

INFLUÊNCIA DO REGIME DE VENTILAÇÃO NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE HABITAÇÕES SEM AQUECIMENTO CONTÍNUO

HUGO MIGUEL CORREIA DA COSTA

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

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JANEIRO DE 2012

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, 2011.*

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 e irmã

Aos meus avós

À Joana

O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

Um trabalho desta dimensão exige conhecimento, exige esforço, exige dedicação e, fundamentalmente, exige incentivo. Esse incentivo é conseguido através de uma palavra amiga, através de uma pequena ajuda nos momentos mais difíceis, através de um conselho.

O meu muito obrigado ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Ramos, pelo incentivo e pela motivação que me transmitiu, por toda a paciência em ouvir e responder atempadamente a todas as minhas dúvidas e obstáculos, por todo o tempo dispensado em reuniões imprevistas, por todo o conhecimento partilhado e por todas as ideias e sugestões no desenvolvimento do trabalho.

Quero deixar um agradecimento especial ao Engenheiro António Curado, não só por me ter disponibilizado o modelo de estudo, mas também por todo o conhecimento transmitido acerca do programa EnergyPlus e por todo o tempo dispensado em ouvir e responder às minhas dúvidas.

Quero agradecer aos meus pais, por todos os valores transmitidos, pela confiança e apoio incondicional, pela presença sempre atenta e interessada em toda a minha vida académica e por toda a paciência em ouvirem-me nos momentos mais difíceis. Sou o que sou graças a vocês.

Obrigado à minha irmã, Rita, que apesar de pequenina, sempre conseguiu dar-me um motivo para sorrir.

Quero agradecer aos meus avós, por todo o carinho, por todo o incentivo e por todo o apoio que me têm dado ao longo da minha vida.

Quero agradecer ao meu tio e padrinho, Mário, por todo o apoio, por todo o conhecimento partilhado e por saber que está sempre disponível para me ajudar.

Obrigado aos meus grandes amigos, que sempre me ajudaram quando precisei, sempre me apoiaram e sempre acreditaram naquilo que sou capaz.

Porque sei que não sou uma pessoa fácil, obrigado Joana, por seres o meu porto de abrigo nos piores momentos, pelas palavras, nem sempre meigas mas conscienciosas, pela capacidade de lidares com a minha maneira de ser e por todo o carinho e amor que me dás.

Obrigado a todos!

RESUMO

A ventilação tem um papel preponderante na qualidade do ar interior das habitações.

No entanto, na ausência de aquecimento, essa desejável ventilação pode gerar situações de desconforto e de grandes perdas térmicas, especialmente durante o período de inverno.

É neste contexto que surge a presente dissertação, a qual tem por objetivo evidenciar a influência de diferentes regimes de ventilação no comportamento higrotérmico de uma habitação (no caso, uma habitação social) localizada na cidade do Porto.

Para este trabalho recorreu-se ao programa de simulação EnergyPlus, onde a partir da introdução de um conjunto de características intrínsecas à habitação em causa (tipo de ocupação, iluminação, definição dos materiais e dos elementos construtivos, ventilação, entre outros), foi criado um modelo. De referir ainda que, para uma correta modelação, foi ainda necessário definir alguns parâmetros a utilizar durante o processo de simulação, nomeadamente o modelo de transferência de calor e humidade.

A partir da aplicação dos três modelos disponíveis no EnergyPlus, concluiu-se que o modelo HAMT seria aquele que melhor retratava o comportamento higrotérmico interior, uma vez que exigia uma caracterização detalhada de todos os materiais que constituíam a habitação.

Tomando então como referência o modelo HAMT, começou-se por submeter a habitação a regimes de ventilação contínuos ao longo do dia, tendo-se registado um afastamento das condições de conforto interior, para taxas de renovação horária sucessivamente crescentes. Numa segunda fase, incrementaram-se diversos regimes variáveis, a partir dos quais foi possível verificar que o desempenho interior tende a variar, consoante se considere ou não uma forte variação da taxa de renovação horária ao longo do dia. Para o caso em que se considera uma mudança brusca do seu valor, os resultados tendem a afastar-se da situação de regime contínuo.

PALAVRAS-CHAVE: Ventilação, Comportamento Higrotérmico, EnergyPlus, Modelo HAMT

ABSTRACT

Ventilation plays an essential role in providing home's indoor air quality.

However, in heating's absence, such desirable ventilation may become the source of discomfort situations and high heat losses, especially during the winter season.

This is the context in which this dissertation was developed. It aims to highlight the influence of different ventilation situations in a housing hygrothermal behavior (in this case, a social one) located in the city of Porto.

In order to accomplish this work, the simulation program EnergyPlus had been used. In that program, by introducing a particular characteristics set of the housing we were dealing with (occupancy type, lighting, materials and building components definition, ventilation, etc.) a model was created. For a correct modeling, to consider some parameters to be used during the simulation process, namely the transfer and moisture's model, was also rather important.

By applying all the three available models in EnergyPlus, it was concluded that, among them, the best one to give us an exact image of the interior hygrothermal behavior would be the HAMT model, since it required a detailed characterization of all the housing constituent materials.

So, considering the HAMT model as reference, the first step was to submit housing to a continuous ventilation's system throughout the day and it was noticed an indoor comfort's detachment towards a successively increased number of time renewals. In a second phase, several variable systems were implemented and it was possible to verify that the inside performance tends to change depending on whether or not we consider a strong variation of the time renewals' number throughout the day. When it is considered an abrupt change of its value, the results tend to move away from the continuous system situation.

KEYWORDS: Ventilation, Hygrothermal behaviour, EnergyPlus, HAMT model.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2

2. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS	5
2.1. CONCEITOS APLICADOS	5
2.1.1. CONFORTO TÉRMICO	5
2.1.2. HUMIDADE EM EDIFÍCIOS	6
2.1.3. CONTROLO DO DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS	8
2.1.4. RECOMENDAÇÕES DA NORMA ANSI/ASHRAE 160-2009	8
2.2. MODELAÇÃO COM O PROGRAMA ENERGYPLUS	10
2.2.1. APRESENTAÇÃO GERAL DO PROGRAMA	10
2.2.2. MODELAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DA VARIAÇÃO DA HUMIDADE	11
2.2.2.1. Metodologia de Cálculo da Temperatura Interior	11
2.2.2.2. Metodologia de Cálculo da Humidade Relativa Interior	13
2.2.3. MODELOS DE SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE	14
2.2.3.1. Introdução	14
2.2.3.2. Modelo CTF	14
2.2.3.3. Modelo HAMT	16
2.2.3.4. Modelo EMPD	20

3. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO	23
3.1. HABITAÇÕES SOCIAIS NA CIDADE DO PORTO	23
3.2. LOCALIZAÇÃO E CLIMA	24
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	25

3.4. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO	29
3.4.1. OCUPAÇÃO	29
3.4.2. VENTILAÇÃO	31

4. MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	33
4.1. INTRODUÇÃO	33
4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	33
4.3. LOCALIZAÇÃO E CLIMA	35
4.4. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS OPACOS	35
4.5. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS	43
4.6. DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS E DOS RESPECTIVOS HORÁRIOS DE OCUPAÇÃO	45
4.7. CONDIÇÕES FRONTEIRA DOS ELEMENTOS QUE CONSTITUEM A HABITAÇÃO	46
4.8. GANHOS INTERNOS	47
4.9. VENTILAÇÃO	48
4.10. VARIÁVEIS DE SAÍDA	51

5. APLICAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE	53
5.1. ENQUADRAMENTO	53
5.2. MODELO CTF	53
5.3. MODELO HAMT	54
5.4. MODELO EMPD	56
5.5. COMPARAÇÃO DOS MODELOS	58

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	65
6.1. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS	65
6.2. COMPORTAMENTO TIPO DA HABITAÇÃO	68
6.3. REGIME DE VENTILAÇÃO CONSTANTE	72
6.3.1. ENQUADRAMENTO	72
6.3.2. TEMPERATURA INTERIOR	73
6.3.3. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR	74
6.3.4. TEMPERATURA PONTO DE ORVALHO INTERIOR	75
6.3.5. RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS	76

6.4. REGIME DE VENTILAÇÃO VARIÁVEL	78
6.4.1. INTRODUÇÃO	78
6.4.2. TEMPERATURA INTERIOR.....	78
6.4.3. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR.....	79
6.4.4. RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS	80
6.5. SÍNTESE DE RESULTADOS	81
8. CONCLUSÕES.....	87
8.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO	87
8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	89
BIBLIOGRAFIA.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Desafios da construção em Portugal: Adaptado de [1]	2
Figura 2 – Zona térmica de um edifício: Adaptado de [15]	11
Figura 3 – Bairros sociais da cidade do Porto [29]	24
Figura 4 – Vista aérea do bairro social de Lordelo	25
Figura 5 – Blocos habitacionais do bairro de Lordelo (após reabilitação) [33]	26
Figura 6 – Situação após reabilitação [33]	26
Figura 7 – Apartamento em estudo	28
Figura 8 – Planta do apartamento em estudo	29
Figura 9 – Modelação da habitação: definição de zonas	30
Figura 10 – Grelhas autorreguláveis existentes na Sala	31
Figura 11 – Extração mecânica na instalação sanitária	31
Figura 12 – Sistema de exaustão das Cozinhas	32
Figura 13 – Campo de seleção <i>SimulationControl</i>	33
Figura 14 – Campo de seleção <i>RunPeriod</i>	34
Figura 15 – Campo de seleção <i>Timestep</i>	34
Figura 16 – Campo de seleção <i>HeatBalanceAlgorithm</i>	34
Figura 17 – Campo de seleção <i>Building</i>	35
Figura 18 – Campo de seleção <i>Site:Location</i>	35
Figura 19 – Valores da curva de retenção de humidade – <i>Tijolo face à vista</i>	38
Figura 20 – Valores da curva de retenção de humidade – <i>Betão</i>	38
Figura 21 – Valores da curva de retenção de humidade – <i>Poliestireno Extrudido</i>	38
Figura 22 – Valores da curva de retenção de humidade – <i>Reboco</i>	39
Figura 23 – Valores da curva de retenção de humidade – <i>Madeira</i>	39
Figura 24 – Campo de seleção <i>Construction</i>	43
Figura 25 – Campo de seleção <i>WindowMaterial:SimpleGlazingSystem</i>	44
Figura 26 – Campo de seleção <i>FenestrationSurface:Detailed</i>	44
Figura 27 – Campo de seleção <i>Shading:Zone:Detailed</i>	44
Figura 28 – Campo de seleção <i>Zone</i>	45
Figura 29 – Campo de seleção <i>Schedule:Compact</i>	45
Figura 30 – Campo de seleção <i>BuildingSurface:Detailed</i>	46
Figura 31 – Campo de seleção <i>Door:Interzone</i>	47

Figura 32 – Campo de seleção <i>People</i>	48
Figura 33 – Definição da taxa metabólica desenvolvida pelos ocupantes.....	48
Figura 34 – Campo de seleção <i>ZoneInfiltration:DesignFlowRate</i>	50
Figura 35 – Definição do horário de renovação de ar no campo de seleção <i>Schedule:Compact</i>	50
Figura 36 – Definição do regime variável RV1 no campo de seleção <i>Schedule:Compact</i>	51
Figura 37 – Definição dos dados de saída no campo <i>Outputs</i>	52
Figura 38 – Campo de seleção Material: Dados necessários à aplicação do Modelo CTF	54
Figura 39 – Campo de seleção <i>MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Settings</i>	54
Figura 40 – Campo de seleção <i>MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:SorptionIsotherm</i>	55
Figura 41 – Campo de seleção <i>MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Suction</i>	55
Figura 42 – Campo de seleção <i>MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Redistribution</i>	55
Figura 43 – Campo de seleção <i>MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Diffusion</i>	55
Figura 44 – Campo de seleção <i>MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:ThermalConductivity</i>	56
Figura 45 – Método EMPD: Caracterização dos materiais	56
Figura 46 – Ajuste da curva de adsorção higroscópica do reboco interior	57
Figura 47 – Campo de seleção <i>MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings</i>	58
Figura 48 – Análise mensal da T_{med} no Quarto	59
Figura 49 – Análise mensal da T_{10} no Quarto	60
Figura 50 – Análise mensal da T_{90} no Quarto	60
Figura 51 – Temperatura registada no Quarto entre o dia 27 e 31 de maio.....	61
Figura 52 – Temperatura registada no Quarto entre o dia 11 e 15 de outubro	61
Figura 53 – Análise mensal da $T_{po,med}$ no Quarto	62
Figura 54 – Análise mensal da $T_{po,10}$ no Quarto	63
Figura 55 – Análise mensal da $T_{po,90}$ no Quarto	63
Figura 56 – Humidade relativa registada no Quarto entre o dia 5 e 9 de janeiro	64
Figura 57 – Temperatura ponto de orvalho registada no Quarto entre o dia 5 e 9 de janeiro	64
Figura 58 – Temperatura no interior da habitação ao longo do ano	69
Figura 59 – Humidade relativa registada na Zona 4 (Quarto) durante o período de simulação.....	70
Figura 60 – Humidade relativa na Zona 4 (Quarto): janeiro.....	70
Figura 61 – Humidade relativa na Zona 4 (Quarto): agosto.....	71
Figura 62 – Humidade relativa na Zona 1 (Cozinha + Lavandaria): janeiro	71
Figura 63 – Humidade relativa na Zona 1 (Cozinha + Lavandaria): agosto	72

Figura 64 – Temperaturas registadas no Quarto para as diversas taxas de renovação horária: janeiro..	73
Figura 65 – Temperaturas registadas no Quarto para as diversas taxas de renovação horária: Período de 23 a 27 de janeiro.....	74
Figura 66 – Humidades relativas registadas no Quarto para as diversas taxas de renovação horária: janeiro.....	74
Figura 67 – Temperaturas ponto de orvalho registadas na Zona 3: Período de 23 a 27 de janeiro	75
Figura 68 – Temperaturas ponto de orvalho registadas na Zona 4: Período de 23 a 27 de janeiro	76
Figura 69 – Variação da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto: janeiro	77
Figura 70 – Variação da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto: Período de 4 a 6 de janeiro.....	77
Figura 71 – Variação da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto: Período de 11 a 14 de janeiro.....	78
Figura 72 – Temperaturas registadas no Quarto para diferentes regimes de ventilação: Período de 24 a 26 de janeiro.....	79
Figura 73 – Humidades relativas registadas no Quarto para diferentes regimes de ventilação: Período de 24 a 26 de janeiro.....	80
Figura 74 – Risco de desenvolvimento de fungos na parede exterior do Quarto, considerando diferentes regimes de ventilação: Período de 12 a 13 de janeiro	80
Figura 75 – Análise anual: Temperatura no Quarto.....	81
Figura 76 – Análise para o mês de janeiro: Temperatura no Quarto.....	82
Figura 77 – Análise para o mês de janeiro: Humidade relativa no Quarto	83
Figura 78 – Análise para o mês de janeiro: Temperatura ponto de orvalho no Quarto.....	84
Figura 79 – Análise para a semana de 22 a 27 de janeiro: Temperatura ponto de orvalho no Quarto	84

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Taxa metabólica para diferentes atividades	6
Quadro 2 – Nomenclatura utilizada pelo Modelo HAMT: Adaptado de [22]	17
Quadro 3 – Nomenclatura utilizada pelo Modelo HAMT: Adaptado de [22]	18
Quadro 4 – Paredes Exteriores.....	27
Quadro 5 – Paredes Divisórias Interiores	27
Quadro 6 – Parede de Separação da Caixa de Escadas	27
Quadro 7 – Pavimento	27
Quadro 8 – Cobertura	28
Quadro 9 – Portas	28
Quadro 10 – Envidraçados.....	28
Quadro 11 – Correspondência de materiais	36
Quadro 12 – Correspondência de materiais	37
Quadro 13 – Características dos materiais: Valores de λ , ρ e C_p	37
Quadro 14 – Teor de humidade inicial dos materiais.....	40
Quadro 15 – Porosidade dos materiais.....	40
Quadro 16 – Coeficientes de transferência de água líquida – Tijolo face à vista.....	41
Quadro 17 – Coeficientes de transferência de água líquida - Betão	41
Quadro 18 – Coeficientes de transferência de água líquida - Reboco	41
Quadro 19 – Coeficientes de transferência de água líquida - Madeira	41
Quadro 20 – Fator de resistência à difusão de vapor dos materiais	42
Quadro 21 – Variação de λ com a humidade – Tijolo face à vista.....	42
Quadro 22 – Variação de λ com a humidade – Betão	42
Quadro 23 – Variação de λ com a humidade – Reboco	43
Quadro 24 – Variação de λ com a humidade – Madeira	43
Quadro 25 – Regimes de ventilação variável	49
Quadro 26 – Regimes de ventilação variável	49
Quadro 27 – Regime de ventilação variável RV1	51
Quadro 28 – Parâmetros necessários para a obtenção de δ_M	57
Quadro 29 – Simulações realizadas na habitação.....	65
Quadro 30 – Simulações realizadas na habitação.....	66
Quadro 31 – Simulações realizadas na habitação.....	67

Quadro 32 – Simulações realizadas na habitação	68
--	----

ABREVIATURAS

ANSI – Approved American National Standard

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

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

CEN – European Committee for Standardization

CTF – Conduction Transfer Function

DOE – Department of Energy

EMPD – Effective Moisture Penetration Depth

EN – European Norm

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HAMT – Combined Heat and Moisture Transfer

ISO – International Organization for Standardization

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

RC – Regime de ventilação constante

RV – Regime de ventilação variável

TMY – Typical Meteorological Year

SÍMBOLOS

A – Área [m^2]

a , b , c e d – Coeficientes que relacionam a humidade contida nos materiais com a humidade relativa do ar

c^w – Calor específico da água à temperatura de 20°C [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

C_p – Calor específico do material seco [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

C_p^{air} – Calor específico do ar da zona [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

C_i^h – Capacidade térmica da célula i [J/K]

C_i^w – Capacidade hídrica da célula i [kg]

C_T – Fator de ponderação da transferência de calor sensível

D_{WS} – Coeficiente de difusividade hídrica de sucção [m^2/s]

D_{WW} – Coeficiente de difusividade hídrica de redistribuição [m^2/s]

h_v – Entalpia de evaporação da água [J/kg]

HR ou ϕ – Humidade relativa [%]

HR_{int} – Humidade relativa do ar interior [%]

$HR_{\text{sup,int}}$ – Humidade relativa superficial interior [%]

L – Espessura total da camada higroscópica [m]

$p_{ambient}$ – Pressão total do ar [Pa]

P – Porosidade [m^3/m^3]

P_{med} – Valor médio de determinado parâmetro P

P_{sat} – Pressão de saturação [Pa]

P_{vap} – Pressão parcial de vapor [Pa]

P_{10} – Percentil 10 de determinado parâmetro P

P_{90} – Percentil 90 de determinado parâmetro P

q_i^{adds} – Calor resultante de outras fontes [W]

q_i^v – Calor devido à vaporização [W]

q_{ki}'' – Fluxo de calor por condução na face interna da superfície

q_{ko}'' – Fluxo de calor por condução na face externa da superfície

$\dot{Q}_{sys}$ – Taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização

R – Resistência térmica de um material [$(m^2.K)/W$]

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

R_{ij}^h – Resistência térmica entre as células i e j [C/W]

R_{ij}^v – Resistência à difusão de vapor de água entre as células i e j [$(s.Pa)/kg$]

R_{ij}^w – Resistência à humidade líquida entre as células i e j [s/kg]

t_p – Período de um ciclo de variação de humidade [s]

T – Temperatura [$^{\circ}C$]

T_{ext} – Temperatura do ar exterior [$^{\circ}C$]

T_i – Temperatura da face interna da superfície

T_{int} – Temperatura do ar interior [$^{\circ}C$]

T_o – Temperatura da face externa da superfície

T_{po} – Temperatura ponto de orvalho [$^{\circ}C$]

$T_{po,ext}$ – Temperatura ponto de orvalho exterior [$^{\circ}C$]

$T_{po,int}$ – Temperatura ponto de orvalho interior [$^{\circ}C$]

u – Teor de humidade em massa de um material [kg/kg]

U – Coeficiente de transmissão térmica [$W/(m^2.K)$]

V – Volume [m^3]

w – Produção de vapor no interior [kg/h]

W – Teor de humidade do material [kg/m^3]

W_e – Teor de humidade do ar exterior [kg/kg]

$W_{HR=60\%}$ – Teor de humidade contido num material para uma humidade relativa do ar de 60% [kg/m³]

W_i – Teor de humidade do ar interior [kg/kg]

$W_{inicial}$ – Teor de humidade inicial em massa de um material [kg/kg]

W^* – Teor de humidade da superfície do material [kg/m³]

W_{sat}^* – Teor de humidade de saturação máxima da superfície do material [kg/m³]

x – Distância entre os centros das células [m]

X_j – Coeficiente da solução CTF para a parte externa

Y_j – Coeficiente da solução CTF para a parte transversal

Z_j – Coeficiente da solução CTF para a parte interna

δ – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/(m.s.Pa)]

δ_{mat} – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material [kg/(m.s.Pa)]

δ_M – Espessura da camada de adsorção [m]

ΔV_i – Volume da célula i [m³]

$\Delta \tau$ – Incremento de tempo entre cálculos [s]

λ – Condutibilidade térmica do material seco [W/(m.K)]

$\lambda(W)$ – Variação da condutibilidade térmica com a humidade [W/(m.K)]

μ – Fator de resistência à difusão de vapor [adimensional]

ξ – Capacidade higroscópica específica [kg/kg]

ρ – Massa volúmica do material [kg/m³]

ρ^w – Massa volúmica da água (kg/m³)

ρ_{air} – Massa volúmica do ar [kg/m³]

φ_j – Coeficiente da solução CTF para o fluxo de calor

$\frac{\partial H}{\partial T}$ – Variação da capacidade de armazenamento de calor com a humidade [J/(m³.K)]

$\frac{\partial W}{\partial \theta}$ – Variação da capacidade de armazenamento de vapor de água com a humidade [kg/m³]

CONSTANTES

e – Número de Nepper [Valor aproximado de 2,7183]

R_v – Constante universal dos gases relativa ao vapor de água [Valor igual a 461,52 J/(kg.K)]

ρ^w – Massa volúmica da água [Valor igual a 1000 kg/m³]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Atualmente a construção de edifícios em Portugal enfrenta três grandes desafios: A dependência energética da Europa, as mudanças climáticas e o crescente número de problemas de saúde que atingem a maioria dos seus ocupantes (asma, alergias, sintomas de cansaço, perdas de concentração, entre outros) [1].

