

Nos dias 5 e 6 de Janeiro já não era necessário isolamento, logo adicionando um aquecedor a única mudança no quarto é o aumento das temperaturas apresentadas em 5.6. Para o dia 23 de Dezembro a espessura teve uma grande diminuição, tal como esperado.

5.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM OS VALORES DO ENERGYPLUS

Neste ponto são comparados os resultados obtidos com o programa de otimização com o EnergyPlus no que respeita aos valores da espessura de isolamento obtidos e à evolução das temperaturas superficiais e interiores.

No quadro 27 são apresentados os valores anteriormente apresentados do programa de otimização bem como os valores retirados do EnergyPlus.

Quadro 27 - Comparação de valores obtidos pelo EnergyPlus e pelo Programa de Otimização

Dias	Espessura de Isolamento (cm)			
	EnergyPlus		Programa de Otimização	
	Sem aquecimento	1 Aquecedor	Sem aquecimento	1 Aquecedor
5/6 de Janeiro	1,0	0,0	0,0	0,0
23 de Dezembro	1,0	0,0	0,9	0,0

É possível assim concluir que como esperado a espessura de isolamento necessária para fazer com que o fator TOW seja inferior a 0,5 para um determinado dia diminui se existir um aquecimento. No entanto existe uma diferença entre os valores determinados pelos EnergyPlus e pelo programa de otimização. Este fato demonstra que o processo de otimização é complexo.

Nas figuras 56 e 57 é feita uma comparação entre as temperaturas superficiais e interiores geradas pelos dois programas.

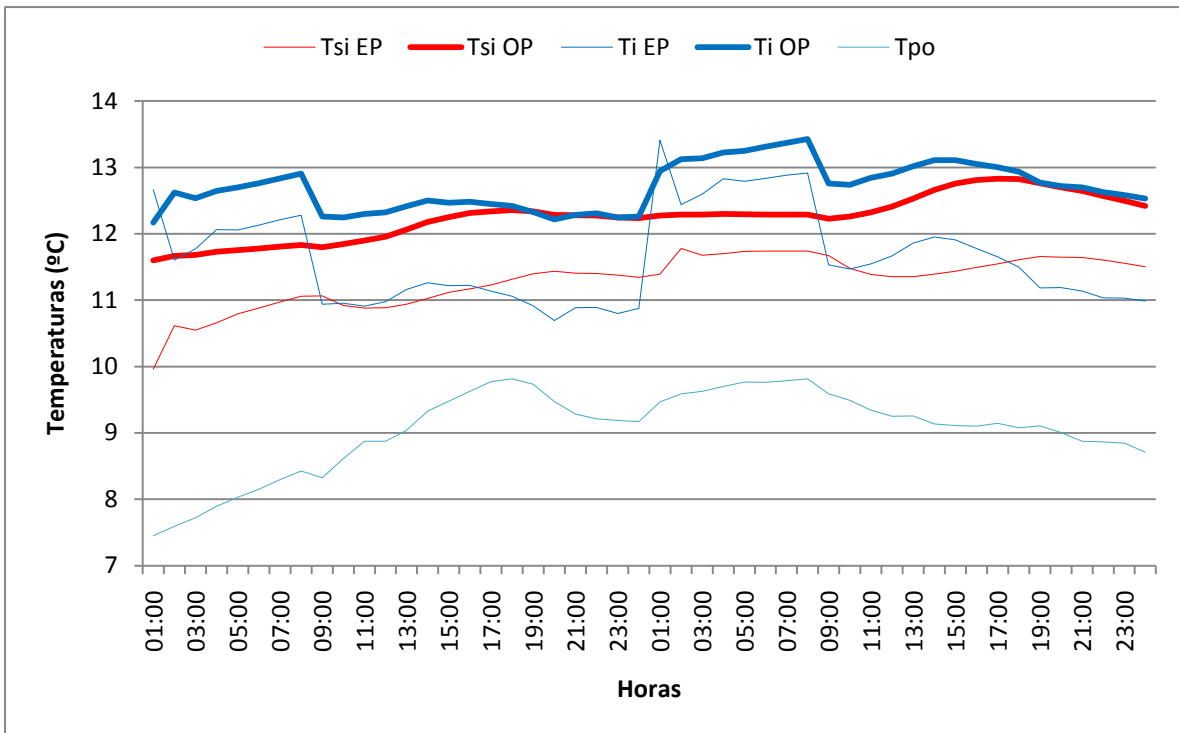


Figura 59 – Temperaturas superficiais e interiores nos dias 5 e 6 de Janeiro

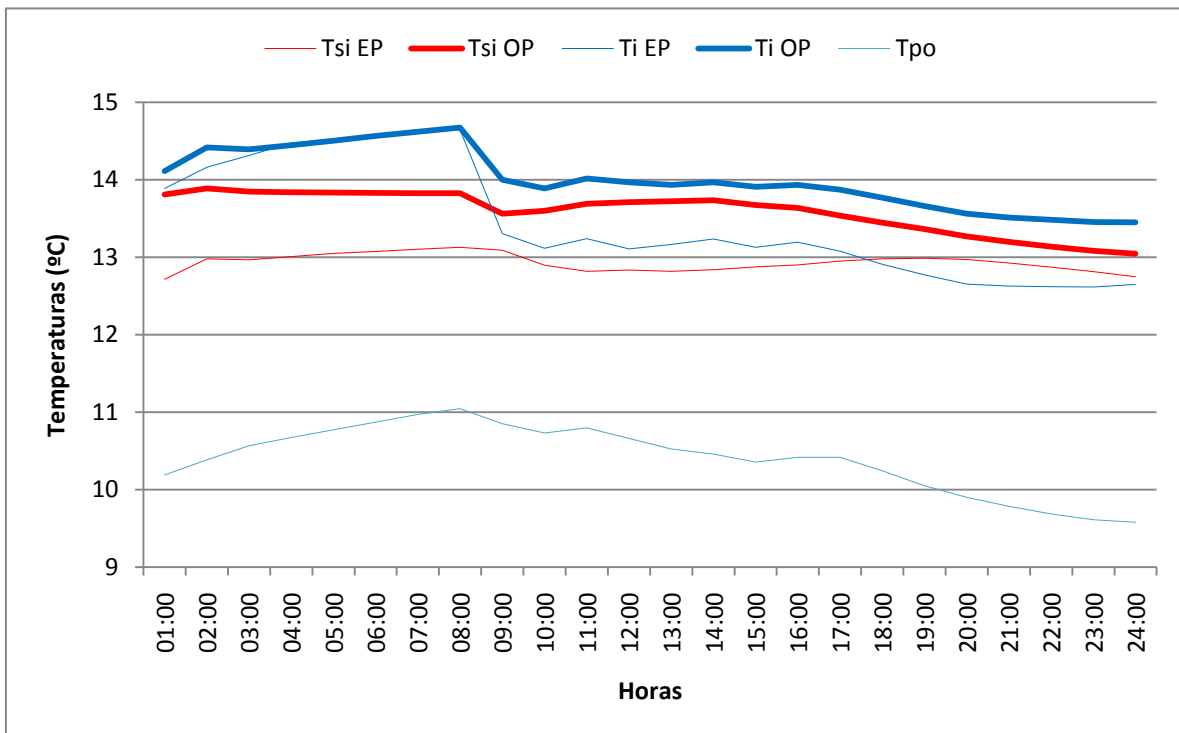


Figura 58 – Temperaturas superficiais e interiores no dia 23 de Dezembro

Em relação às temperaturas superficiais interiores, os resultados gerados pelos dois programas são parecidos, especialmente nos dias 5 e 6 de Janeiro. O mesmo acontece com as temperaturas interiores, sendo que o seu comportamento é o mesmo durante os períodos em estudo. Aumentam durante o período de ocupação das 0:00 às 8:00, seguido de uma queda nas temperaturas, tendo de seguida um ligeiro aumento devido à radiação difusa.

De seguida serão analisados os resultados com aquecimento, comparando de forma semelhante, as temperaturas superficiais e temperaturas interiores geradas pelos dois programas para o quarto em estudo.

As figuras 60 e 61 demonstram a evolução das temperaturas referidas para os dias estudados.