Com a entrada de Portugal na comunidade europeia, a eficiência energética dos seus edifícios passou a constituir um fator de grande preocupação. Neste contexto, adquiriu-se uma nova consciência ambiental e rapidamente se traçaram novos caminhos a seguir, entre os quais a redução das perdas térmicas através de novas soluções de isolamento e o recurso a materiais de construção mais ecológicos. Caminha-se, deste modo, para a limitação dos consumos de energia e para a certificação energética de todos os edifícios ou frações [1].

Um outro desafio tão ou mais importante que os anteriores reside na má qualidade do ar interior das habitações. A construção de edifícios cada vez mais estanques, com o propósito de não perder calor, e a constante modificação dos hábitos dos ocupantes são vistas como as principais causas da contaminação do ar interior e, conseqüente aparecimento de problemas de saúde. Torna-se pois necessário melhorar a qualidade do ar através da renovação contínua do ar interior. Se todos os objetivos até aqui mencionados forem convergentes, facilmente se conseguirá obter uma construção de boa qualidade (com menos condensações) e com baixo consumo energético (Figura 1).

A ventilação assume, deste modo, uma grande importância na definição das condições higrotérmicas e na qualidade do ar interior, sendo imprescindível para a remoção dos poluentes e da humidade produzida pela utilização dos edifícios e para assegurar os níveis de oxigénio necessários ao metabolismo humano e aos aparelhos de combustão [2]. No entanto, diversos estudos apontam que uma importante parcela da energia consumida nos edifícios está associada ao processo de ventilação, devido sobretudo às perdas térmicas que se verificam no período de inverno [2].

É assim importante caminhar para o encontro entre estas duas grandes necessidades: garantir a correta ventilação das habitações com o mínimo consumo energético. Para que tal objetivo possa ser atingido, certos aspetos devem ser aprofundados e analisados, entre os quais: o comportamento dos ocupantes e o tipo de sistemas de ventilação existentes e sua correta aplicabilidade, mediante certos fatores locais, como o clima e a regulamentação existente [2].

Neste sentido surge a necessidade de se estudarem e analisarem casos reais, de forma a podermos compreender melhor a importância da ventilação no comportamento higrotérmico das habitações. Para

isso, temos atualmente à disposição diversas ferramentas informáticas que permitem realizar esse tipo de estudos, como é o caso do programa de simulação EnergyPlus.

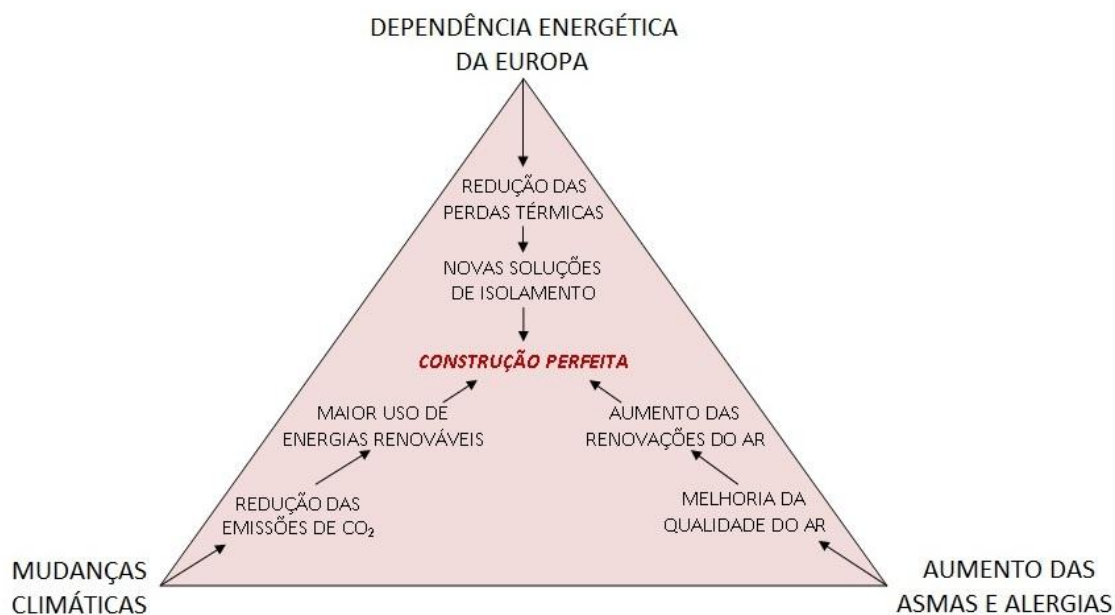


Figura 1 – Desafios da construção em Portugal: Adaptado de [1].

1.2. OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação centra-se essencialmente na avaliação da influência de diferentes regimes de ventilação, em habitações sem aquecimento, nas condições de conforto interior e na ocorrência de patologias associadas à humidade.

Para estruturar este processo de forma mais objetiva foi definido um conjunto de objetivos parciais:

- Exploração do programa de simulação EnergyPlus no que diz respeito aos modelos disponíveis para o estudo da transferência de calor pela envolvente;
- Melhorar o modelo existente de simulação higrotérmica de uma habitação social utilizada como caso de estudo;
- Avaliar o comportamento higrotérmico do caso de estudo para regimes de ventilação constantes;
- Avaliar o comportamento higrotérmico do caso de estudo para regimes de ventilação variáveis;

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho foi estruturado em sete capítulos.

No Capítulo 1 procede-se à apresentação do enquadramento do tema, define-se os objetivos do trabalho e indica-se a estrutura fundamental do trabalho.

O Capítulo 2 subdivide-se em duas partes. Na primeira são expostos os conceitos necessários à perfeita compreensão de todo o trabalho desenvolvido. Na segunda, além de serem apresentadas as principais potencialidades e características do programa de simulação EnergyPlus, é também

apresentada toda a metodologia seguida pelo programa para a quantificação da temperatura e da humidade relativa interior. São também expostos neste capítulo os principais modelos utilizados pelo EnergyPlus para a simulação da transferência de calor e humidade através dos elementos construtivos, bem como toda a metodologia inerente à sua utilização.

O Capítulo 3 é dedicado ao caso em estudo estando subdividido em quatro partes. Na primeira, é feita uma breve referência às habitações sociais existentes na cidade do Porto. Na segunda parte, localiza-se a habitação em estudo e referem-se as principais características do clima em que se insere. Na terceira, faz-se uma breve caracterização da habitação, no que diz respeito à sua composição construtiva e à sua tipologia. Na quarta parte, além de ser definida a ocupação de cada uma das zonas da habitação, são também quantificados os ganhos internos e o modo como a ventilação se processa no interior da habitação.

O Capítulo 4 é dedicado à modelação da habitação no programa de simulação EnergyPlus. Este capítulo inicia-se com a definição de alguns parâmetros referentes ao processo de simulação, nomeadamente o tipo de simulação pretendida, o período de simulação e o tipo de modelo a utilizar quanto à transferência de calor e humidade. Seguidamente é definida a localização da habitação, bem como a distribuição solar a que está sujeita. Numa fase posterior é feita uma caracterização exaustiva de todos os materiais opacos e definidos os respetivos elementos construtivos (paredes, lajes de teto e pavimentos). Ainda nesta fase são definidos os envidraçados, bem como a estrutura de sombreamento da habitação. Depois de definida toda a sua envolvente construtiva, definem-se e caracterizam-se as zonas térmicas a estudar e estabelecem-se as condições fronteira dos vários elementos que a constituem. Seguidamente definem-se os ganhos internos e apresentam-se os regimes de ventilação considerados para o estudo higrotérmico da habitação. Numa última fase, são definidas as variáveis que se pretendem obter com as simulações.

O Capítulo 5 dedica-se, única e exclusivamente, à aplicação dos modelos de transferência de calor e humidade disponíveis no programa de simulação EnergyPlus. Inicia-se com uma breve descrição dos modelos, referindo as suas principais características e os dados necessários para a sua correta aplicação na habitação em estudo. O capítulo termina com a aplicação dos vários modelos e com a sua comparação relativamente ao comportamento higrotérmico da habitação.

O Capítulo 6 é dedicado à aplicação dos diferentes regimes de ventilação e à avaliação da sua influência no comportamento higrotérmico da habitação. O capítulo inicia-se com a descrição das simulações realizadas para os diferentes regimes de ventilação, salientando-se o tipo de regime considerado e o horário proposto para a ventilação. Seguidamente, apresentam-se os resultados obtidos para regimes de ventilação constante, evidenciando-se o comportamento interior para cinco taxas de renovação horária sucessivamente crescentes. Para estas condições de ventilação, é também avaliado o risco de desenvolvimento de fungos. Posteriormente é analisado o comportamento higrotérmico para regimes de ventilação variável, avaliando-se também neste caso o risco de desenvolvimento de fungos. O capítulo termina com uma comparação estatística entre os dois regimes de ventilação propostos.

Finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como alguns possíveis desenvolvimentos futuros dentro do tema.

2

MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS

2.1. CONCEITOS APLICADOS

2.1.1. CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico resulta das trocas de calor existentes entre o corpo humano e o ambiente. Na verdade, uma das principais exigências para o bem-estar e o conforto é manter o equilíbrio térmico entre o corpo e o meio ambiente, obrigando isso a uma necessidade de conservação da temperatura interior do corpo à temperatura aproximada de 37°C independentemente das variações das condições ambientais [3].

Devido ao papel preponderante que desempenha na qualidade de vida dos ocupantes dos edifícios, a avaliação do conforto térmico em ambientes interiores tem sido objeto de diversas investigações com o objetivo de melhor compreender as variáveis que envolve, como pode ser alcançado, qual a sua influência na saúde e produtividade dos ocupantes e como pode ser quantificado [4].

Segundo *Fanger* [5], a sensação de conforto térmico do ser humano relativamente ao ambiente que o rodeia depende essencialmente de seis fatores, dois individuais e quatro ambientais. Os fatores individuais surgem associados ao tipo de ocupação dos ocupantes e limitam-se à atividade metabólica e ao tipo de vestuário utilizado. No que diz respeito aos fatores ambientais destacam-se a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade relativa do ar e a humidade relativa do ar.

Relativamente aos fatores individuais, importa realçar a atividade metabólica. Consistindo num processo fisiológico através do qual o ser humano produz energia a partir de elementos orgânicos, a atividade metabólica, em termos de conforto térmico, expressa-se pela unidade *met*, em que 1 *met* (situação de repouso, acordado) corresponde a 58,2 W/m² [6].

O tipo de atividade desenvolvida pelo ser humano reflete-se bastante na produção metabólica e consequentemente na produção interna de calor. Neste sentido, a norma ISO 7730 [6] inclui um Quadro semelhante ao Quadro 1 que indica a taxa metabólica associada a diferentes atividades. Sabendo que a área de pele é aproximadamente 1,8 m² é também possível quantificar a quantidade de energia transmitida por um indivíduo a um local [6].

Quadro 1 – Taxa metabólica para diferentes atividades.

Atividade	Taxa Metabólica (W/m ²)
Repouso, deitado	46
Repouso, sentado	58
Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70
Atividade leve (compras, laboratório, indústria leve)	93
Atividade média (assistente de loja, doméstica, trabalho em máquinas)	116
Caminhada em terreno plano:	
2 Km/h	110
3 Km/h	140
4 Km/h	165
5 Km/h	200

A temperatura do ar é uma variável fundamental para a avaliação do conforto térmico. De facto, uma forma simplificada de especificar as condições ambientais satisfatórias recorre apenas à temperatura do ar. No Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE: DL 80/06, de 4 de abril) [7] são estabelecidas as temperaturas de referência de 20°C e de 25°C para as estações de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente.

Apesar de ainda não estarem bem definidos os mecanismos pelos quais a humidade afeta o conforto térmico humano, algumas investigações acerca deste tema permitem concluir que a humidade pode ter um efeito pequeno no conforto térmico geral, isto é, no conforto do corpo como um todo, mas pode tornar-se bastante relevante para o conforto térmico local, como é o caso nos órgãos do sistema respiratório [8].

Deste modo, dependendo do nível de temperatura admitida, a norma ISO 7730 [5] sugere que a humidade relativa máxima varie entre 60% e 80%, conforme esteja associada a temperaturas mais elevadas ou menos, respetivamente. A nível nacional, sugerem-se valores semelhantes, com limites de humidade relativa entre 35% e 85%, não se devendo no verão exceder os 60% [9].

2.1.2. HUMIDADE EM EDIFÍCIOS

A ação da humidade nos edifícios tem sido reconhecida como um fator de extrema importância, suscetível de conduzir à ocorrência de anomalias capazes de impedirem a satisfação plena das mais elementares exigências de habitabilidade das edificações.

Além de constituir uma das principais causas da deterioração das construções, a humidade tem também uma grande influência nas condições de habitabilidade e salubridade, tornando-as absolutamente indesejáveis aos utilizadores dos edifícios, especialmente os destinados a habitação.

A humidade surge nas construções de diversos modos, podendo ser introduzida durante a construção, ou então, posteriormente com origem exterior ou interior.

Parte dos problemas de humidade que afetam as habitações refletem o comportamento dos próprios ocupantes, nomeadamente a produção de vapor que é gerada no seu interior e a falta de ventilação capaz de a encaminhar para o exterior.

O caudal de ventilação deverá então ser aumentado em virtude da utilização e do número de ocupantes, de forma a reduzir-se o teor de vapor de água. Neste sentido, deve ter-se em conta a equação simplificada (1) [10] que traduz a relação entre a humidade interior e as condições exteriores e higrométricas:

$$W_i = W_e + 0,825 \times \frac{w}{Rph \cdot V} \quad (1)$$

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]

Neste contexto importa fazer referência à temperatura ponto de orvalho, uma vez que funciona como indicador do teor de humidade. A metodologia utilizada para o seu cálculo é descrita de seguida e tem como referência as fórmulas apresentadas na Nota Técnica NT002 [10].

A pressão de saturação, P_{sat} , pode ser calculada a partir da equação (2), [10].

$$P_{sat} = 611 \times e^{\left(\frac{a \times T}{T + T'}\right)} \quad (2)$$

Em que:

P_{sat} – Pressão de saturação [Pa]

e – Número de Nepper

T – Temperatura do ar interior [$^{\circ}C$]

a e T' – Estes valores são função da temperatura do ar interior

Como os valores da temperatura do ar interior considerados no presente trabalho são sempre superiores a $0^{\circ}C$, as constantes a e T' tomam o valor de 17,08 e $234,18^{\circ}C$, respetivamente [10].

Uma vez conhecido o valor da pressão de saturação, e considerando um determinado valor de humidade relativa, HR, facilmente se consegue quantificar o valor da pressão parcial de vapor, P_{vap} , ou seja a quantidade de vapor efetivamente contida no ar, de acordo com a combinação de temperatura e humidade relativa considerada.

$$HR = \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \times 100 \quad (3)$$

No entanto o que se pretende determinar é a temperatura para a qual a pressão de saturação, isto é a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter, é igual à pressão parcial de vapor calculada nas condições expostas em (3). Essa temperatura corresponde à temperatura ponto de orvalho.

Assim, substituindo o valor de pressão parcial obtido a partir da equação (3) na expressão (4), rapidamente se encontra o valor da temperatura pretendida.

A equação (4) obtém-se resolvendo a equação (2) em ordem à temperatura ponto de orvalho, T_{po} .

$$T_{po} = \frac{T' \times \ln\left(\frac{P_{vap}}{611}\right)}{a - \ln\left(\frac{P_{vap}}{611}\right)} \quad (4)$$

2.1.3. CONTROLO DO DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS

Como já foi mencionado no ponto anterior, a humidade tem uma grande influência não só na degradação dos materiais e dos elementos construtivos, mas também no bem-estar e na saúde dos utilizadores.

Na verdade, em muitas situações correntes são criadas condições interiores, especialmente elevadas humidades relativas, que favorecem o aparecimento e desenvolvimento de fungos. Esta patologia decorre da conjugação de uma série de fatores, entre os quais se mencionam a existência de esporos no ar, a disponibilidade de nutrientes e oxigénio em conjunto com vapor de água no ar, a existência de determinadas condições de temperatura, alcalinidade, radiação e adequado movimento do ar. Deste conjunto, a humidade é absolutamente determinante para a sua ocorrência [8].

Neste contexto surge a norma EN ISO 13788 [11], sugerindo uma metodologia para o cálculo da temperatura superficial interior mínima, para a prevenção de humidades superficiais críticas que conduzam ao desenvolvimento desses microrganismos. O risco de formação de fungos é definido, na norma, para humidades relativas superficiais superiores a 80% durante vários dias [8]. A partir desta metodologia é possível definir um nível mínimo de qualidade térmica para a envolvente dos edifícios.

2.1.4. RECOMENDAÇÕES DA NORMA ANSI/ASHRAE 160-2009

A norma ANSI/ASHRAE 160-2009 [12] procura definir metodologias para a previsão e prevenção de patologias nos edifícios, mais concretamente no que respeita à humidade de condensação. Este tipo de humidade normalmente está associado ao desenvolvimento de fungos.

Esta norma procura assim especificar processos de avaliação de desempenho em projeto para a previsão, mitigação ou redução dos danos causados pela humidade na envolvente dos edifícios, materiais, componentes ou sistemas, dependendo do clima, do tipo de construção e dos sistemas de ventilação.

Na referida norma são apresentados, detalhadamente, todos os procedimentos estabelecidos para a determinação e controlo da humidade interior de projeto. Segundo o exposto na norma, depois de definidas as características geométricas e físicas do edifício e as condicionantes exteriores a que está

sujeito, o processo inicia-se com o cálculo da humidade interior de projeto, tendo como referência três possíveis métodos de cálculo: *Método Simplificado*, *Intermédio* ou *Paramétrico Completo*. Seguidamente é realizada a análise de desempenho, de acordo com critérios estabelecidos pela norma, nomeadamente para a seleção dos procedimentos analíticos e para a avaliação e desempenho à humidade. Se o desempenho for satisfatório, o projeto encontra-se bem dimensionado e registam-se todos os dados de projeto e resultados obtidos. Caso contrário, efetuam-se algumas alterações ao projeto até que se obtenham os resultados pretendidos.

Tal como foi referido anteriormente a norma tem ao seu dispor três métodos para determinação das condições de humidade interior, no entanto apenas se irá desenvolver um pouco mais o método paramétrico completo, uma vez que é aquele que está na base de todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Para a utilização de qualquer um dos métodos é necessária uma correta descrição da envolvente do edifício, devendo englobar os seguintes tópicos:

- Tipo de construção;
- Tipo de paredes, pavimento, teto, etc.;
- Orientação;
- Coeficientes de superfície;
- Localização dos espaços de ar e sua respetiva taxa de ventilação;
- Lista de materiais utilizados, fazendo referência à fonte dos dados;

Relativamente ao método simplificado trata-se de um método bastante simples, que permite obter diretamente a humidade interior de projeto em função da temperatura exterior média diária. Quanto ao método intermédio trata-se de um método relativamente trabalhoso que determina a humidade interior a partir das condições meteorológicas horárias e do tipo de equipamento AVAC instalado. Enquanto estes dois métodos apenas descrevem diferentes formas para determinar as condições interiores de projeto relativamente à humidade e posteriormente determinar as condições nos elementos da envolvente do edifício, o método paramétrico completo permite determinar diretamente os resultados necessários.

O método paramétrico completo trata-se do método de cálculo mais detalhado que a norma ANSI/ASHRAE 160-2009 contempla. Ao contrário dos outros métodos, a sua utilização requer dados detalhados para possibilitar a análise da resposta higrotérmica e a contribuição do fluxo dinâmico higrométrico dos elementos do edifício, acabamentos e mobiliário. A análise deve incluir os balanços térmicos e de massa, deve ser utilizada simulação numérica e intervalos de tempo que captem a resposta higrotérmica dos materiais e condições mais relevantes.

Desta forma enumera-se de seguida toda a informação necessária para o conhecimento mais detalhado dos materiais:

- Descrição dos materiais;
- Espessura;
- Massa volúmica;
- Calor específico;
- Curva de adsorção higroscópica;
- Condutibilidade térmica e sua variação com a temperatura e com o teor de humidade, se aplicável;
- Permeância ou permeabilidade ao vapor de água;
- Condutividade ou difusividade hídrica;

- Curva de retenção de humidade;
- Teor de humidade inicial;
- Porosidade, Saturação Capilar, Saturação máxima e permeabilidade a fluxos de ar;

Este método foi aplicado na presente dissertação com recurso à ferramenta informática EnergyPlus, onde se aplicou o modelo HAMT (Combined Heat and Moisture Transfer), em português designado por Transferência Conjunta de Calor e Humidade.

2.2. MODELAÇÃO COM O PROGRAMA ENERGYPLUS

2.2.1. APRESENTAÇÃO GERAL DO PROGRAMA

A qualidade do ar interior e o conforto térmico das edificações têm constituído, nos últimos anos, um motivo de grande preocupação. Sendo a certificação energética obrigatória, torna-se cada vez mais importante a elaboração de bons projetos de térmica e ventilação, para assim se obterem boas classificações energéticas e se minimizarem potenciais patologias nos edifícios.

Sendo assim, compete ao Projetista dimensionar e adotar soluções construtivas adequadas. Para tal, o projetista tem ao seu dispor uma série de ferramentas informáticas, tal como o programa EnergyPlus.

O EnergyPlus é um programa de simulação energética de edifícios que combina as funcionalidades dos seus antecessores *BLAST* e *DOE-2*, concebidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, no fim da década de 70. Trata-se de um programa que fundamentalmente serve como motor de simulação, em que os ficheiros de entrada e de saída são simples ficheiros de texto. Relativamente à sua origem, o EnergyPlus desenvolveu-se à medida que crescia a perceção da necessidade de ter um programa que assegurasse soluções integradas que incluíssem não só o cálculo de cargas térmicas, mas também um estudo mais detalhado do impacto dos sistemas de climatização e ventilação nos consumos energéticos totais de um edifício [13].

Este programa, além de permitir a obtenção do balanço energético de um determinado edifício ou a sua respetiva necessidade energética, dá também hipótese ao investigador de, através da alteração de determinados parâmetros isolados, verificar qual a sua influência sobre diversas variáveis, tais como a humidade relativa e a temperatura interior do edifício [14].

Neste sentido, há que ter em consideração o conceito de Zona no programa. Cada Zona corresponde a um conjunto de espaços que se encontram submetidos a um mesmo controlo térmico, sendo que, para efeitos de cálculo, é definida como um nó. As diferentes zonas de um determinado edifício podem interagir entre si, através de fluxos de calor nas superfícies adjacentes.

A Figura 2 ilustra o conceito de zona e apresenta todos os elementos que colaboram nas trocas de ar com a mesma.

Através do EnergyPlus é possível definir-se os horários de funcionamento das cargas térmicas e incluir ficheiros com os dados climáticos de determinada região. Para além disso, é possível também incluir e controlar os sistemas de AVAC, bem como calcular a poluição atmosférica e o conforto dos ocupantes. Além disso, inclui ainda modelos de condução de calor através dos elementos de construção [14].

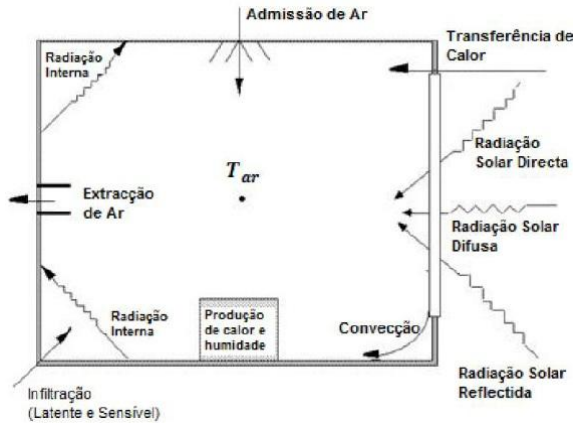


Figura 2 – Zona térmica de um edifício: Adaptado de [15].

Relativamente às soluções, estas resultam de um processo iterativo, que as faz convergir para determinado valor, possibilitando a saída dos dados anualmente, diariamente, ou até mesmo, de hora a hora.

Após uma apresentação sucinta do programa em estudo, procede-se de seguida à exposição da metodologia de cálculo das variáveis mais importantes para o caso em estudo.

2.2.2. MODELAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DA VARIAÇÃO DA HUMIDADE

2.2.2.1. Metodologia de Cálculo da Temperatura Interior

Para o cálculo da temperatura do ar interior, o EnergyPlus realiza um balanço de energia no interior de uma zona a estudar e resolve as equações resultantes seguindo um procedimento de previsão/correção.

A equação utilizada pelo programa para traduzir o balanço energético no interior é apresentada de seguida:

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

Em que:

$C_Z = \rho_{air} C_p^{air} C_T$;

C_p^{air} – é o calor específico do ar da zona;

C_T – é o fator de ponderação da transferência de calor sensível;

$C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ – é a energia total armazenada no ar interior da zona;

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ – é a soma dos ganhos internos por convecção;

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z)$ – é a transferência de calor por convecção originária das superfícies existentes na zona;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_Z)$ – é a transferência de calor devido à mistura de ar de diferentes zonas;

$\dot{m}_{inf}C_p^{air}(T_\infty - T_Z)$ – é a transferência de calor devido à infiltração de ar exterior;

$\dot{Q}_{sys}$ – é a taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização;

No entanto, se desprezarmos o calor específico do ar, a equação adquire a seguinte forma:

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_Z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_\infty - T_Z) \quad (6)$$

No caso de se considerar um sistema de tratamento de ar é possível fornecer ar quente ou frio às zonas, consoante as respetivas necessidades de aquecimento ou arrefecimento.

Este processo pode ser equacionado pela equação (7) [16], onde a energia trocada com o sistema de climatização ($\dot{Q}_{sys}$) é dada pela diferença entre a entalpia do ar insuflado e extraído na zona:

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p^{air} (T_{sup} - T_Z) \quad (7)$$

Esta equação assume que o caudal de ar insuflado é exatamente igual ao caudal de ar removido pelo sistema de extração [16]. A combinação da equação (7) com a equação (5) resulta na seguinte equação:

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_Z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_\infty - T_Z) + \dot{m}_{sys} C_p^{air} (T_{sup} - T_Z) \quad (8)$$

Deste modo, o somatório das cargas térmicas das zonas e a energia trocada com o sistema de climatização igualam-se à variação de energia no ar interior da zona.

Relativamente ao modo como é resolvida a equação (8), o programa EnergyPlus compreende três tipos de algoritmos de cálculo, sendo que dois desses algoritmos recorrem ao método das diferenças finitas, enquanto um outro utiliza a solução analítica [16].

Segundo a documentação do programa EnergyPlus [16] o algoritmo tradicionalmente utilizado para a resolução das equações recorre ao método das diferenças finitas com aproximações de terceira ordem:

$$\frac{dT_Z}{dt} \approx \delta t^{-1} \left(\frac{11}{6} T_Z^t - 3 T_Z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_Z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_Z^{t-3\delta t} \right) + 0(\delta t^3) \quad (9)$$

Desta forma, quando esta formulação é aplicada na equação (8) obtém-se:

$$\begin{aligned}
 & C_z \delta t^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) \\
 &= \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_{\infty} - T_z) \\
 &+ \dot{m}_{sys} C_p^{air} (T_{sup} - T_z)
 \end{aligned} \quad (10)$$

Resolvendo a equação (10) em ordem à temperatura vem:

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

Importa referir que todo o processo até aqui exposto diz respeito ao cálculo de apenas uma zona, embora seja tido em conta o contributo de todas as zonas existentes. Assim, o programa parte deste cálculo, de uma zona, para as seguintes, ajustando o valor da temperatura usando o processo referido como previsão/correção.

2.2.2.2. Metodologia de Cálculo da Humidade Relativa Interior

Tal como já foi referido em capítulos anteriores, a humidade relativa interior é um parâmetro importante para o desempenho higrotérmico de um edifício, tendo por isso um significativo impacto nas condições da ambiência interior.

Para evidenciar a variação da humidade numa zona, o EnergyPlus desenvolve um balanço entre diferentes fluxos, tal como se evidencia na equação (12) [17]:

$$\begin{aligned}
 \rho_{air} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} &= \sum_{i=1}^{N_{si}} kg_{mass} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air} (W_{surfaces_i} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t) \\
 &+ \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)
 \end{aligned} \quad (12)$$

Em que:

$\rho_{air} V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$ – corresponde à variação de humidade do ar na zona;

$\sum_{i=1}^{N_{si}} kg_{mass}$ – corresponde à quantidade, em massa, de vapor de água produzido na zona;

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air} (W_{surfaces_i} - W_z^t)$ – corresponde à transferência de vapor de água por convecção, entre o ar e a superfície das paredes;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$ – corresponde à troca de vapor de água entre as diversas zonas;

$\dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t)$ – corresponde às ganhos/perdas de vapor de água por infiltração;

$\dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)$ – corresponde à adição/remoção de vapor de água pelo sistema AVAC;

Relativamente à resolução da equação (12) toda a metodologia adotada anteriormente para as equações de transferência de calor é novamente utilizada, seguindo exatamente o mesmo formato de resolução.

Para fazer os ajustes de cálculo devido às transferências de vapor de água entre zonas, o programa utiliza uma vez mais o método numérico de cálculo de previsão/correção.

2.2.3. MODELOS DE SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE

2.2.3.1. Introdução

Se centrarmos a nossa atenção no modo como o EnergyPlus funciona e processa os seus dados [18], facilmente conseguimos identificar os cinco “gestores” que organizam todo o processo de simulação produzido pelo programa. Entre eles temos o gestor da simulação, o gestor da solução integrada, o gestor do balanço energético da superfície, o gestor do balanço energético do ar e por último, o gestor da simulação dos sistemas do edifício.

No entanto, de acordo com os objetivos propostos para esta dissertação aquele que merece um maior destaque é o gestor do balanço energético da superfície, pois é ele que tem em conta os diferentes tipos de modelos/algoritmos suscetíveis de serem utilizados no que diz respeito à transferência de calor e humidade.

Os modelos disponíveis para a simulação da transferência de calor e humidade são: o **CTF** (*Conduction Transfer Function*), o modelo **HAMT** (*Combined Heat and Moisture Transfer*) e o modelo **EMPD** (*Effective Moisture Penetration Depth*).

O modelo tradicionalmente utilizado para simular transferências de calor através de um elemento opaco é o modelo CTF. Este modelo distingue-se dos restantes pelo facto de desprezar no seu cálculo o armazenamento e difusão de vapor nos elementos de construção [19]. Deste modo, torna-se compreensível que a humidade relativa interior não seja devidamente prevista, e que se afaste daquilo que se passa num edifício real.

Ao contrário do modelo CTF, tanto o modelo HAMT como EMPD descrevem a difusão do vapor de água numa zona e avaliam com maior precisão a humidade interior. O modelo HAMT é bastante rigoroso, necessitando de um conhecimento detalhado das propriedades dos diversos materiais que compõem a zona a estudar. Em muitos casos essa informação não se encontra disponível e há a necessidade de se recorrer a modelos simplificados, como é o caso do modelo EMPD.

2.2.3.2. Modelo CTF

Tal como já foi referido no ponto anterior, para simular as transferências de calor são tradicionalmente utilizadas as funções CTF, designadas em português por funções de transferência de calor por condução. A sua consideração no processo de simulação faz com que seja desprezado o mecanismo de transferência de humidade através dos elementos construtivos. Neste contexto, não são consideradas transferências de calor latente, nem é admitida a adsorção da humidade do ar, por parte dos materiais existentes em determinada zona.

Relativamente à forma como estas funções são modeladas e trabalhadas no programa EnergyPlus, apresentam-se de seguida algumas considerações.

Segundo a documentação escrita do EnergyPlus, o fluxo de calor que atravessa um elemento opaco pode ser determinado através da equação (13) [20]:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (13)$$

Em que:

q'' – corresponde ao fluxo de calor;

T – corresponde à temperatura;

i – corresponde ao interior do elemento construtivo;

o – corresponde ao exterior do elemento construtivo;

t – corresponde à iteração atual;

X e Y – são os fatores de resposta;

(Nota: Os fatores de resposta dependem apenas das propriedades térmicas dos materiais)

Verifica-se, deste modo, que o fluxo de calor que atravessa um determinado elemento opaco é função das temperaturas exterior e interior, da radiação solar incidente e das propriedades térmicas dos materiais constituintes do elemento [13].

No entanto, surgem algumas particularidades que dificultam a obtenção de uma solução exata. Para contornar essas dificuldades recorre-se então às soluções das funções CTF.

A forma básica de uma solução CTF é traduzida a partir das seguintes equações:

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \varphi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (14)$$

Para o fluxo de calor na face interna da superfície, e

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \varphi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (15)$$

Para o fluxo de calor na face externa da superfície

Em que:

X_j – é o coeficiente da CTF para a parte externa;

Y_j – é o coeficiente da CTF para a parte transversal;

Z_j – é o coeficiente da CTF para a parte interna;

φ_j – é o coeficiente da CTF para o fluxo de calor;

T_i – é a temperatura da face interna da superfície;

T_o – é a temperatura da face externa da superfície;

q''_{ki} – é o fluxo de calor por condução na face interna;

q_{ko}'' – é o fluxo de calor por condução na face externa;

Segundo *Pederson* [21], a forma como é equacionada a solução de uma função CTF permite identificar não só as suas vantagens, mas também os seus inconvenientes.

O facto de se estar perante uma única solução, relativamente simples, linear e com coeficientes constantes torna possível o cálculo da transferência de calor por condução através de qualquer elemento construtivo. No entanto, todas estas características também podem trazer algumas desvantagens [21]:

- Como os coeficientes são valores constantes não é possível considerar as propriedades térmicas dependentes da temperatura. Assim sendo, comportamentos como a entalpia de mudança de fase ou a variação da condutibilidade térmica com a temperatura não podem ser estabelecidos;
- Como a solução faz a ligação da face externa para a face interna, não é possível quantificar temperaturas no interior da superfície da parede;

Com o aparecimento de projetos de construção de alto desempenho cada vez é mais importante conseguir superar estas “falhas”, especialmente quando se procura realizar uma análise energética dos mesmos. Neste sentido, o programa EnergyPlus propõe uma outra solução de algoritmo, que surge apenas como complemento à solução da função CTF.

No entanto, essa solução não será abordada, uma vez que não se enquadra nos objetivos definidos para o presente trabalho.

2.2.3.3. Modelo HAMT

O modelo HAMT trata-se de um modelo unidimensional que combina os efeitos da transferência de calor e humidade através dos elementos construtivos [22].

Deste modo, torna-se possível considerar no processo de simulação os efeitos de armazenamento e difusão de calor e humidade ao longo dos diversos elementos que compõem a zona em estudo. Para isso o modelo HAMT exige um conhecimento detalhado de todos os materiais constituintes da envolvente a simular [23].

A grande particularidade do modelo HAMT é permitir determinar variáveis como a temperatura, a humidade relativa e o teor de humidade em camadas, permitindo deste modo que se verifique uma interação entre elas. De forma a permitir esse cálculo o modelo calcula a transferência de calor e humidade através dos elementos, dividindo-os em células ao longo da sua espessura.

Cada célula é composta por um único material e situa-se no interior da camada respetiva. O modelo HAMT divide cada material em várias células e distribui-as automaticamente pelas camadas, mas de modo a que perto das interfaces o número de células seja maior [22].

O modelo HAMT trata-se assim de um modelo bastante completo que recorre, no seu cálculo, a equações de balanço de calor e humidade. No entanto, antes de ilustrarmos quais as equações que estão na base de todos os seus cálculos é importante dar a conhecer a nomenclatura utilizada pelo modelo (Quadro 2 e 3).

Quadro 2 – Nomenclatura utilizada pelo Modelo HAMT: Adaptado de [22].

Símbolo	Unidades	Significado
T	K	Temperatura
HR ou ϕ	%	Humidade Relativa
W	kg/m ³	Teor de Humidade
$\frac{\partial H}{\partial T}$	J/(m ³ .K)	Variação da capacidade de armazenamento de calor com a humidade
$\frac{\partial W}{\partial \phi}$	kg/m ³	Variação da capacidade de armazenamento de vapor de água com a humidade
$\lambda(W)$	W/(m.K)	Variação da condutibilidade térmica com a humidade
h_v	J/kg	Entalpia de evaporação da água
δ	kg/(m.s.Pa)	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar
μ	-	Fator de resistência à difusão de vapor de água
P_{vap}	Pa	Pressão parcial de vapor de água
$p_{ambient}$	Pa	Pressão do ar
C_p	J/(kg.K)	Calor específico do material seco
c^w	J/(kg.K)	Calor específico da água à temperatura de 20°C
ρ	kg/m ³	Massa volúmica do material
ρ^w	kg/m ³	Massa volúmica da água
D^w	m ² /s	Coeficiente de difusividade hídrica
A	m ²	Área
ΔV_i	m ³	Volume da célula
t	s	Tempo
$\Delta \tau$	s	Incremento de tempo entre cálculos
x	m	Distância entre os centros das células

Quadro 3 – Nomenclatura utilizada pelo Modelo HAMT: Adaptado de [22].

Símbolo	Unidades	Significado
C_i^h	J/K	Capacidade térmica da célula i
C_i^w	kg	Capacidade hídrica da célula i
R_{ij}^h	C/W	Resistência térmica entre as células i e j
R_{ij}^v	(s.Pa)/kg	Resistência à difusão de vapor de água entre as células i e j
R_{ij}^w	s/kg	Resistência à humidade líquida entre as células i e j
q_i^v	W	Calor devido à vaporização
q_i^{adds}	W	Calor resultante de outras fontes
P	m^3/m^3	Porosidade do material
p (como sobrescrito)	s	Incremento de tempo atual
i,j	-	Índices das células

Nota:

Sobrescrito ^w – indica dependência do teor de humidade;

Sobrescrito ^h – indica dependência do calor;

Sobrescrito ^v – indica dependência da pressão de vapor;

O coeficiente de difusividade hídrica D^w resulta da combinação de dois coeficientes: um relativo à sucção, D_{ws} , e um relativo à redistribuição, D_{ww}

Conhecidas as potencialidades do modelo HAMT e os parâmetros utilizados nos seus cálculos, apresentam-se de seguida, de acordo com o exposto em [22], as equações base do funcionamento do modelo:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(W) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial P_{vap}}{\partial x} \right) \quad (16)$$

e

$$\frac{\partial W}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D^w \frac{\partial W}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial P_{vap}}{\partial x} \right) \quad (17)$$

As equações (16) e (17) traduzem o balanço de calor e humidade dos elementos construtivos e foram propostas por Künzle para descrever a transferência de calor e humidade através dos materiais, respetivamente [22]. Neste caso, como é admitida a transferência de humidade através dos materiais,

deve ter-se em consideração o mecanismo de transferência de calor latente e a adsorção de humidade do ar, por parte dos materiais existentes na zona.

Muitos dos parâmetros que constituem as equações (16) e (17) têm uma dependência muito forte das condições de humidade relativa. Entre eles, destacam-se os parâmetros: μ , W , $\lambda(W)$, D^w e $\partial W / \partial \phi$.

Neste contexto, é interessante referir que a formulação utilizada por Künzle para descrever o modelo HAMT, é idêntica à utilizada no programa de simulação higrotérmica WUFI.

Como já foi referido em pontos anteriores, a correta aplicação do modelo HAMT exige que se conheça detalhadamente as propriedades de cada material relativamente ao seu comportamento, no que diz respeito à transferência de calor e humidade. Neste sentido e tendo em conta os objetivos propostos, interessa apenas perceber o significado dessas propriedades e o modo como devem ser introduzidas no programa EnergyPlus.