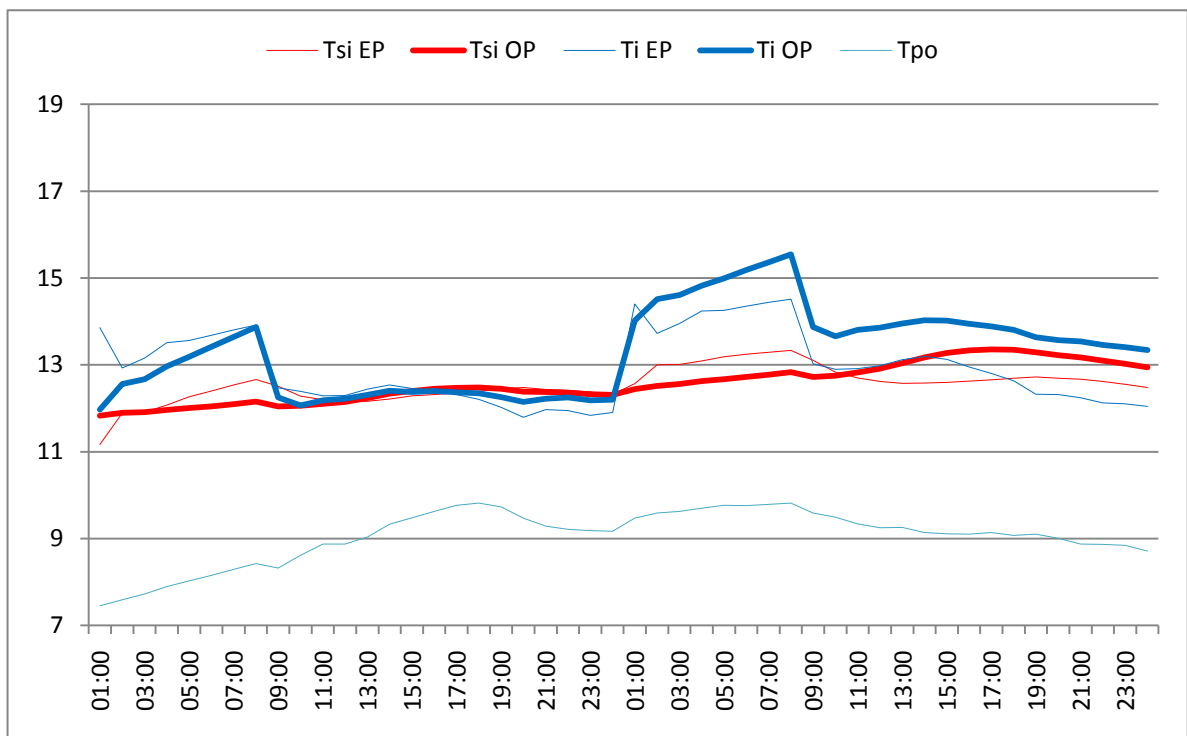


Figura 60 - Temperaturas superficiais e interiores nos dias 5 e 6 de Janeiro com um aquecedor