Deste modo, as características dos materiais a introduzir no programa são:

- **Porosidade** – Este parâmetro é expresso em m^3/m^3 e representa a proporção entre o volume de vazios dos poros e o volume total do corpo [24]. Esta propriedade pode ser facilmente introduzida para cada material através do preenchimento de um dos campos do *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Settings* [22];
- **Teor de Humidade Inicial** – Este parâmetro aparece expresso em kg/kg e corresponde à relação entre a massa de água e o volume aparente do material no estado seco [24]. Tal como a porosidade, o teor de humidade inicial de cada material deve ser introduzido no campo *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Settings* [22];
- **Curva de retenção de humidade** – Esta curva permite avaliar o grau de higroscopicidade de um dado material, ou seja, permite avaliar de que modo o seu teor de humidade é influenciado pelas condições ambientes, nomeadamente a humidade relativa. O conjunto de pontos (HR, W) para os diversos materiais pode ser introduzido através do campo *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:SorptionIsotherm* [22];
- **Coefficiente de transferência de água líquida por sucção (função do teor de humidade do material)** – Com a introdução desta informação no programa, pretende-se evidenciar a variação do coeficiente de difusividade hídrica de sucção, D_{ws} , face ao teor de humidade do material, W . Através da sua quantificação, descreve-se a absorção capilar de água, quando a superfície do material está totalmente embebida [23].
Os pares de valores (W , D_{ws}) para cada material podem ser facilmente introduzidos no campo de preenchimento *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Suction* [22];
- **Coefficiente de transferência de água líquida de redistribuição (função do teor de humidade do material)** – Através da sua inserção no programa, pretende-se evidenciar a variação do coeficiente de difusividade hídrica de redistribuição, D_{ww} , face ao teor de humidade do material, W . A partir da sua quantificação, procura-se descrever a propagação de água no material, quando a embebição está concluída [23].
Esta informação pode ser devidamente quantificada para cada material no campo *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Redistribution* [22];
- **Fator de resistência à difusão de vapor (em função da humidade relativa)** – Neste caso, pretende-se evidenciar a influência da humidade relativa, HR, no valor do fator de resistência à difusão de vapor de água do material, μ .
Os pares de valores (HR, μ) para cada material devem ser devidamente preenchidos no campo *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Diffusion* [22];

- **Condutibilidade térmica (λ) em função do teor de humidade do material (W)** – Neste caso, pretende-se evidenciar a influência do teor de humidade do material, W, na sua capacidade de transferir calor, sendo essa capacidade traduzida pelo coeficiente de condutibilidade térmica, λ .

A relação entre estes dois parâmetros pode ser introduzida para cada material a partir do campo *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:ThermalConductivity* [22];

2.2.3.4. Modelo EMPD

Na maioria das situações a caracterização detalhada dos materiais não está disponível. Por este motivo, a troca de vapor de água entre os vários materiais pode ser definida por modelos simplificados que procuram simular, na medida do possível, a realidade [14].

O modelo simplificado que o programa EnergyPlus tem ao seu dispor tem o nome de **EMPD** (Effective Moisture Penetration Depth) e permite simular a adsorção e desadsorção de vapor de água à superfície das paredes.

Neste modelo assume-se que apenas uma fina camada, localizada na superfície mais interior da parede, se comporta de forma dinâmica e efetua trocas de vapor de água com o ar interior [25]. Isto implica que a difusão de vapor de água entre o exterior e o interior através das paredes é desprezada e a fina camada absorve e liberta humidade para a zona interior quando exposta a variações de humidade no ar. Para pequenos períodos de tempo, para os quais esta variação não é muito significativa, e a adsorção/desadsorção desta camada é muito baixa, a abordagem EMPD revela-se uma aproximação razoável da realidade [25].

Por outras palavras, a seguinte equação tem que ser válida:

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{du}{dt} dt = 0 \quad (18)$$

Onde t_1 e t_2 correspondem, respetivamente, ao momento inicial e final do período de adsorção/desadsorção.

Partindo do pressuposto que a camada que contribui para a inércia higroscópica interior tem uma espessura total de L, o modelo EMPD apenas considera o fenómeno de adsorção numa camada da sua superfície, de espessura constante δ_M [25].

Deste modo, a equação (18) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\int_0^L u(x) dx = u \delta_M \quad (19)$$

Para a grande parte dos materiais de construção, a equação de adsorção de água, em equilíbrio isotérmico, pode ser formulada da seguinte maneira:

$$u = a\varphi^b + c\varphi^d \quad (20)$$

Onde

$$\varphi \approx \frac{W^*}{W_{sat}^*} \quad (21)$$

E

$$W_{sat}^* = \frac{1}{R_v \rho_{air} T^*} e^{23,7093 - \frac{4111}{T^* - 35,45}} \quad (22)$$

Em que:

φ – corresponde à humidade relativa (variando entre 0 e 1);

a , b , c e d – são coeficientes que relacionam a humidade contida nos materiais com a humidade relativa do ar;

W^* – corresponde ao teor de humidade da superfície do material;

W_{sat}^* – corresponde ao teor de humidade de saturação máxima da superfície do material;

R_v – é uma constante igual a 461,52 J/(kg.K);

ρ_{air} – corresponde à massa volúmica do ar;

T^* – corresponde à temperatura superficial;

Derivando a equação (20) em ordem ao tempo e articulando-a com o fenómeno de transferência de massa do ar para o sólido, obtém-se a equação que está na base do funcionamento do modelo EMPD. Essa equação define a transferência de vapor de água para a superfície interna da parede e toma a seguinte forma:

$$(A_i \rho_b \delta_M A_T)_i \frac{dW_i^*}{d\tau} = h_{M,i} A_i (W_r - W_i^*) + (A \rho_b \delta_M B_\rho)_i \frac{dT_i^*}{d\tau} \quad (23)$$

A principal dificuldade do uso deste modelo de cálculo é a obtenção do valor de δ_M , o qual à partida não é conhecido e o modelo não prevê a sua obtenção. No entanto, para a sua quantificação na presente dissertação, utilizou-se a expressão empírica desenvolvida pelos investigadores Cunningham [26] e Hagentoft [27].

$$\delta_M = \sqrt{\frac{\delta_{mat} \cdot P_{sat} \cdot t_p}{\rho \cdot \xi \cdot \pi}} \quad (24)$$

Onde:

δ_{mat} – representa a permeabilidade ao vapor do material;

P_{sat} – representa a pressão de saturação;

t_p – é o período de um ciclo de variação de humidade;

ρ – representa a massa volúmica do material;

$\xi = \left| \frac{\Delta \varphi}{\Delta \tau} \right|$ - representa a capacidade higroscópica específica do material;

O valor obtido é tipicamente da ordem dos milímetros para ciclos diários de variação da humidade e da ordem dos centímetros para ciclos anuais.

Assim, para que o EnergyPlus utilize o modelo EMPD no seu processo de simulação, bastará fornecer ao programa o valor do parâmetro δ_M e dos coeficientes a , b , c e d da equação da curva de adsorção do material higroscópico considerado.

Para isso basta recorrer ao campo *MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings* do software EnergyPlus.

3

DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

3.1. HABITAÇÕES SOCIAIS NA CIDADE DO PORTO

No final do século XIX, a cidade do Porto foi confrontada por duas importantes realidades, a degradação e segregação das áreas habitacionais e a incapacidade da superfície edificada para suportar a crescente população que se instalava na cidade [28].

O aumento da população, gerado pelo desenvolvimento da indústria na cidade do Porto, provocou uma subida vertiginosa do custo da habitação, tornando a oferta de alojamentos inacessível aos grupos sociais mais baixos. Neste contexto, surgiram as primeiras “ilhas”, caracterizadas pela existência de pequenos alojamentos, com deficientes condições habitacionais. Perante este panorama, surgiram algumas iniciativas de cariz filantrópico (bairros de *O Comércio do Porto*), e mais tarde medidas de maior impacto, quer pela Câmara, quer pelo Estado, com a construção de bairros sociais [28]. Este esforço por parte das entidades municipais da cidade em melhorar as condições de vida dos seus munícipes destacou-se sobretudo entre 1960 e 1970, em que se verificou um grande crescimento de habitação social, tanto em número de novos bairros como em número de alojamentos [29].

Nos dias de hoje, a cidade do Porto destaca-se como a cidade do País que dispõe do maior número de bairros sociais e também do maior número de pessoas que neles habitam [30]. De facto, existem atualmente na cidade do Porto 48 bairros sociais que abrangem aproximadamente 13.095 fogos e abrigam uma população de cerca de 40 000 pessoas, isto é, cerca de 18% da população residente no concelho (Figura 3).

Muitos desses bairros encontram-se em mau estado de conservação, não só devido à sua idade mas também ao próprio comportamento dos utilizadores. Na verdade, grande parte das famílias que neles residem são numerosas, o que conduz, muitas vezes, a situações de sobrelotação, situações essas que favorecem o aparecimento de determinadas patologias no interior das habitações.

Aliada a esta situação, surge também a falta de aquecimento verificada nas habitações. Dado o baixo poder económico das famílias e o constante crescimento dos custos de energia, não existe o hábito de as aquecer de forma sistemática. Em alternativa, as pessoas optam por reduzir os caudais de ventilação, de forma a reter o calor presente no seu interior.

Tendo em conta o estado de conservação deste parque habitacional, a autarquia da cidade do Porto tem apostado na sua requalificação, tendo-se investido, desde 2002, mais de 140 milhões de euros. Atualmente, existem 12 bairros sociais completamente recuperados pela autarquia [31].

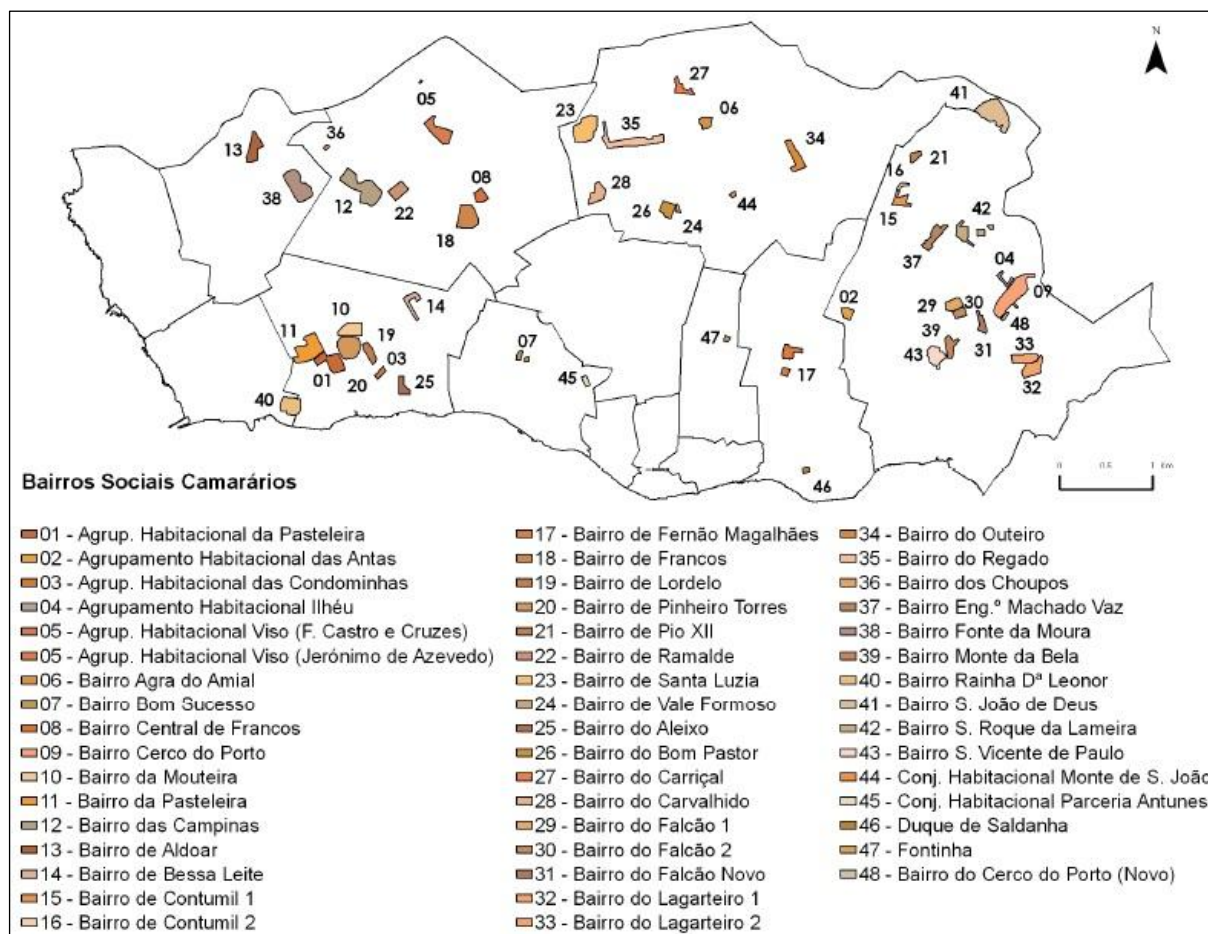


Figura 3 – Bairros sociais da cidade do Porto [29].

3.2. LOCALIZAÇÃO E CLIMA

A presente dissertação utiliza como caso de estudo uma habitação social do bairro do Lordelo, localizado na Freguesia de Lordelo do Ouro, no concelho do Porto.

Construído em 1978, este bairro social é constituído por 179 fogos distribuídos por quatro blocos (12, 13, 14 e 15), onde residem, atualmente, cerca de 450 portuenses [31].

O bairro do Lordelo foi, recentemente, alvo de profundas obras de requalificação, pois tal como a maioria dos bairros sociais da cidade do Porto, permaneceu durante muitos anos sem qualquer tipo de manutenção ou reabilitação. Todo este trabalho resultou do programa levado a cabo, desde 2002, pela Câmara Municipal do Porto e pela empresa municipal DomusSocial para a reabilitação dos bairros sociais, com o objetivo de melhorar as condições de habitabilidade dos inquilinos municipais e de contribuir para o equilíbrio global da cidade.

Para uma melhor visualização da zona em estudo, apresenta-se de seguida na Figura 4 os quatro blocos que constituem o bairro social de Lordelo.



Figura 4 – Vista aérea do bairro social de Lordelo.

Uma vez que se situa na cidade do Porto, o bairro do Lordelo fica sujeito às suas condições climáticas.

Relativamente ao clima, o clima do Porto pode ser considerado ameno, quando comparado com outras regiões do país. No entanto, ao longo de um ano, podem-se verificar temperaturas que vão desde os 0°C no inverno até temperaturas mais altas, de aproximadamente 32°C, na estação de verão [8]. Os meses nos quais o clima é mais frio são dezembro, janeiro e fevereiro e os mais quentes são julho e agosto [32].

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

Antes de se efetuar uma breve descrição da habitação social a estudar, é importante conhecer e caracterizar a envolvente construtiva onde a mesma se insere.

Tal como se pode verificar na Figura 5, o bairro do Lordelo é constituído por vários blocos plurifamiliares, em geral com 4 pisos.



Figura 5 – Blocos habitacionais do bairro de Lordelo (após reabilitação) [33].

Anteriormente à reabilitação das habitações levada a cabo, os espaços anexos às cozinhas e, por princípio, destinados ao tratamento de roupas / lavandaria não eram mais do que varandas em contacto direto com o exterior do qual apenas eram protegidas por paredes vazadas. Por sua vez, as caixas de escada que asseguram a comunicação vertical entre os diferentes pisos e habitações, apesar de cobertas, encontravam-se igualmente em contacto direto com o exterior já que as respetivas aberturas não dispunham de caixilharia ou qualquer outro elemento de proteção.

No entanto, após a requalificação, e para um maior conforto de utilização e para uma maior eficácia funcional, as paredes vazadas que separavam as lavandarias do exterior foram substituídas por caixilhos de alumínio envidraçados sendo estes ainda complementados por painéis compostos por régua metálicas (horizontais) os quais, para além de uma evidente função estética, reforçam a proteção do espaço interior nomeadamente no que diz respeito ao ensombramento. No processo de reabilitação optou-se ainda pelo encerramento das aberturas das caixas de escada através da introdução de caixilharia envidraçada o que, sem dúvida, veio proporcionar um maior conforto (térmico, sobretudo) e uma acrescida privacidade / comodidade aos moradores (Figura 6).



Figura 6 - Situação após reabilitação [33].

Um outro aspeto importante para a completa caracterização destes blocos habitacionais diz respeito à sua composição construtiva. Neste sentido, interessa fazer uma breve descrição e caracterização dos elementos construtivos existentes, sendo que:

- Para a descrição dos materiais opacos é especificada a espessura (e), a condutibilidade térmica (λ), a massa volúmica (ρ), o calor específico (C_p) e a resistência térmica (R),

correspondendo cada uma destas propriedades a valores de referência com o material seco e com temperatura de 10°C;

- Para os envidraçados é especificado o valor do coeficiente de transmissão térmica (U), o fator solar e a transmissão luminosa;

Assim, apresenta-se de seguida um conjunto de seis quadros (Quadro 4 a 10) onde se descreve detalhadamente todos os elementos considerados na construção, sendo que a ordem apresentada dos materiais é do exterior para o interior.

Quadro 4 – Paredes Exteriores.

Materiais	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kg.K]	R [m².K/W]
Tijolo face à vista	0,11	0,846 ¹	1800	900	0,13
Caixa de ar	-	-	-	-	0,18
Tijolo Vazado 11	0,11	0,407 ²	1200	900	0,27
Reboco	0,02	1,3	1900	900	0,015

Quadro 5 – Paredes Divisórias Interiores.

Materiais	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kg.K]	R [m².K/W]
Reboco	0,015	1,3	1900	900	0,012
Tijolo Vazado 7	0,07	0,368 ³	1200	900	0,19
Reboco	0,015	1,3	1900	900	0,012

Quadro 6 – Parede de Separação da Caixa de Escadas.

Materiais	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kg.K]	R [m².K/W]
Betão	0,2	2	2450	750	0,1

Quadro 7 – Pavimento.

Materiais	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kg.K]	R [m².K/W]
Cerâmica Vidrada	0,005	1,3	2300	900	0,004
Camada de Regularização	0,05	0,46	1050	960	0,109
Betão	0,25	2	2450	750	0,125
Reboco	0,015	1,3	1900	900	0,012

¹ Este valor trata-se de um valor fictício, obtido a partir da espessura e da resistência térmica do Tijolo face à vista.

² Este valor trata-se de um valor fictício, obtido a partir da espessura e da resistência térmica do Tijolo vazado 11.

³ Este valor trata-se de um valor fictício, obtido a partir da espessura e da resistência térmica do Tijolo vazado 7.

Quadro 8 – Cobertura.

Materiais	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kg.K]	R [m².K/W]
Poliestireno Extrudido	0,08	0,037	33	1210	2,162
Betão	0,25	2	2450	750	0,125

Quadro 9 – Portas.

Materiais	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m³]	C_p [J/kg.K]	R [m².K/W]
Madeira	0,04	0,23	810	1200	0,174

Quadro 10 – Envidraçados.

Janelas	U [W/m².K]	Fator Solar	Transmissão Luminosa
Janela Giratória - Quartos e Instalações Sanitárias	2,8	0,78	0,8
Janela de Correr - Salas	3	0,78	0,8
Janela de Correr - Lavandarias	4,8	0,82	0,8
Janela das Caixas de Escada	4,8	0,82	0,8

Conhecidas as principais características dos blocos habitacionais, interessa agora descrever a habitação a estudar posteriormente, no que diz respeito a condições de ventilação.

Trata-se de um apartamento de tipologia T1, localizado num dos extremos do último piso do bloco 12 (Figura 7). O apartamento dispõe de três frentes: uma orientada a Nordeste, outra a Sudoeste e uma última a Sudeste, sendo que apenas as duas primeiras contam com existência de janelas.



Figura 7 – Apartamento em estudo.

Relativamente à sua compartimentação interior, a habitação é constituída por um pequeno hall de entrada que dá acesso a uma cozinha e também a uma sala de estar. A cozinha é individualizada e tem ligação a uma pequena marquise, que funciona como lavandaria. No que diz respeito à sala, esta é separada da casa de banho por um pequeno vestíbulo, espaço esse que também permite o acesso ao quarto (Figura 8).

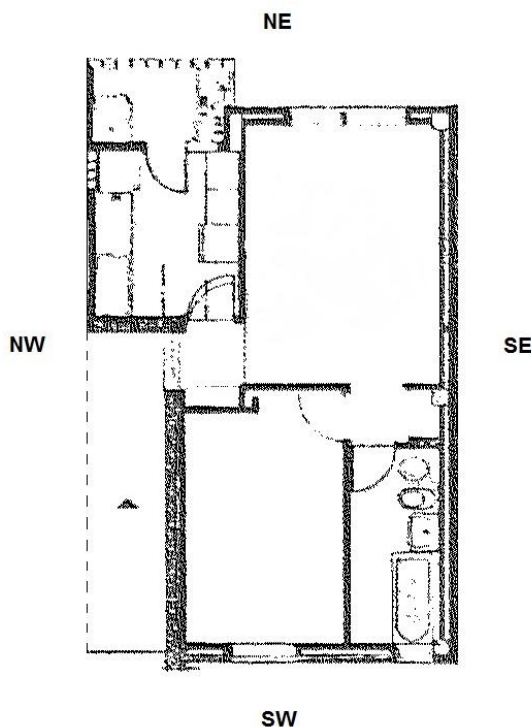


Figura 8 – Planta do apartamento em estudo.

3.4. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

3.4.1. OCUPAÇÃO

O comportamento da habitação face a diferentes condições de ventilação pode variar consoante o compartimento que se pretende analisar, já que a cada espaço correspondem diferentes padrões de utilização e de ocupação. Torna-se, deste modo, evidente considerar quatro zonas distintas: uma primeira respeitante à cozinha e à lavandaria, uma segunda englobando a sala de estar e o hall de entrada, uma terceira respeitante ao quarto de banho e ao vestíbulo e por último a zona correspondente ao quarto. No entanto, para a correta caracterização da envolvente da habitação, é importante considerar uma quinta zona, respeitante à caixa de escadas (Figura 9).

Relativamente ao número de pessoas que residem na habitação, foram considerados três indivíduos. Apesar do RCCTE [7] recomendar dois ocupantes para uma habitação de tipologia T1, no caso em estudo considerou-se um valor acima do convencional, uma vez que se trata de uma habitação social. De facto, tal como já foi referido no ponto 3.1 a maior parte das famílias que habitam em bairros sociais são bastante numerosas, o que conduz muitas vezes a situações de sobrelotação.

No que diz respeito às zonas existentes e ao seu período de ocupação foi estabelecido o seguinte:

- A zona referente à *Cozinha e Lavandaria* é ocupada diariamente nos períodos das [13:00h-14:00h] e das [20:00h-21:00h];
- A zona que abrange a *Sala e Hall* é ocupada diariamente apenas no período das [21:00h-0:00h];
- A zona referente à *Casa de Banho e Vestíbulo* é ocupada diariamente de manhã das [8:00h-9:00h];
- A zona correspondente ao *Quarto* é ocupada diariamente das [0:00h-8:00h];
- Como a *Caixa de escadas* não se destina a ocupação permanente, não é possível estabelecer nenhum horário específico de ocupação;

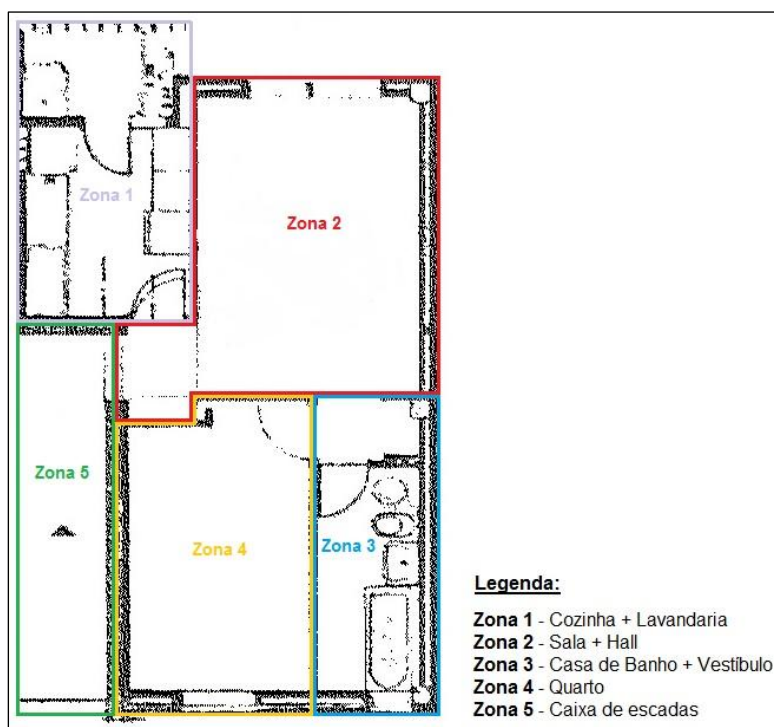


Figura 9 – Modelação da habitação: definição de zonas.

Quanto à quantificação dos ganhos internos, apenas se considerou o contributo das pessoas e da iluminação.

Para o cálculo dos ganhos internos transmitidos pelos ocupantes a um dado local, é importante definir o tipo de atividade que se desenvolve no seu interior. Consoante o tipo de atividade desenvolvida, existirá mais ou menos transmissão de calor para o seu ambiente interior. Neste contexto surge a norma ISO 7730 [6], que inclui um Quadro semelhante ao Quadro 1 apresentado em 2.1.1, onde facilmente se podem consultar as taxas metabólicas de diferentes atividades.

Para o caso em estudo considerou-se que, independentemente da zona da habitação, os ocupantes teriam sempre uma atividade sedentária, à qual corresponde uma taxa metabólica de 70 W/m^2 . Sabendo que a área de pele é de aproximadamente $1,8 \text{ m}^2$ [6], facilmente se conclui que essa taxa metabólica equivale a uma produção de 126 W/pessoa no interior de cada zona do apartamento.

Relativamente à iluminação utilizada com a ocupação dos espaços, considerou-se que teria uma potência de 15 W/m².

3.4.2. VENTILAÇÃO

No que diz respeito à ventilação, a admissão de ar é feita pelos compartimentos principais (Quarto e Sala) e a exaustão pelos compartimentos de serviço (Cozinha e Instalação sanitária).

Para um maior controlo da admissão de ar, existem grelhas autorreguláveis instaladas nos compartimentos principais da habitação, tal como se evidencia na Figura 10 para a Sala.



Figura 10 – Grelhas autorreguláveis existentes na Sala.

Para garantir a contínua renovação do ar interior, tanto a cozinha como a instalação sanitária dispõem de mecanismos de extração mecânica.

Relativamente à instalação sanitária, existe um extrator mecânico acima da banheira, que apenas funciona quando o compartimento é utilizado (Figura 11). A cozinha está equipada com um sistema centralizado de exaustão, que funciona continuamente ao longo do dia, assumindo um caudal máximo nos períodos de maior produção de vapor (Figura 12).



Figura 11 – Extração mecânica na Instalação sanitária.



Figura 12 – Sistema de exaustão das Cozinhas.

4

MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

Conhecida e caracterizada a habitação que se pretende estudar, torna-se agora necessário proceder à sua modelação no programa EnergyPlus (Versão 6.0). Importa referir que este trabalho envolve não só a introdução de alguns dados no programa, referentes ao apartamento em análise, mas também a definição do modo como se pretende que todo o processo de simulação seja desenvolvido.

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

Uma vez que o programa apresenta um conjunto de funcionalidades que ultrapassam a abrangência do âmbito desta dissertação, apenas serão abordados os parâmetros de entrada utilizados para a realização da mesma. Assim sendo, será explicado de seguida todo esse trabalho de introdução de dados.

4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Tal como foi mencionado no ponto anterior, para uma completa modelação do apartamento em estudo, é fundamental estabelecerem-se alguns critérios que permitam definir o modo como o EnergyPlus deve executar as simulações.

Deste modo, o primeiro campo seleccionado na interface do programa foi o *SimulationControl*, onde se definiu o tipo de simulação pretendida (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 – Campo de selecção *SimulationControl*.

No presente estudo pretendeu-se realizar uma simulação anual de um ficheiro climático definido para a cidade do Porto. Assim sendo, foi necessário seleccionar a opção *Run Simulation for Weather File Run Periods*. Relativamente ao ficheiro climático utilizado, trata-se de um ficheiro do tipo TMY, que

geralmente contém dados meteorológicos para 1 ano, e que pode ser facilmente descarregado a partir do site oficial do programa [34].

No entanto, como o objetivo desta dissertação não abrange qualquer tipo de cálculos de dimensionamento, as restantes opções deste campo foram definidas como *No*.

No que diz respeito ao período de simulação, considerou-se o seu início no dia 1 de janeiro e o seu término no dia 31 de dezembro (Figura 14). Quanto aos dados do ficheiro climático a ter em conta, não foi feita nenhuma diferenciação entre feriados, férias e dias festivos e, para além disso, foi considerado o efeito da pluviosidade e da neve, caso existissem.

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

Figura 14 – Campo de seleção *RunPeriod*.

Neste contexto importa também referir que, o mínimo intervalo de tempo considerado para a apresentação dos resultados das simulações foi de 15 minutos, conforme se traduz na Figura 15:

Field	Units	Obj1
Number of Timesteps per Hour		4

Figura 15 – Campo de seleção *Timestep*.

Relativamente ao modelo de transferência de calor e humidade a ser utilizado nos elementos construtivos, recorreu-se ao campo de seleção *HeatBalanceAlgorithm*, conforme se evidencia na Figura 16.

Field	Units	Obj1
Algorithm		ConductionTransferFunction
Surface Temperature Upper Limit		ConductionTransferFunction
		ConductionTransferFunction
		MoisturePenetrationDepthConductionTransferFunction
		ConductionFiniteDifference
		ConductionFiniteDifferenceSimplified
		CombinedHeatAndMoistureFiniteElement
		<BLANK>

Figura 16 – Campo de seleção *HeatBalanceAlgorithm*.

4.3. LOCALIZAÇÃO E CLIMA

Relativamente à localização da habitação, recorreu-se a um dos campos de seleção disponíveis na interface do programa – o campo de seleção *Building* (Figura 17).

Field	Units	Obj1
Name		Lordelo-TipologiaT1
North Axis	deg	30
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value		0,04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,4
Solar Distribution		FullInteriorAndExteri
Maximum Number of Warmup Days		25

Figura 17 – Campo de seleção *Building*.

Para o seu preenchimento foram necessárias informações acerca da habitação, nomeadamente a sua orientação em relação ao Norte (*North Axis*) e o tipo de terreno em que se insere (*Terrain*).

Em relação à sua orientação, foi necessário medir o ângulo, em planta, entre a fachada Norte da habitação e o Norte verdadeiro (ou Norte Geométrico), tendo-se obtido um ângulo de 30°. No que diz respeito ao parâmetro *Terrain*, uma vez que a habitação se localiza na cidade do Porto selecionou-se a opção *City* (Cidade).

Para além destes parâmetros, também foi tido em conta o tipo de distribuição solar que incide no modelo. No presente caso, considerou-se que toda a radiação incidente era absorvida pelo pavimento e pelas paredes e que o sombreamento existente era causado pelas palas exteriores do edifício, tendo-se para isso selecionado a opção *FullInteriorAndExterior*.

Relativamente aos restantes parâmetros, foram deixados os valores por defeito, uma vez que só utilizadores mais experientes têm sensibilidade sobre os valores que podem adotar.

Um outro campo de seleção utilizado foi o *Site:Location*, onde foram definidas as coordenadas geográficas da habitação (latitude, longitude e altitude), de acordo com as características climáticas da cidade do Porto. Este campo de seleção é apresentado na Figura 18.

Field	Units	Obj1
Name		PRT_Porto.085450
Latitude	deg	41,23
Longitude	deg	-8,68
Time Zone	hr	0
Elevation	m	73

Figura 18 – Campo de seleção *Site:Location*.

4.4. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS OPACOS

Conforme o exposto no ponto 2.2.3, referente aos diferentes tipos de modelos suscetíveis de serem utilizados no que diz respeito à transferência de calor e humidade, o modelo de cálculo HAMT é aquele que revela um maior rigor nos seus cálculos, sendo que para a sua aplicação é absolutamente

necessário um conhecimento detalhado das propriedades de todos os materiais que compõem a(s) zona(s) a estudar.

Na verdade, para a sua aplicação é importante conhecer para cada material, não só as suas propriedades térmicas, mas também propriedades que permitam um estudo completo do seu comportamento face à humidade. As referidas propriedades são:

- Condutibilidade térmica;
- Massa Volúmica;
- Calor específico;
- Curva de retenção de humidade;
- Teor de humidade inicial;
- Porosidade;
- Coeficiente de transferência de água líquida por sucção (função do teor de humidade do material);
- Coeficiente de transferência de água líquida de redistribuição (função do teor de humidade do material);
- Fator de resistência à difusão de vapor (função da humidade relativa);
- Condutibilidade térmica em função do teor de humidade do material;

As três primeiras propriedades devem assumir valores de referência para o material seco e à temperatura de 10°C.

Uma vez que o estudo que se pretende realizar na habitação terá como base a aplicação do referido modelo, facilmente se conclui que a informação disponível acerca dos materiais que a compõem (Quadros 4 a 10) está bastante incompleta.

Neste sentido, recorreu-se à base de dados de materiais do WUFI 5.1 Light [35] e procuraram-se materiais com características semelhantes às do caso em estudo. Nesta base de dados são fornecidas informações muito específicas dos materiais, incluindo as propriedades que definem o seu comportamento face à humidade. Realizada a pesquisa de semelhança de materiais, construiu-se um quadro de equivalência de materiais (Quadro 11 e 12).

Quadro 11 – Correspondência de materiais.

Material da habitação em estudo	Material WUFI	Fonte WUFI
Tijolo face à vista	Solid Brick	MASEA Database
Tijolo vazado 7	Tijolo leve de alta perfuração segundo DIN 105/2	DIN 4108-4
Tijolo vazado 11	Tijolo leve de alta perfuração segundo DIN 105/2	DIN 4108-4
Betão	Concrete	MASEA Database
Camada de regularização	Betão leve; com porosidade suplementar, Bruto=1200, $\mu=15$	DIN 4108-4
Poliestireno extrudido	Poliestireno extrudido	LTH Universidade de Lund

Quadro 12 – Correspondência de materiais.

Material da habitação em estudo	Material WUFI	Fonte WUFI
Caixa de ar	Camada de ar de 40 mm	Materiais Genéricos
Reboco	Reboco mineral	IBP Holzkirchen
Cerâmica vidrada	Cerâmica e Mosaico de vidro, $\mu=300$	DIN 4108-4
Madeira	Carvalho Longitudinal	IBP Holzkirchen

Neste contexto, importa salientar que para a correta aplicação do modelo HAMT no programa EnergyPlus, todas as propriedades listadas anteriormente têm de ser devidamente quantificadas para cada material existente na habitação.

Isto significa que para materiais como a “caixa de ar”, para a qual foi apenas fornecida a sua resistência térmica, houve um trabalho acrescido, uma vez que foi necessário encontrar na base de dados do WUFI uma camada de ar com uma resistência térmica equivalente.

Relativamente à condutibilidade térmica, à densidade e ao calor específico dos vários materiais existentes, considerou-se o seguinte:

Quadro 13 – Características dos materiais: Valores de λ , ρ e C_p .

Material	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)
Tijolo face à vista	0,861	1788	868
Tijolo Vazado 7	0,42	900	850
Tijolo Vazado 11	0,42	900	850
Betão	1,373	2104	776
Camada de Regularização	0,46	1200	850
Poliestireno Extrudido	0,04	20	1500
Caixa de ar	0,23	1,3	1000
Reboco	0,8	1900	850
Cerâmica Vidrada	1,2	2000	850
Madeira	0,3	685	1500

As espessuras dos materiais existentes já foram apresentadas no ponto 3.3 (Quadro 4 a 9), exceto a “caixa de ar”, para a qual foi definida uma espessura de 0,04 m.

No que diz respeito à curva de retenção de humidade, existem materiais para os quais a base de dados do WUFI assume como nula a respetiva curva, sendo o caso da caixa de ar, da cerâmica vidrada, da camada de regularização e dos tijolos vazados. Quanto aos restantes materiais, as curvas de retenção de humidade consideradas aparecem evidenciadas nas Figuras 19 a 23.

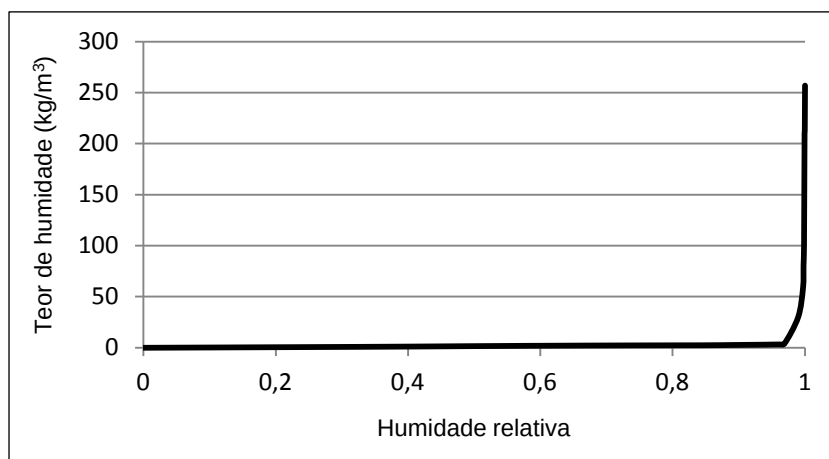


Figura 19 – Valores da curva de retenção de umidade – Tijolo face à vista.

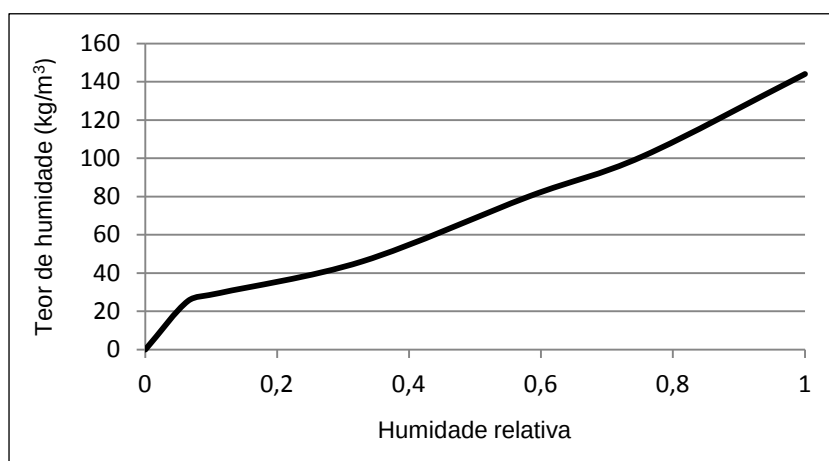


Figura 20 – Valores da curva de retenção de umidade – Betão.

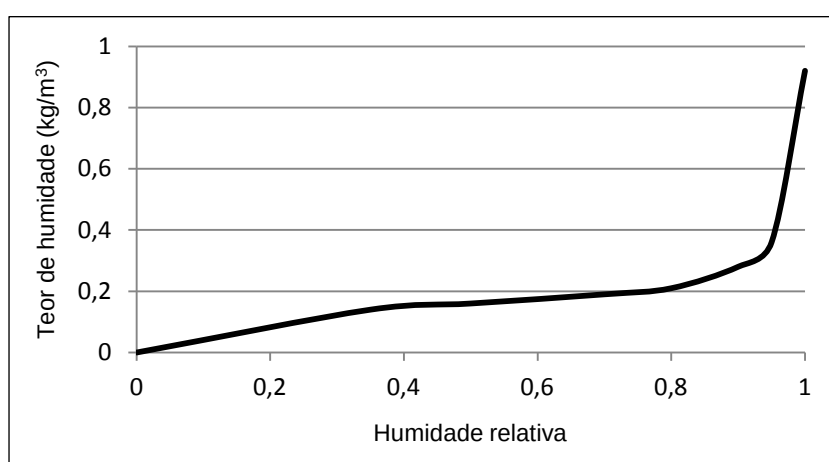


Figura 21 – Valores da curva de retenção de umidade – Poliestireno extrudido.

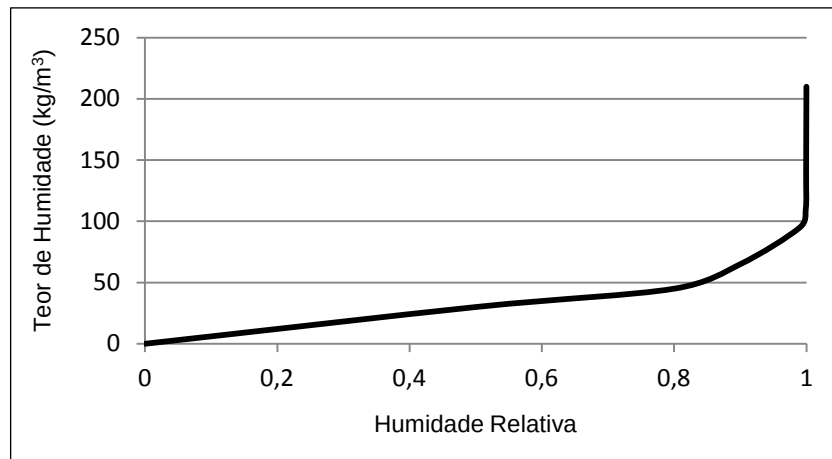


Figura 22 – Valores da curva de retenção de humidade – *Reboco*.

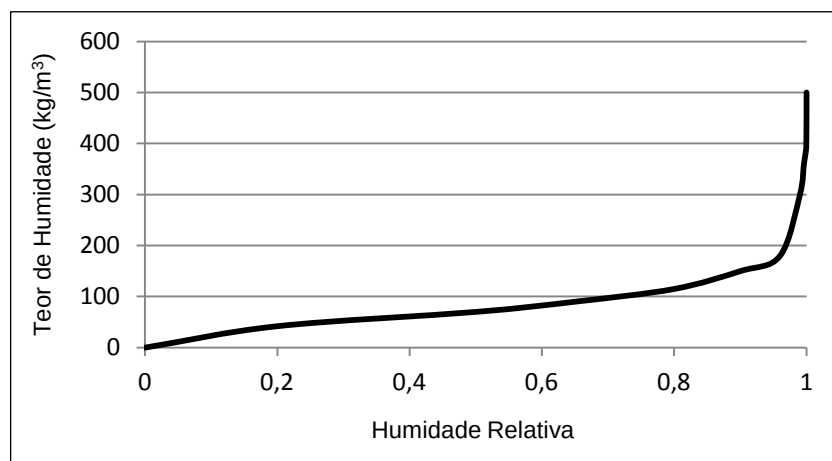


Figura 23 – Valores da curva de retenção de humidade – *Madeira*.