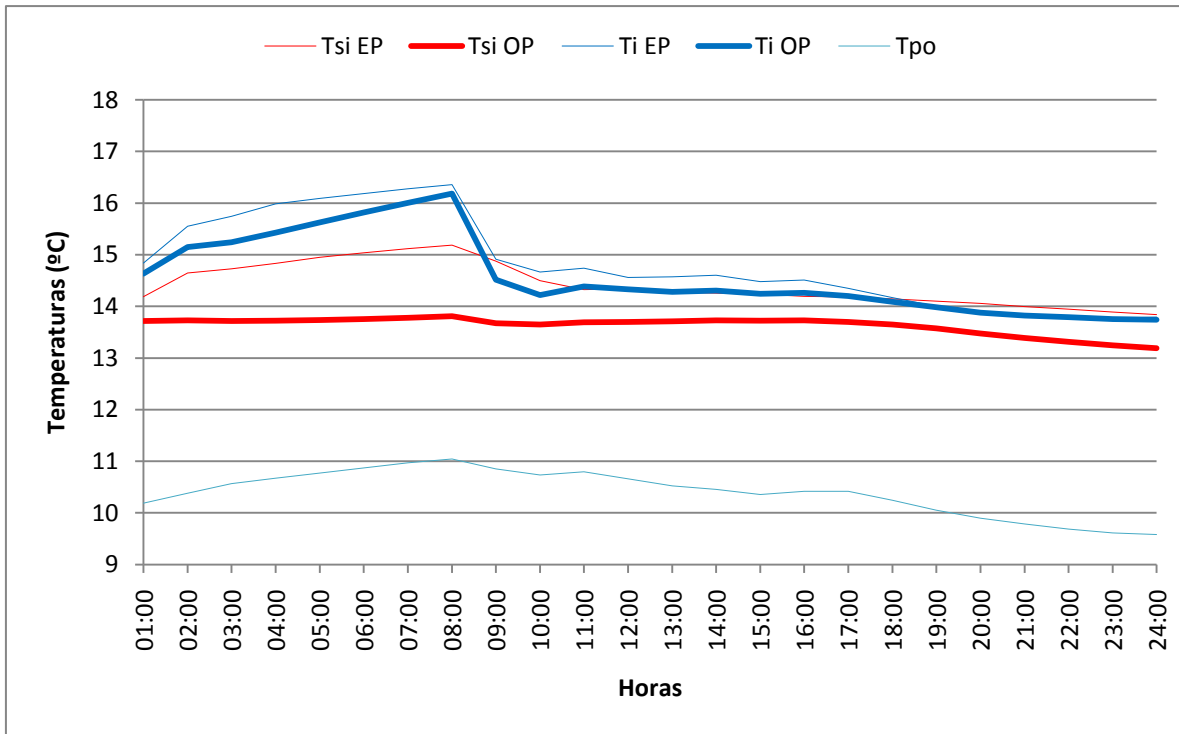


Figura 61 - Temperaturas superficiais e interiores no dia 23 de Dezembro com um aquecedor

Como esperado as temperaturas em ambos os casos aumentaram, distanciando ainda mais as temperaturas superficiais das temperaturas ponto de orvalho.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

Neste capítulo pretende-se resumir as conclusões obtidas no decorrer deste trabalho, e dar resposta aos objetivos apresentados no capítulo 1.

De uma forma geral os objetivos propostos foram cumpridos, e, de seguida, apresentam-se as conclusões gerais do trabalho:

- O programa de simulação higrotérmica EnergyPlus é uma boa ferramenta para simular o comportamento Higrotérmico de edifícios, contudo o seu manual de funcionamento é muito extenso e de difícil compreensão;
- Para se poder fazer uma simulação viável do caso de estudo desenvolvido no âmbito da dissertação é necessária uma extensa modelação do programa de forma a se conseguir resultados corretos. O modelo já desenvolvido permitiu um grande avanço no processo de simulação;
- Utilizando o modelo já existente foi possível correr simulações simples de forma a ter uma melhor percepção do comportamento do apartamento bem como dos diversos outputs do programa;
- A humidade relativa interior apresenta valores mais elevados nos meses frios e uma variação mais constante nos meses quentes, sendo que as variações entre compartimentos principais são pequenas;
- As variações de temperatura entre compartimentos principais são muito parecidas, existindo diferenças consideráveis entre estes e os compartimentos de serviço;
- Foi feita uma comparação entre três compartimentos principais: quarto 1, quarto 2 e sala em termos de condensações, HR superiores a 80% e Time of Wetness concluindo-se que o quarto 1 é o que apresenta mais problemas higrotérmicos pois, em termos de dias em que o fator TOW está acima de 0,5 o quarto 1 tem 81 dias, enquanto que o quarto 2 e a sala têm respetivamente 59 e 25 dias, para um regime de ventilação de $0,6h^{-1}$;
- Existe uma grande diferença de valores nos parâmetros estudados ao simular as divisões para uma taxa de renovação horária de $0,3h^{-1}$ e $0,6h^{-1}$, diminuindo muito os problemas higrotérmicos nas divisões com o aumento da taxa de renovação horária. No quarto 1 os valores do número de horas em que a HR é superior a 80% durante o ano passa de 4866 para 1926 horas;
- A utilização de aquecimento diminui muito os valores dos fatores estudados, sendo que para a utilização aquecimento com potência de 400W os problemas são praticamente inexistentes para um aquecimento contínuo;
- A metodologia de cálculo do programa de otimização é uma simplificação da utilizada pelo EnergyPlus;
- Foi necessário calibrar o programa de otimização com dados fornecidos pelo EnergyPlus;