Relativamente ao teor de humidade inicial dos materiais, o EnergyPlus exige que o seu valor seja expresso em kg/kg. Deste modo, considerou-se a seguinte equação de cálculo:

$$W_{\text{inicial}}(\text{kg/kg}) = \frac{W_{\text{HR}=60\%}(\text{kg/m}^3)}{\rho(\text{kg/m}^3)} \quad (25)$$

Em que:

W_{inicial} – representa o teor de humidade inicial do material;

$W_{\text{HR}=60\%}$ – representa o teor de humidade contido no material para uma humidade relativa do ar de 60%. Este valor é obtido através da curva de retenção de humidade do material;

ρ – representa a massa volúmica de cada material existente;

Assim, utilizando a equação (25) foi possível calcular o teor de humidade inicial para cada um dos materiais, tal como se evidencia no Quadro 14.

Quadro 14 – Teor de humidade inicial dos materiais.

Material	Teor de Humidade Inicial (Kg/Kg)
Tijolo face à vista	0,001102
Tijolo Vazado 7	0
Tijolo Vazado 11	0
Betão	0,039116
Camada de Regularização	0
Poliestireno Extrudido	0,009
Caixa de ar	0
Reboco	0,018421
Cerâmica Vidrada	0
Madeira	0,121606

Quanto à porosidade dos diferentes materiais, a base de dados do WUFI não quantifica esse valor para a camada de regularização, para a cerâmica de vidro, nem para os tijolos vazados. Deste modo e tendo em conta que é necessário quantificar todas as propriedades dos materiais, considerou-se para esses casos porosidade nula. A porosidade dos vários materiais é apresentada no Quadro 15.

Quadro 15 – Porosidade dos materiais.

Material	Porosidade (m³/m³)
Tijolo face á vista	0,35
Betão	0,22
Poliestireno Extrudido	0,98
Caixa de ar	0,999
Reboco	0,24
Madeira	0,72

Centrando agora a atenção na relação existente entre o teor de humidade de um dado material e o valor dos coeficientes de transferência de água líquida (D_{ws} e D_{ww}), apenas o tijolo face à vista, o betão, o reboco e a madeira possuem valores para esses coeficientes. Para os restantes materiais, esses coeficientes assumem o valor nulo. Essa relação entre o teor de humidade e os coeficientes D_{ws} e D_{ww} apresenta-se de seguida nos Quadros 16 a 19.

Quadro 16 – Coeficientes de transferência de água líquida – Tijolo face à vista

Tijolo face à vista		
Teor de Humidade (kg/m ³)	D _{ws} (m ² /s)	D _{ww} (m ² /s)
0	0	0
2,40	3,2×10 ⁻⁹	6×10 ⁻¹⁰
257	3×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁷

Quadro 17 – Coeficientes de transferência de água líquida – Betão.

Betão		
Teor de Humidade (kg/m ³)	D _{ws} (m ² /s)	D _{ww} (m ² /s)
0	0	0
101	3,6×10 ⁻⁹	5×10 ⁻¹⁸
144	2,9×10 ⁻⁸	5×10 ⁻¹⁶

Quadro 18 – Coeficientes de transferência de água líquida – Reboco.

Reboco		
Teor de Humidade (kg/m ³)	D _{ws} (m ² /s)	D _{ww} (m ² /s)
0	0	0
45	1×10 ⁻¹²	1×10 ⁻¹²
210	2,4×10 ⁻¹⁰	2,4×10 ⁻¹¹

Quadro 19 – Coeficientes de transferência de água líquida – Madeira.

Madeira		
Teor de Humidade (kg/m ³)	D _{ws} (m ² /s)	D _{ww} (m ² /s)
0	0	0
20	3,510-12	3,610-12
500	8,810-10	8,810-10

No que diz respeito ao fator de resistência à difusão de vapor (μ) de cada um dos materiais da habitação, o seu valor é independente da humidade relativa (Quadro 20).

Quadro 20 – Fator de resistência à difusão de vapor dos materiais.

Material	μ
Tijolo face à vista	13
Tijolo Vazado 7	10
Tijolo Vazado 11	10
Betão	76
Camada de Regularização	15
Poliestireno Extrudido	125
Caixa de ar	0,38
Reboco	25
Cerâmica Vidrada	300
Madeira	8

Por último, importa evidenciar a relação existente entre o teor de humidade de cada material e a respetiva condutibilidade térmica. No caso em estudo, o teor de humidade influencia a condutibilidade térmica apenas nos materiais tijolo face à vista, betão, reboco e madeira (Quadros 21 a 24).

Quadro 21 – Variação de λ com a humidade – Tijolo face à vista.

Tijolo face à vista	
Teor de Humidade (kg/m^3)	λ (W/m.K)
0	0,861
350	2,209

Quadro 22 – Variação de λ com a humidade – Betão.

Betão	
Teor de Humidade (kg/m^3)	λ (W/m.K)
0	1,373
220	2,522

Quadro 23 – Variação de λ com a humidade – Reboco.

Reboco	
Teor de Humidade (kg/m ³)	λ (W/m.K)
0	0,8
240	1,608

Quadro 24 – Variação de λ com a humidade – Madeira.

Madeira	
Teor de Humidade (kg/m ³)	λ (W/m.K)
0	0,3
720	0,710

Tendo em conta o que foi realizado anteriormente, importa salientar que, apesar de algumas propriedades de certos materiais não aparecerem devidamente quantificadas na base de dados do WUFI, tal como a porosidade e a curva de retenção de humidade, teve-se o cuidado de garantir que os materiais mais interiores ficassem devidamente caracterizados, dado o seu contributo para a inércia higroscópica.

Após todo este trabalho de preparação, tem-se à disposição toda a informação necessária para a correta introdução dos materiais no EnergyPlus.

Introduzidos os materiais e respetivas propriedades no programa, é possível definir-se os vários elementos construtivos que compõem a habitação. Para isso, recorreu-se ao campo de seleção *Construction* (Figura 24).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj12
Name		Parede Exterior - Sudoeste	Parede Exterior - Sudeste	Parede Exterior - Nordeste	Cobertura	Pavimento	Parede Separação Cx Escads	Paredes Divisórias	Porta madeira
Outside Layer		Tijolo Face à vista	Tijolo Face à vista	Tijolo Face à vista	poliestireno extru	cerâmica vidrada	betão 20 cm	reboco 1.5 cm	madeira 4cm
Layer 2		caixa de ar	caixa de ar	caixa de ar	betão 25 cm	camada Regulari		Tijolo Vazado 7	
Layer 3		Tijolo Vazado 11	Tijolo Vazado 11	Tijolo Vazado 11		betão 25 cm		reboco 1.5 cm	
Layer 4		reboco 2 cm	reboco 2 cm	reboco 2 cm		reboco 2 cm			
Layer 5									
Layer 6									
Layer 7									
Layer 8									
Layer 9									
Layer 10									

Figura 24 – Campo de seleção *Construction*.

4.5. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS

Os envidraçados, tal como os materiais, também foram devidamente caracterizados no EnergyPlus, utilizando-se as propriedades descritas no Quadro 10 do ponto 3.3. Para a sua caracterização, utilizou-se o campo *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem* (Figura 25).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Janela Giratória "Quartos e Instalações Sanitárias"	Janela de Correr "Salas"	Janela de Correr "Lavandarias"	Janela da Caixa de Escadas
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 25 – Campo de seleção *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*.

Os envidraçados foram definidos no grupo *Construction* e devidamente modelados através do campo *FenestrationSurface:Detailed* (Figura 26).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		JanelaLavandaria-N	JanelaSala-Nord	JanelaCasaBant	JanelaQuarto-Sur	JanelaCaixaEscada
Surface Type		Window	Window	Window	Window	Window
Construction Name		Janela Lavandaria	Janela Sala	Janela WC	Janela Quarto	Janela Caixa Escad.
Building Surface Name		Parede ExteriorLav	ParedeExteriorSa	ParedeExteriorC	ParedeExteriorQu	ParedeCaixaEscad
Outside Boundary Condition Object						
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Shading Control Name						
Frame and Divider Name						
Multiplier		1	1	1	1	1
Number of Vertices		4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	2,3	3,7	0,9	0,85	0,1
Vertex 1 Y-coordinate	m	4,4	4,7	0	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,625	2,225	1,95	2,225	2,625
Vertex 2 X-coordinate	m	2,3	3,7	0,9	0,85	0,1
Vertex 2 Y-coordinate	m	4,4	4,7	0	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	1,225	1,025	1,025	1,025	1,225
Vertex 3 X-coordinate	m	0,1	1,7	1,5	1,95	1,2
Vertex 3 Y-coordinate	m	4,4	4,7	0	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	1,225	1,025	1,025	1,025	1,225
Vertex 4 X-coordinate	m	0,1	1,7	1,5	1,95	1,2
Vertex 4 Y-coordinate	m	4,4	4,7	0	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,625	2,225	1,95	2,225	2,625

Figura 26 – Campo de seleção *FenestrationSurface:Detailed*.

Como a cobertura do bloco habitacional se destaca da fachada, foi também importante modelar uma estrutura de sombreamento, tal como se evidencia na Figura 27.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		Pala1	Pala2	Pala3	Pala4	Pala5	Pala6	Pala7	Pala8
Base Surface Name		Parede ExteriorLav	ParedeExteriorLav	ParedeExteriorSala	ParedeExteriorSala	ParedeExteriorCasa	ParedeExteriorCasa	ParedeExteriorQuar	ParedeCaixaEscad
Transmittance Schedule Name									
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0	2,4	1,1	4,6	1,9	0	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	4,9	4,9	5,2	5,2	4,3	0	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
Vertex 2 X-coordinate	m	0	2,9	1,1	4,6	1,9	0	0	0
Vertex 2 Y-coordinate	m	4,4	4,9	4,7	0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
Vertex 2 Z-coordinate	m	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
Vertex 3 X-coordinate	m	2,4	2,9	4,6	5,1	2,4	1,9	2,7	1,3
Vertex 3 Y-coordinate	m	4,4	4,1	4,7	0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
Vertex 3 Z-coordinate	m	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
Vertex 4 X-coordinate	m	2,4	2,4	4,6	5,1	2,4	1,9	2,7	1,3
Vertex 4 Y-coordinate	m	4,9	4,1	5,2	5,2	4,3	0	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75

Figura 27 – Campo de seleção *Shading:Zone:Detailed*.

4.6. DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS E DOS RESPECTIVOS HORÁRIOS DE OCUPAÇÃO

Tal como já foi mencionado no ponto 3.4.1, para avaliar o comportamento higrotérmico da habitação, optou-se por dividir a mesma em quatro zonas distintas: *Cozinha + Lavandaria*, *Sala + Hall*, *Casa de Banho + Vestíbulo* e *Quarto*.

No entanto, para a correta modelação do apartamento no EnergyPlus foi necessário considerar uma quinta zona, respeitante à caixa de escadas que permite o acesso à habitação. Apesar da caixa de escadas não fazer parte da habitação, trata-se de um espaço não útil do edifício [7] que se encontra em contacto com a mesma, e que influencia o seu comportamento interior. No entanto, embora esta zona tenha que ser considerada para a modelação do apartamento, não será tida em conta na análise de resultados a realizar posteriormente. Deste modo, foram definidas cinco zonas distintas, sendo essas zonas designadas pelo software por *zonas térmicas*. Para a sua definição no programa, recorreu-se ao campo *Zone*, tal como se evidencia na Figura 28.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		cozinha+lavandaria	Sala+Hall	Casa de Banho+vestibulo	Quarto	Caixa de Escadas
Direction of Relative North	deg	0	0	0	0	0
X Origin	m	0	1,3	4	1,3	0
Y Origin	m	0	-1,1	-5,4	-5,4	-5,4
Z Origin	m	0	0	0	0	0
Type		1	1	1	1	1
Multiplier		1	1	1	1	1
Ceiling Height	m	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Volume	m3	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Zone Inside Convection Algorithm						
Zone Outside Convection Algorithm						
Part of Total Floor Area		Yes	Yes	Yes	Yes	No

Figura 28 – Campo de seleção *Zone*.

Neste campo foi criada uma Zona 1, respeitante à cozinha e à lavandaria, uma Zona 2, que engloba a sala e o hall, uma Zona 3, respeitante à casa de banho e ao vestíbulo, uma Zona 4, respeitante ao quarto e, finalmente, uma Zona 5, respeitante à caixa de escadas.

Depois de definidas as várias zonas térmicas, estabeleceram-se, com base na informação exposta no ponto 3.4.1, os respetivos períodos de ocupação. Para isso, utilizou-se o campo *Schedule:Compact* (Figura 29).

Field	Units	Obj3	Obj6	Obj7	Obj8
Name		sch_ocupação_Z1	sch_ocupação_Z2	sch_ocupação_Z3	sch_ocupação_Z4
Schedule Type Limits Name		any number	any number	any number	any number
Field 1	varies	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31	Through:12/31
Field 2	varies	For:alldays	For:alldays	For:alldays	For:alldays
Field 3	varies	Until:13:00	Until: 21:00	Until: 8:00	Until: 8:00
Field 4	varies	0	0	0	1
Field 5	varies	Until: 14:00	Until: 24:00	Until: 9:00	Until: 24:00
Field 6	varies	1	1	1	0
Field 7	varies	Until: 20:00		Until: 24:00	
Field 8	varies	0		0	
Field 9	varies	Until: 21:00			
Field 10	varies	1			
Field 11	varies	Until: 24:00			
Field 12	varies	0			

Figura 29 – Campo de seleção *Schedule:Compact*.

Deste modo, foi possível definir-se quatro horários de ocupação, sendo que:

- Para a **Zona 1** foi considerada a existência de três ocupantes no período das [13:00h-14:00h] e das [20:00h-21:00h] de todos os dias do ano;
- Para a **Zona 2** foi considerada a existência de três ocupantes no período das [21:00h-0:00h] de todos os dias do ano;
- Para a **Zona 3** foi considerada a existência de três ocupantes no período das [8:00h-9:00h] de todos os dias do ano;
- Para a **Zona 4** foi considerada a existência de três ocupantes no período das [0:00h-8:00h] de todos os dias do ano;

Neste ponto importa salientar que a interação entre as diversas zonas térmicas também foi considerada, tendo-se definido para isso uma série de condições fronteira entre os elementos que constituem a habitação. Esse trabalho é definido no ponto seguinte.

4.7. CONDIÇÕES FRONTEIRA DOS ELEMENTOS QUE CONSTITUEM A HABITAÇÃO

O campo de seleção *BuildingSurface:Detailed*, permite definir as condições fronteira dos vários elementos construtivos. No caso em estudo, uma vez que existe um grande número de elementos a modelar, apenas se evidenciam alguns deles na Figura 30.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj10	Obj12	Obj15
Name		Parede ExteriorLavand	ParedeExteriorLavand	ParedeSalaQuartodeBanho	LajedePavimento2	ParedeCasaBanhoSala
Surface Type		Wall	Wall	Wall	Floor	Wall
Construction Name		Parede Exterior - Norte	Parede Exterior - Sude	Paredes Divisórias Interiores	Pavimento	Paredes Divisórias Interiores
Zone Name		cozinha+lavandaria	cozinha+lavandaria	Sala+Hall	Sala+Hall	Casa de Banho+vestibulo
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Zone	Adiabatic	Zone
Outside Boundary Condition Object				Casa de Banho+vestibulo		Sala+Hall
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	NoSun	NoSun	NoSun
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	NoWind	NoWind	NoWind
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	2,4	2,4	2,7	0	1,9
Vertex 1 Y-coordinate	m	4,4	3,6	0	1,1	4,3
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,75	2,75	2,75	0	2,75
Vertex 2 X-coordinate	m	2,4	2,4	2,7	1,1	1,9
Vertex 2 Y-coordinate	m	4,4	3,6	0	1,1	4,3
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	0	2,4	4,6	1,1	0
Vertex 3 Y-coordinate	m	4,4	4,4	0	4,7	4,3
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0
Vertex 4 X-coordinate	m	0	2,4	4,6	4,6	0

Figura 30 – Campo de seleção *BuildingSurface:Detailed*.

De acordo com a Figura referida, começa-se por definir a tipologia de cada elemento construtivo (Parede, Pavimento ou Teto) e a respetiva zona onde se insere. Definidos estes parâmetros, estabelecem-se as condições fronteira a partir do separador *Outside Boundary Condition*. Para a situação em estudo foi considerado o seguinte:

- Para os casos em que os elementos, de determinada zona, façam fronteira com o exterior, seleciona-se a opção *Outdoors*;
- Para os casos em que os elementos construtivos sejam comuns a duas zonas térmicas, seleciona-se a opção *Zone*. Numa situação deste tipo torna-se necessário definir duas vezes o mesmo elemento, já que o programa tem que perceber que o elemento é o mesmo mas separa duas zonas térmicas distintas;

- Para os casos em que não existe qualquer troca de calor ou humidade entre o elemento em causa e a sua fronteira, selecciona-se a opção *Adiabatic*;

Nos casos em que é seleccionada a opção *Zone*, é necessário recorrer ao separador *Outside Boundary Condition Object*, para definir a zona que faz fronteira com o campo *Outside Boundary Condition*.

Um outro parâmetro importante para a correta modelação dos elementos construtivos, diz respeito à exposição solar (*Sun Exposure*). Uma vez que existe desvão na cobertura, considera-se que os elementos referentes a *lajes de teto* não são atingidos pela radiação solar. Desta forma, apenas as paredes exteriores, com exceção da parede da lavandaria, estão sujeitas ao seu efeito.

No que diz respeito à exposição ao vento (*Wind Exposure*), apenas os elementos interiores não são sujeitos à sua ação.

Estabelecidas as condições fronteira de todos os elementos construtivos, procedeu-se à modelação das portas de madeira existentes na habitação. Para isso, foi utilizado o campo de seleção *Door:Interzone* (Figura 31).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Porta 1	Porta 2	Porta 3	Porta 4
Construction Name		Porta madeira	Porta madeira	Porta madeira	Porta madeira
Building Surface Name		ParedeSalaCozinha	ParedeCasaBanhoSala	ParedeCasaBanhoQuarto2	ParedeSalaCaixaEscadas
Outside Boundary Condition Object		cozinha+lavandaria	Sala+Hall	Casa de Banho+vestibulo	Sala+Hall
Multiplier		1	1	1	1
Starting X Coordinate	m	0,2	0,2	3,5	0,1
Starting Z Coordinate	m	0	0	0	0
Length	m	0,7	0,7	0,7	0,9
Height	m	1,9	1,9	1,9	1,9

Figura 31 – Campo de seleção *Door:Interzone*.

4.8. GANHOS INTERNOS

Tal como já foi mencionado, os ganhos internos na habitação são devidos à presença dos ocupantes e à iluminação utilizada com a ocupação dos vários espaços.

Para a definição dos ganhos internos transmitidos pelos ocupantes aos diversos espaços recorreu-se ao campo de seleção *People*, tal como se evidencia na Figura 32.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Pessoas "cozinha+lavandaria"	Pessoas "Sala"	Pessoas "CasadeBanho"	Pessoas "Quarto"
Zone or ZoneList Name		cozinha+lavandaria	Sala+Hall	Casa de Banho+vestibulo	Quarto
Number of People Schedule Name		sch_ocupação_Z1	sch_ocupação_Z2	sch_ocupação_Z3	sch_ocupação_Z4
Number of People Calculation Method		People	People	People	People
Number of People		3	3	3	3
People per Zone Floor Area	person/m2				
Zone Floor Area per Person	m2/person				
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3	0,3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		Sch_actividade	Sch_actividade	Sch_actividade	Sch_actividade
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s·W				
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		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					

Figura 32 – Campo de seleção *People*.

Neste campo foi possível associar a cada uma das zonas criadas o respetivo período de ocupação, e a taxa metabólica desenvolvida pelos ocupantes durante a sua permanência nas mesmas.

Segundo o que foi estabelecido no ponto 3.4.1, cada zona da habitação estaria sujeita a uma taxa metabólica de 126 W/pessoa. Para definir essa taxa recorreu-se novamente ao campo *Schedule:Compact*, tal como se traduz na Figura 33.

Field	Units	Obj1
Name		sch_actividade
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	126

Figura 33 – Definição da taxa metabólica desenvolvida pelos ocupantes.

Tal como se evidencia na Figura 32, sempre que determinada zona seja ocupada pressupõe-se a existência de três ocupantes. Deste modo, a quantidade de calor libertado para o ambiente corresponde a 378 W.

No que diz respeito à iluminação, o procedimento foi semelhante ao anterior, tendo-se utilizado, neste caso, o campo de seleção *Lights*. Neste campo definiu-se a potência utilizada (15 W/m^2) e associou-se a este equipamento horários de funcionamento exatamente iguais aos utilizados para retratar os períodos de ocupação das várias zonas.

4.9. VENTILAÇÃO

Conforme já foi mencionado anteriormente, o objetivo principal deste trabalho é compreender o comportamento higrotérmico da habitação, face a diversas condições de ventilação. Deste modo, torna-se importante referir as condições que irão ser consideradas e estudadas ao longo do trabalho.

Numa primeira fase de trabalho, considerou-se que a habitação estaria submetida a um regime de ventilação contínuo ao longo do dia. Por outro lado, numa segunda fase, decidiu-se também submeter o apartamento a um regime de ventilação variável. Para simplificar o estudo, a ventilação foi expressa em termos de “*taxa de renovação horária*”, isto é, em termos de Rph.

Relativamente ao regime de ventilação contínuo, foram definidas cinco taxas de renovação horária:

- $Rph = 0,3 \text{ h}^{-1}$;
- $Rph = 0,6 \text{ h}^{-1}$ (Valor mínimo recomendável pelo RCCTE [7]);
- $Rph = 1 \text{ h}^{-1}$;
- $Rph = 2 \text{ h}^{-1}$;
- $Rph = 5 \text{ h}^{-1}$;

A cada um destes valores corresponde um regime de ventilação, ao qual estará associado um determinado comportamento higrotérmico interior. Para uma melhor compreensão dos valores de Rph considerados, pode-se, a título de exemplo, considerar que o valor de $0,3 \text{ h}^{-1}$ corresponde a uma situação em que o morador impede a entrada de ar na sua habitação, enquanto o valor de 5 h^{-1} corresponde a uma situação extrema, em que o morador deixa a janela aberta.

No que diz respeito ao regime de ventilação variável foram definidos doze possíveis regimes de ventilação, considerando-se em três deles um forte acréscimo de Rph ao longo do dia. Todos os regimes propostos compreendem a existência diária de dois períodos de ventilação: um período P_1 que tem início às 8h e ao qual corresponde um valor de $Rph_{\text{máx}}$, e um período P_2 , ao qual corresponde um valor de $Rph_{\text{mín}}$. Deste modo, apresentam-se nos Quadros 25 e 26 os regimes variáveis (RV) considerados no estudo.

Quadro 25 – Regimes de ventilação variável.

	RV 1	RV 2	RV 3	RV 4	RV 5	RV 6	RV 7	RV 8	RV 9
$Rph_{\text{mín}} (\text{h}^{-1})$	0,3	0,3	0,3	0,8	0,8	0,8	1,3	1,3	1,3
$Rph_{\text{máx}} (\text{h}^{-1})$	0,5	0,5	0,5	1,4	1,4	1,4	2,3	2,3	2,3
P_1/P_2	0,2	0,5	0,8	0,2	0,5	0,8	0,2	0,5	0,8
$Rph_{\text{médio}} (\text{h}^{-1})$	0,33	0,37	0,39	0,9	1	1,08	1,47	1,63	1,76

Quadro 26 – Regimes de ventilação variável com forte acréscimo de Rph.

	RV 10	RV 11	RV 12
$Rph_{\text{mín}} (\text{h}^{-1})$	0,3	0,3	0,3
$Rph_{\text{máx}} (\text{h}^{-1})$	2	2	2
P_1/P_2	0,2	0,5	0,8
$Rph_{\text{médio}} (\text{h}^{-1})$	0,58	0,87	1,08

Depois de estabelecidos todos os regimes de ventilação necessários para o estudo higrotérmico da habitação, será interessante perceber o modo como foram quantificados no programa EnergyPlus.

Relativamente ao regime de ventilação contínuo, apenas se explicará a introdução de dados para a situação em que a habitação está sujeita a uma taxa de renovação horária igual a 1 h^{-1} . Para as outras taxas consideradas, o processo de introdução de dados é exatamente igual, não sendo assim necessário explicar esses casos.

Para afetar a habitação de uma taxa de renovação horária de 1 h^{-1} , foi necessário recorrer ao campo de seleção *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, onde foi possível submeter cada uma das zonas térmicas ao regime contínuo pretendido (Figura 34).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Infiltração Z0na "C0zinha+	Infiltração Z0na "Sala+	Infiltração Z0na "CasadeBanho+	Infiltração Z0na "Quarto	Infiltração Z0na "CaixadeEscadas"
Zone or ZoneList Name		cozinha+lavandaria	Sala+Hall	Casa de Banho+vestibulo	Quarto	Caixa de Escadas
Schedule Name		sch_infiltração_generico	sch_infiltração_generico	sch_infiltração_generico	sch_infiltração_generico	sch_infiltração_generico
Design Flow Rate Calculation Method		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	1	1	1	1
Constant Term Coefficient		1	1	1	1	1
Temperature Term Coefficient						
Velocity Term Coefficient						
Velocity Squared Term Coefficient						

Figura 34 – Campo de seleção *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*.

Tal como foi mencionado anteriormente, a ventilação será sempre traduzida em termos de taxa de renovação horária, isto é, em termos de Rph. Desta forma, foi necessário selecionar a opção *AirChanges/Hour*, no parâmetro *Design Flow Rate Calculation Method*.

Seguidamente, submeteram-se todas as zonas térmicas à taxa de renovação horária pretendida, afetando o parâmetro *Air Changes per Hour* com o valor de 1 h^{-1} . Analogamente aos ganhos internos, também neste caso foi necessário submeter a renovação de ar a um determinado horário de ocorrência. Deste modo, considerou-se que 100% da taxa de renovação fixada (1 h^{-1}) ocorreria até às 24h de todos os dias do ano (Figura 35).

Field	Units	Obj9
Name		sch_infiltração_generico
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

Figura 35 – Definição do horário de renovação de ar no campo de seleção *Schedule:Compact*.

Relativamente às outras taxas de renovação horária consideradas para o estudo, caso se pretenda a sua consideração, bastará alterar para todas as zonas o parâmetro *Air Changes per Hour* e afetá-lo da taxa pretendida.

No que diz respeito ao regime de ventilação variável, devem criar-se os regimes de ventilação pretendidos no campo de seleção *Schedule:Compact* e seguidamente recorrer-se ao campo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*. Uma vez que foram considerados doze possíveis regimes de

ventilação, apenas se explicará, de seguida, a introdução de um deles no programa EnergyPlus. O caso escolhido foi o regime de ventilação variável RV1, que aparece traduzido no Quadro 27.

Quadro 27 – Regime de ventilação variável RV1.

Regime de ventilação variável 1 – RV1		
Rph _{min} (h ⁻¹)	Rph _{máx} (h ⁻¹)	P ₁ /P ₂
0,3	0,5	0,2

De acordo com o Quadro 27, o regime RV1 compreende a existência diária de um período de ventilação P₁ que tem início às 8h e ao qual corresponde um valor de Rph_{máx} igual a 0,5 h⁻¹, e de um período P₂, ao qual corresponde um valor de Rph_{min} de 0,3 h⁻¹. Além disso, os períodos devem ser escolhidos, de modo que P₁/P₂ seja igual a 0,2. Deste modo, conclui-se que o período P₁ deverá ter uma duração de 4h e que o período P₂ uma duração de 20h. A sua introdução no programa é apresentada na Figura 36.

Para submeter as várias zonas ao regime de ventilação criado, recorreu-se mais uma vez ao campo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*. Neste caso o parâmetro *Air changes per Hour* deve ser sempre igual a 1 h⁻¹, qualquer que seja o regime variável a considerar nas zonas térmicas.

Relativamente aos outros regimes propostos para o estudo, o procedimento a seguir foi exatamente igual.

Field	Units	Obj10
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	.5
Field 7	varies	Until:24:00
Field 8	varies	.3
Field 9	varies	

Figura 36 – Definição do regime variável RV1 no campo de seleção *Schedule:Compact*.

4.10. VARIÁVEIS DE SAÍDA

As variáveis de saída que se pretendem conhecer com a simulação da habitação modelada são: a temperatura interior, a humidade relativa interior e humidade relativa superficial interior.

Para a sua definição recorreu-se ao campo de seleção *Outputs*, tal como se evidencia na Figura 37.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Key Value		*	*	*
Variable Name		Zone/Sys Air Temperature	Zone Air Relative Humidity	HAMT Surface Interior Relative Humidity
Reporting Frequency		Hourly	Hourly	Hourly
Schedule Name				

Figura 37 – Definição dos dados de saída no campo *Outputs*.

5

APLICAÇÃO DOS MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE

5.1. ENQUADRAMENTO

Este capítulo surge com o objetivo de evidenciar as principais diferenças entre os modelos disponíveis no programa EnergyPlus, para o estudo da transferência de calor e humidade – Modelo CTF, modelo HAMT e modelo EMPD. Numa primeira fase, faz-se uma breve descrição dos modelos, referindo as suas principais características e os dados necessários para a sua correta aplicação no modelo em estudo. Numa segunda fase, são postos em prática os três modelos e analisa-se a sua influência no comportamento higrotérmico da habitação.

5.2. MODELO CTF

Conforme o exposto no ponto 4.2, referente aos parâmetros de simulação, para submeter o processo de simulação aos diferentes modelos de transferência de calor e humidade, recorre-se ao campo de seleção *HeatBalanceAlgorithm*.

O modelo que o EnergyPlus considera por defeito é o modelo CTF, mais correntemente conhecido por *Conduction Transfer Function*. Conforme já foi mencionado em pontos anteriores, este modelo despreza no seu cálculo a influência da humidade no comportamento dos diversos materiais existentes, tendo apenas em conta o mecanismo de transferência de calor sensível através dos mesmos. Deste modo, quando se utiliza o modelo CTF, o EnergyPlus apenas exige o conhecimento de três propriedades dos materiais, nomeadamente a sua *Condutibilidade térmica*, a sua *Massa Volúmica* e o seu *Calor específico*.

Para os materiais da habitação em estudo, essas propriedades encontram-se reunidas no Quadro 13 e podem ser introduzidas no programa, recorrendo-se ao campo de seleção *Material*, tal como se evidencia na Figura 38.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj11	Obj12	Obj15
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 Regu	poliestireno extru	cerâmica vidrada	madeira	caixa de ar
Roughness		VeryRough	Rough	Rough	VeryRough	Rough	Rough	Rough	MediumRough	Rough	Rough	Rough	MediumRough
Thickness	m	0,11	0,02	0,11	0,25	0,07	0,2	0,015	0,05	0,08	0,005	0,04	0,04
Conductivity	W/m·K	0,861	0,8	0,42	1,373	0,42	1,373	0,8	0,46	0,04	1,2	0,3	0,23
Density	kg/m ³	1788	1900	900	2104	900	2104	1900	1200	20	2000	685	1,3
Specific Heat	J/kg·K	868	850	850	776	850	776	850	850	1500	850	1500	1000
Thermal Absorptance		0,9	0,9	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	0,6	0,7
Visible Absorptance		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7

Figura 38 – Campo de seleção *Material*: Dados necessários à aplicação do Modelo CTF.

5.3. MODELO HAMT

Para aplicação do modelo HAMT é necessário selecionar-se a opção *Combined Heat And Moisture Finite Element* no campo *HeatBalanceAlgorithm*.

Contrariamente ao modelo CTF, o modelo HAMT trata-se de um modelo bastante completo e rigoroso, uma vez que tem em conta o efeito conjunto da transferência de calor e humidade através dos elementos construtivos. Desta forma, quando se implementa este modelo nas simulações, o EnergyPlus exige um conhecimento detalhado das propriedades dos materiais existentes, entre as quais as utilizadas pelo modelo CTF - *condutibilidade térmica*, *massa volúmica* e *calor específico*. Para além destas propriedades, o programa, neste caso, também impõe o conhecimento de características que evidenciem o comportamento dos diversos materiais face à humidade, nomeadamente:

- Curva de retenção de humidade;
- Teor de humidade inicial;
- Porosidade;
- Coeficiente de transferência de água líquida por sucção (função do teor de humidade do material);
- Coeficiente de transferência de água líquida de redistribuição (função do teor de humidade do material);
- Fator de resistência à difusão de vapor (função da humidade relativa);
- Condutibilidade térmica em função do teor de humidade do material;

Deste modo, será necessário recorrer-se não só ao campo *Material*, mas também aos seis campos de seleção, que se encontram devidamente definidos e caracterizados no ponto 2.2.3.3 da presente dissertação. Tendo em conta a informação descrita no ponto 4.4, referente à descrição dos materiais, foi então possível preencher os referidos campos, tal como se ilustra nas Figuras 39 a 44.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj4	Obj6	Obj9	Obj11
Material Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	betão 25 cm	poliestireno extru	cerâmica vidrada	madeira 4cm
Porosity	m ³ /m ³	0,35	0,24	0,22	0,98	0	0,72
Initial Water Content Ratio	kg/kg	0,001102	0,018421	0,039116	0,009	0	0,121606

Figura 39 – Campo de seleção *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Settings*.

Field	Units	Obj2	Obj4	Obj6	Obj9
Material Name		reboco 2 cm	betão 25 cm	poliestireno extru	cerâmica vidrada
Number of Isotherm Coordinates		9	7	8	1
Relative Humidity Fraction 1	dimensionless	0	0	0	0
Moisture Content 1	kg/m3	0	0	0	0
Relative Humidity Fraction 2	dimensionless	0,5	0,065	0,35	
Moisture Content 2	kg/m3	30	25,5	0,14	
Relative Humidity Fraction 3	dimensionless	0,8	0,113	0,5	
Moisture Content 3	kg/m3	45	29,6	0,16	
Relative Humidity Fraction 4	dimensionless	0,9	0,329	0,7	
Moisture Content 4	kg/m3	65	46,1	0,19	
Relative Humidity Fraction 5	dimensionless	0,99	0,582	0,8	
Moisture Content 5	kg/m3	95	80,1	0,21	
Relative Humidity Fraction 6	dimensionless	0,999	0,754	0,9	
Moisture Content 6	kg/m3	110	101	0,28	
Relative Humidity Fraction 7	dimensionless	0,9995	1	0,95	
Moisture Content 7	kg/m3	140	144	0,36	
Relative Humidity Fraction 8	dimensionless	0,9999		1	
Moisture Content 8	kg/m3	200		0,92	
Relative Humidity Fraction 9	dimensionless	1			
Moisture Content 9	kg/m3	210			

Figura 40 – Campo de seleção *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:SorptionIsotherm*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj4	Obj6	Obj9	Obj11
Material Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	betão 25 cm	poliestireno extru	cerâmica vidrada	madeira 4cm
Number of Suction points		3	3	3	1	1	3
Moisture Content 1	kg/m3	0	0	0	0	0	0
Liquid Transport Coefficient 1	m2/s	0	0	0	0	0	0
Moisture Content 2	kg/m3	2,4	45	101			20
Liquid Transport Coefficient 2	m2/s	0,0000000032	0,000000000001	0,00000000036			3,60000000E-12
Moisture Content 3	kg/m3	257	210	144			500
Liquid Transport Coefficient 3	m2/s	0,000003	0,000000000024	0,0000000029			0,00000000088

Figura 41 – Campo de seleção *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Suction*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj4	Obj6	Obj9	Obj11
Material Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	betão 25 cm	poliestireno extru	cerâmica vidrada	madeira 4cm
Number of Redistribution points		3	3	3	1	1	3
Moisture Content 1	kg/m3	0	0	0	0	0	0
Liquid Transport Coefficient 1	m2/s	0	0	0	0	0	0
Moisture Content 2	kg/m3	2,4	45	101			20
Liquid Transport Coefficient 2	m2/s	0,0000000006	0,000000000001	5E-18			3,60000000E-12
Moisture Content 3	kg/m3	257	210	144			500
Liquid Transport Coefficient 3	m2/s	0,0000005	0,000000000024	5E-16			0,00000000088

Figura 42 – Campo de seleção *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Redistribution*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj4	Obj6	Obj9	Obj11
Material Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	betão 25 cm	poliestireno extru	cerâmica vidrada	madeira 4cm
Number of Data Pairs		2	2	2	2	2	2
Relative Humidity Fraction 1	dimensionless	0	0	0	0	0	0
Water Vapor Diffusion Resistance Factor 1	dimensionless	13	25	76	125	300	8
Relative Humidity Fraction 2	dimensionless	1	1	1	1	1	1
Water Vapor Diffusion Resistance Factor 2	dimensionless	13	25	76	125	300	8

Figura 43 – Campo de seleção *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Diffusion*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj4	Obj6	Obj9	Obj11	Obj12
Material Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	betão 25 cm	poliestireno extru	cerâmica vidrada	madeira 4cm	Tijolo Vazado 11
Number of Thermal Coordinates		2	2	2	1	1	2	1
Moisture Content 1	kg/m3	0	0	0	0	0	0	0
Thermal Conductivity 1	W/m-K	0,861	0,8	1,373	0,04	1,2	0,3	0,42
Moisture Content 2	kg/m3	350	240	220			720	
Thermal Conductivity 2	W/m-K	2,209	1,608	2,522			0,71	

Figura 44 – Campo de seleção *MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:ThermalConductivity*.

5.4. MODELO EMPD

Quando se pretende que o processo de simulação aplique o modelo simplificado EMPD, deve seleccionar-se a opção *Moisture Penetration Depth Conduction Transfer Function*.

Conforme já foi mencionado no ponto 2.2.3.4, o modelo EMPD permite simular a adsorção e desadsorção de vapor de água à superfície das paredes, sendo que todo esse mecanismo é concentrado apenas numa camada superficial, de espessura δ_M , do material que se considera determinante para a inércia higroscópica.

Deste modo, para a aplicação do modelo EMPD exige-se:

- A caracterização de todos os materiais existentes, no que diz respeito à sua condutibilidade térmica, à sua massa volúmica e ao seu calor específico (Campo de seleção *Material*);
- A quantificação do valor da espessura δ_M e dos coeficientes a , b , c e d da equação da curva de adsorção do material higroscópico (Campo *MaterialProperty: Moisture Penetration Depth: Settings*);

No caso em estudo é essencialmente o reboco interior que contribui para a inércia higroscópica. Por isso apenas se caracterizou detalhadamente esse material.

Relativamente à caracterização dos materiais existentes, toda a informação é ilustrada na Figura 45.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj11	Obj12
Name		Tijolo Face à vista	reboco 2 cm	betão 20 cm	reboco 1.5 cm	camada Regul	poliestireno extru	cerâmica vidrada	madeira 4cm
Roughness		VeryRough	Rough	Rough	Rough	Rough	MediumRough	Rough	Rough
Thickness	m	0,11	0,02	0,2	0,015	0,05	0,08	0,005	0,04
Conductivity	W/m-K	0,861	0,8	1,373	0,8	0,46	0,04	1,2	0,3
Density	kg/m3	1788	1900	2104	1900	1200	20	2000	685
Specific Heat	J/kg-K	868	850	776	850	850	1500	850	1500
Thermal Absorptance		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
Visible Absorptance		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Figura 45 – Método EMPD: Caracterização dos materiais.

No que diz respeito ao material reboco foi ainda necessário quantificar os coeficientes a , b , c e d e o valor da espessura δ_M . Ajustando os valores da curva de adsorção higroscópica do reboco à equação (20) facilmente se identificaram os coeficientes pretendidos (Figura 46).

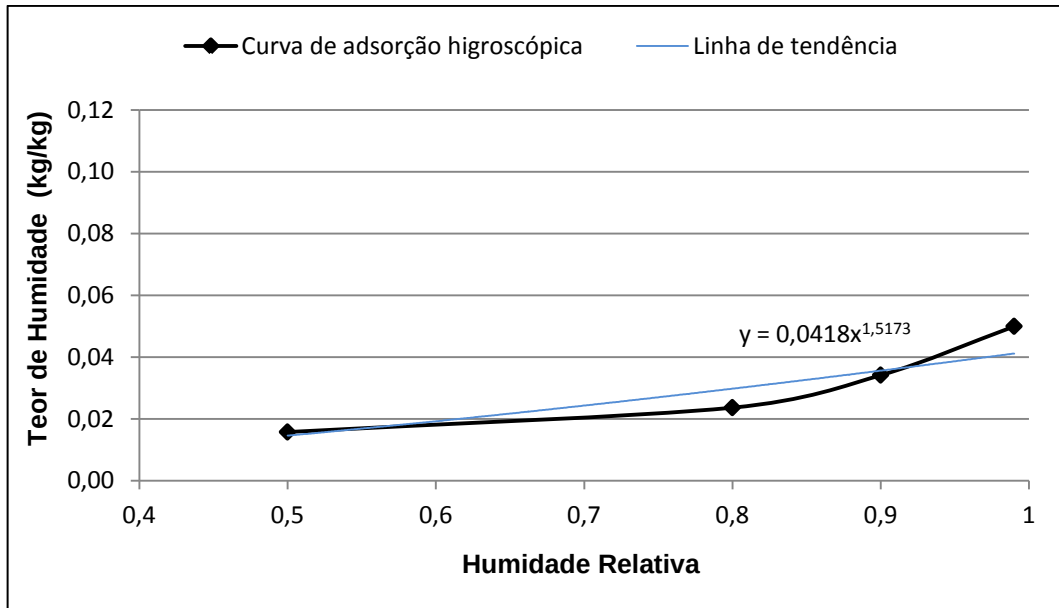


Figura 46 – Ajuste da curva de adsorção higroscópica do reboco interior.

De acordo com o ajuste realizado, os coeficientes assumem os seguintes valores: $a = 0,0418$, $b = 1,5173$, $c = 0$ e $d = 1$.

Relativamente ao valor da espessura δ_M , para a sua quantificação recorreu-se à equação (24). Deste modo, reúnem-se no Quadro 28 todos os parâmetros considerados para a sua utilização.

Quadro 28 – Cálculo de δ_M .