- As simulações efetuadas pelo programa de otimização deram bons resultados, especialmente nas temperaturas superficiais e interiores, contudo as espessuras de isolamento são ligeiramente diferentes, o que pode ser explicado pelas simplificações efetuadas;
- As simulações para dois dias e um dia deram resultados aceitáveis, mostrando assim que o programa de otimização pode simular mais do que um dia com sucesso;
- No programa de otimização não é necessária a introdução exaustiva do modelo em estudo, facilitando assim o trabalho em fazer uma simulação higrotérmica;
- O programa de otimização teve um desempenho positivo, constituindo uma ferramenta simples, de fácil utilização, prática e geradora de resultados aceitáveis do ponto de vista higrotérmico;

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na sequência do trabalho realizado nesta dissertação, seria interessante modificar as características e materiais da envolvente de forma a saber quais seriam as melhores possibilidades para prevenir potenciais problemas higrotérmicos. Outro desenvolvimento interessante seria simular uma habitação semelhante noutra clima do país e comparar os resultados com os da cidade do Porto.

A otimização ainda não é um processo perfeito, sendo assim seria importante tentar melhorar o programa de forma a que dê valores o mais próximos possível de programas mais e complexos.

Bibliografia

- [1] Departamento de Engenharia Química e Engenharia de alimentos do Brasil, Grupo de processos biotecnológicos, http://www.eng.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/trabalhos_pos2003/const_microorg/fungos.htm, acessado em Outubro 2012.
- [2] Cientic, Fungos, http://www.cientic.com/tema_fungo_img2.html, acessado em Outubro 2012.
- [3] Ramos, N. *A Importância da Inércia Higroscópica no Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*, Tese de Doutorado, FEUP, 2007.
- [4] Freitas, V., Pinto, P. *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção – Condensações Internas*, Nota de Informação Técnica – LFC, Laboratório de Física das Construções, Porto, 1998
- [5] Sedlbauer, Klaus, Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components, Dissertação de Doutorado, Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001
- [6] Adan, Olaf C. G., Samson, Robert A. *Fundamental of mould growth in indoor environments and strategies for healthy living*, 2011.
- [7] ISO 13788:2001: Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods, Bélgica, 2001
- [8] EnergyPlus. Getting started with energyplus. In EnergyPlus Documentation Menu, pp. 7 a 11, 2010
- [9] EnergyPlus, Engineering References, In EnergyPlus Documentation Menu. P. 7, 2012
- [10] EnergyPlus, Engineering Reference, *In EnergyPlus Documentation Main Menu*, P 16 2012
- [11] Costa, H. *Influencia do regime de ventilação no comportamento higrotérmico de habitações sem aquecimento contínuo*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012.
- [12] EnergyPlus, Engineering References in EnergyPlus Documentation Menu. Outubro, 2011
- [13] Afonso, M. *Simulação Higrotérmica de Edifícios: Aplicação do EMPD no cálculo da humidade interior*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011.
- [14] Machado, N. *Influência de regimes variáveis de ventilação e aquecimento no comportamento higrotérmico de edifícios de habitação social*. Dissertação de Mestrado FEUP, 2012
- [15] Santos, P. *Otimização da Resistência Térmica da Envolvente de Edifícios Escolares*. Dissertação de Mestrado FEUP, 2010
- [16] EnergyPlus, Engineering Reference, *In EnergyPlus Documentation Main Menu*, P 43 2012
- [17] A. Broke, D. Kendrick, A. Meeraus and R. Raman. *GAMS a User's Guide*. GAMS Development Corporation. New York, 1998.
- [18] Matos, F. *Os bairros sociais no espaço urbano do Porto: 1901-1956*. Análise Social – Revista do Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa, 1994, pp. 677-695, Lisboa.
- [19] EnergyPlus, Weather Data Information, P 1 2012
- [20] Esteves, T. *Otimização da envolvente exterior para minimização do risco de condensações superficiais*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011