δ_{reboco}		
$\mu_{\text{reboco}} = 25$ [Valor fornecido no Quadro 24]	$\mu = \frac{\delta_{\text{ar}}}{\delta_{\text{reboco}}} \Leftrightarrow \delta_{\text{reboco}} = 7,6 \times 10^{-12} \text{ kg/(m.s.Pa)}$	
$\delta_{\text{ar}} = 190 \times 10^{-12} \text{ Kg/(m.s.Pa)}$ [7]		
P_{sat}		
Considerando uma $T = 23^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Equação (2) $\Rightarrow P_{\text{sat}} = 2814,63 \text{ Pa}$		
t_p		
Ciclo diário de variação da humidade $\Rightarrow t_p = (24 \times 3600) \text{ s}$		
ρ_{reboco}		
$\rho_{\text{reboco}} = 1900 \text{ kg/m}^3$ [Valor fornecido no Quadro 11]		
ξ		
$\xi = [\partial y / \partial x]_{x=0,65} = [0,06342314 x^{0,5173}]_{x=0,65} = 0,050754$		
δ_M		
Aplicando a Equação (24) $\Rightarrow \delta_M = 2,5 \text{ mm}$		

Reunidos todos os dados necessários para a aplicação do modelo EMPD, recorreu-se ao campo de seleção *MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings* e procedeu-se à inserção dos dados (Figura 47).

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		reboco 2 cm ▾	reboco 1.5 cm
Moisture Penetration Depth	m	0,0025	0,0025
Moisture Equation Coefficient a	dimensionless	0,0418	0,0418
Moisture Equation Coefficient b	dimensionless	1,5173	1,5173
Moisture Equation Coefficient c	dimensionless	0	0
Moisture Equation Coefficient d	dimensionless	1	1

Figura 47 – Campo de seleção *MaterialProperty:MoisturePenetrationDepth:Settings*.

Uma vez que o modelo EMPD concentra todo o seu cálculo na camada superficial de reboco, é de esperar que os resultados das simulações sejam bastante sensíveis ao valor da sua espessura δ_M . Desta forma, decidiu-se simular a habitação, não só para o valor esperado de 2,5 mm, mas também para um valor de 4mm, em que se admite uma maior adsorção por parte do material higroscópico.

5.5. COMPARAÇÃO DOS MODELOS

Conhecidos os três modelos disponíveis no EnergyPlus e o tipo de dados que cada um requer nos seus cálculos, realizaram-se três simulações, variando apenas o respetivo modelo. Relativamente ao modelo EMPD, conforme foi estabelecido no ponto anterior, foram ainda considerados dois casos distintos: um primeiro (*EMPD1*), associado a um valor de δ_M igual a 2,5 mm, e um segundo (*EMPD2*), referente a um valor de δ_M igual a 4 mm.

Com isso pretendeu-se avaliar a temperatura interior (T_{int}) e a temperatura ponto de orvalho interior ($T_{po,int}$) de cada uma das zonas da habitação.

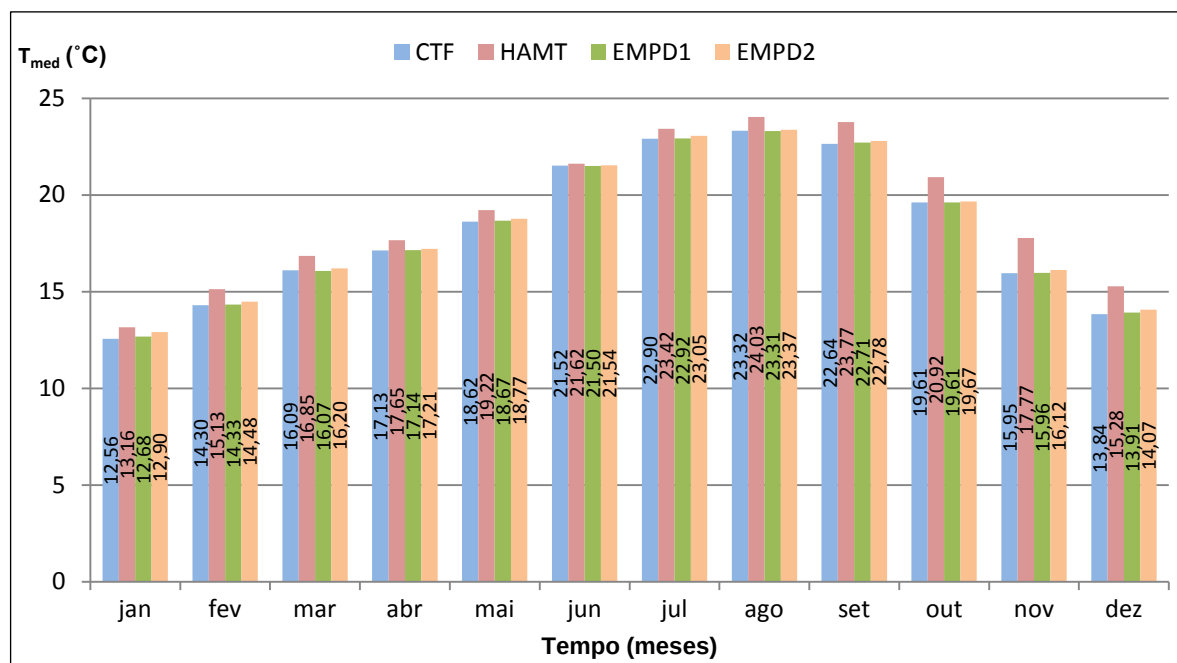
No que diz respeito à ventilação definida para esta análise comparativa, considerou-se que a habitação estaria submetida a um regime de ventilação contínuo ao longo do dia de 1 h^{-1} .

Após a aplicação de cada um dos modelos à habitação, verificou-se que o comportamento de cada uma das zonas era bastante semelhante. Por essa razão, decidiu-se restringir toda a análise à Zona 4 (Quarto), à qual está associada o maior período de ocupação.

A primeira variável analisada foi a temperatura interior do Quarto. Para ser possível perceber a influência de cada um dos modelos no seu valor, foi efetuada uma análise mensal, através da definição de alguns indicadores estatísticos, nomeadamente:

- O valor médio da temperatura - T_{med} ;
- A temperatura correspondente ao percentil 10 - T_{10} ;
- A temperatura correspondente ao percentil 90 - T_{90} ;

Deste modo, foi possível confrontar os três modelos de cálculo, tal como se ilustra nas Figuras 48, 49 e 50.

Figura 48 – Análise mensal da T_{med} no Quarto.

Através da Figura 48, verifica-se que a temperatura interior tende a aumentar nos meses mais quentes e a decrescer nos meses mais frios, independentemente do modelo considerado nas simulações. No entanto, confrontando os vários modelos observa-se uma grande aproximação entre as temperaturas obtidas a partir dos modelos CTF e EMPD. Relativamente ao modelo HAMT, registam-se valores médios ligeiramente superiores aos obtidos através dos outros modelos, destacando-se em novembro a diferença mais significativa, de aproximadamente 1,8°C.

No entanto, para um estudo mais rigoroso dos valores registados em cada um dos modelos, calcularam-se os percentis 10 e 90 para cada um dos meses do ano, tendo-se verificado mais uma vez uma ligeira discrepância entre as temperaturas obtidas com o modelo HAMT e com os modelos CTF e EMPD (Figuras 49 e 50). De facto, com a utilização do modelo HAMT, 80% dos valores registados em quase todos meses do ano situam-se num intervalo de valores superior, como é o caso do mês de outubro, em que se verifica que:

- Quando se utiliza o modelo CTF, 80% das temperaturas registadas situam-se entre $T_{10}=17,32^{\circ}\text{C}$ e $T_{90}=21,87^{\circ}\text{C}$;
- Quando se utiliza o modelo EMPD1, 80% das temperaturas registadas situam-se entre $T_{10}=17,45^{\circ}\text{C}$ e $T_{90}=21,73^{\circ}\text{C}$;
- Quando se utiliza o modelo EMPD2, 80% das temperaturas registadas situam-se entre $T_{10}=17,60^{\circ}\text{C}$ e $T_{90}=21,78^{\circ}\text{C}$;
- Quando se utiliza o modelo HAMT, 80% das temperaturas registadas situam-se entre $T_{10}=19,46^{\circ}\text{C}$ e $T_{90}=22,52^{\circ}\text{C}$;

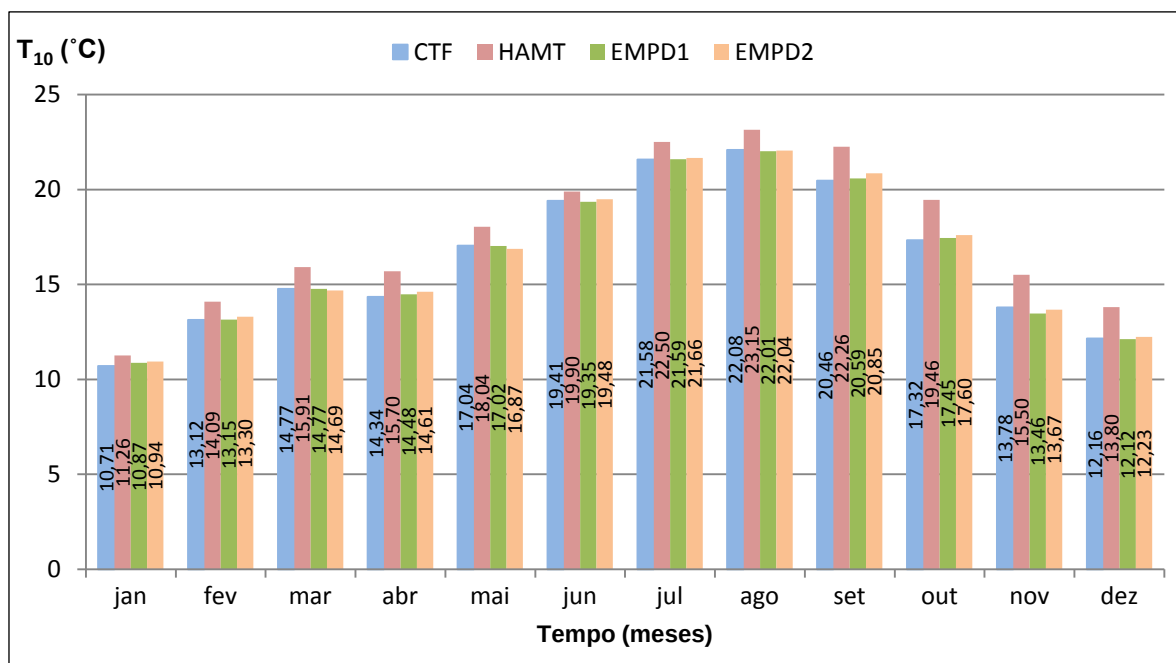


Figura 49 – Análise mensal da T_{10} no Quarto.

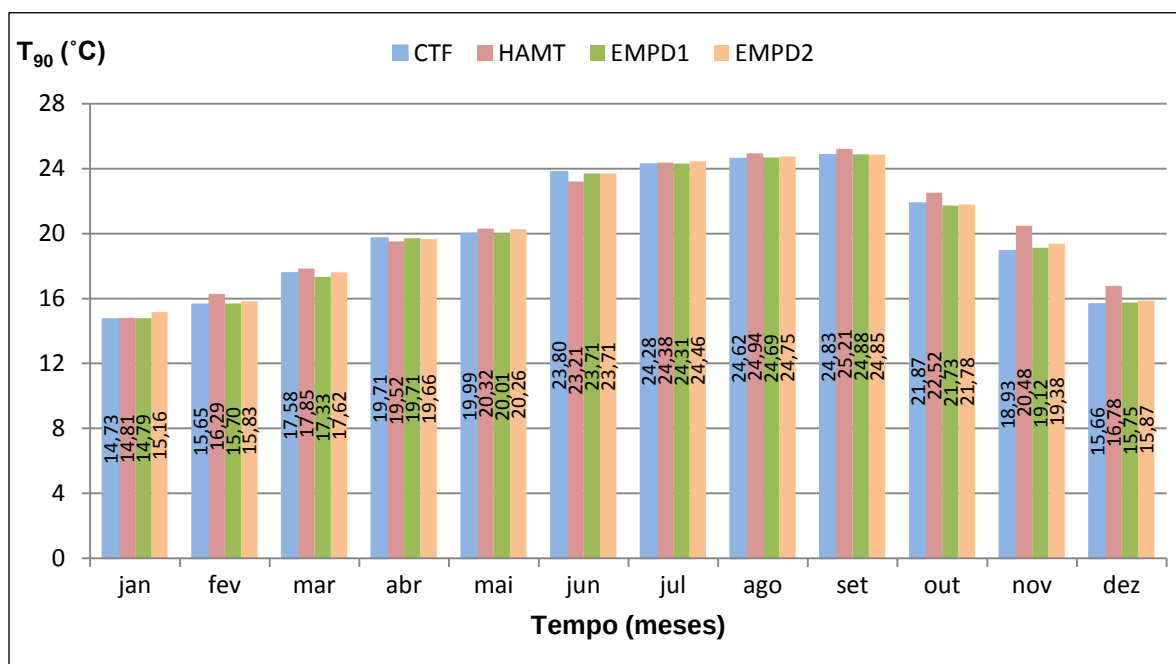


Figura 50 – Análise mensal da T_{90} no Quarto.

Contrariamente aos modelos CTF e EMPD, em que a transferência de calor é apenas associada a trocas de calor sensível, o modelo HAMT tem em conta também as trocas de calor latente, associadas à transferência de humidade. Deste modo, é plausível considerar que as temperaturas registadas no modelo HAMT possam estar associadas ao contributo destas trocas de calor.

Para uma melhor percepção das diferenças existentes entre as temperaturas registadas com o modelo HAMT e com os modelos CTF e EMPD, decidiu-se seleccionar dois períodos distintos do ano: Um primeiro período em que as temperaturas se aproximassem nos três modelos e, um segundo período em que a diferença entre os valores registados fosse mais significativa. Relativamente ao primeiro caso, seleccionou-se o período de 27 a 31 de maio, tal como se evidencia na Figura 51.

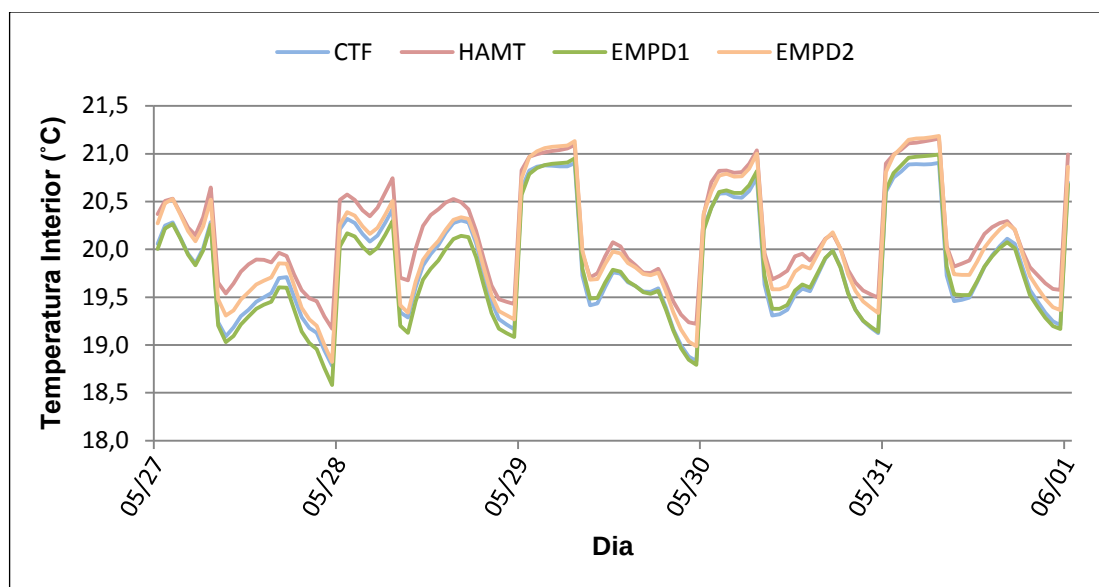


Figura 51 – Temperatura registada no Quarto entre o dia 27 e 31 de maio.

No segundo caso, optou-se por seleccionar um período representativo de outubro, onde a diferença entre as temperaturas registadas nos três modelos pode atingir os 3°C (Figura 52).

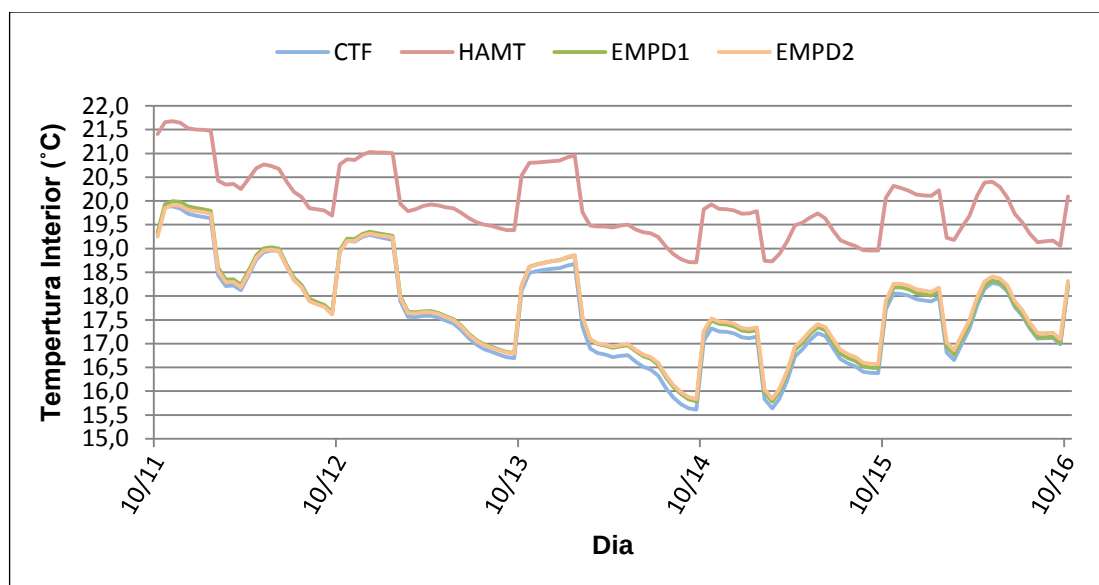


Figura 52 – Temperatura registada no Quarto entre o dia 11 e 15 de outubro.

Analogamente à temperatura interior, também a temperatura ponto de orvalho interior foi analisada segundo indicadores estatísticos. Em termos médios (Figura 53), verifica-se que a $T_{po,int}$ tende a crescer nos meses mais quentes e a diminuir nos meses mais frios, tal como ocorria com a temperatura interior.

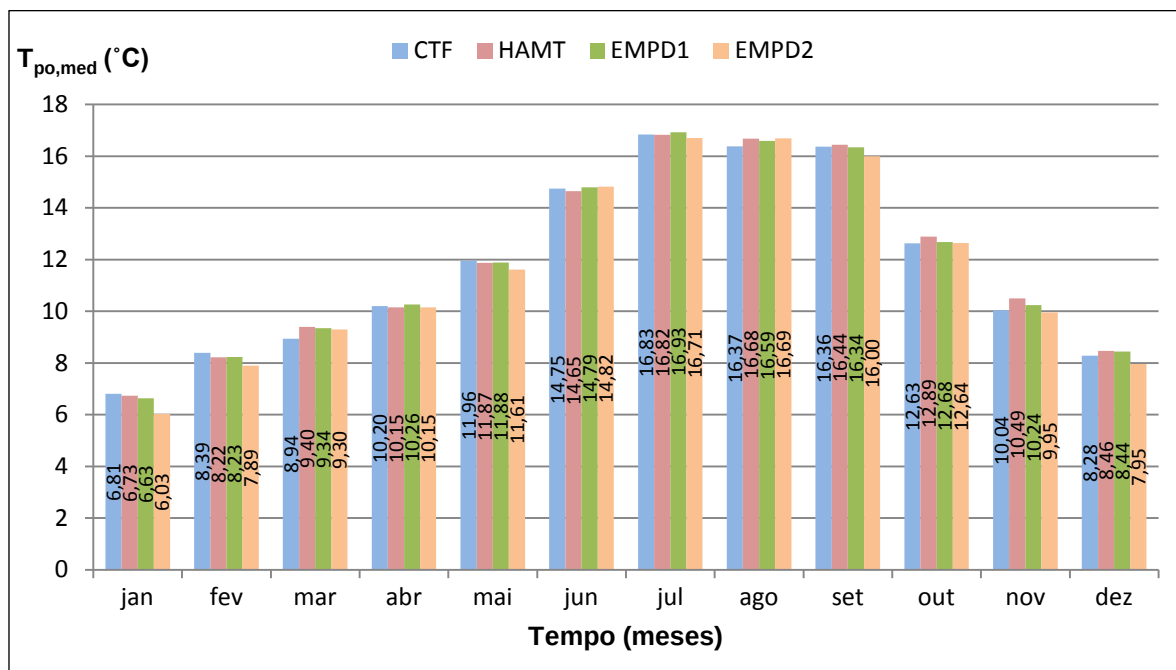


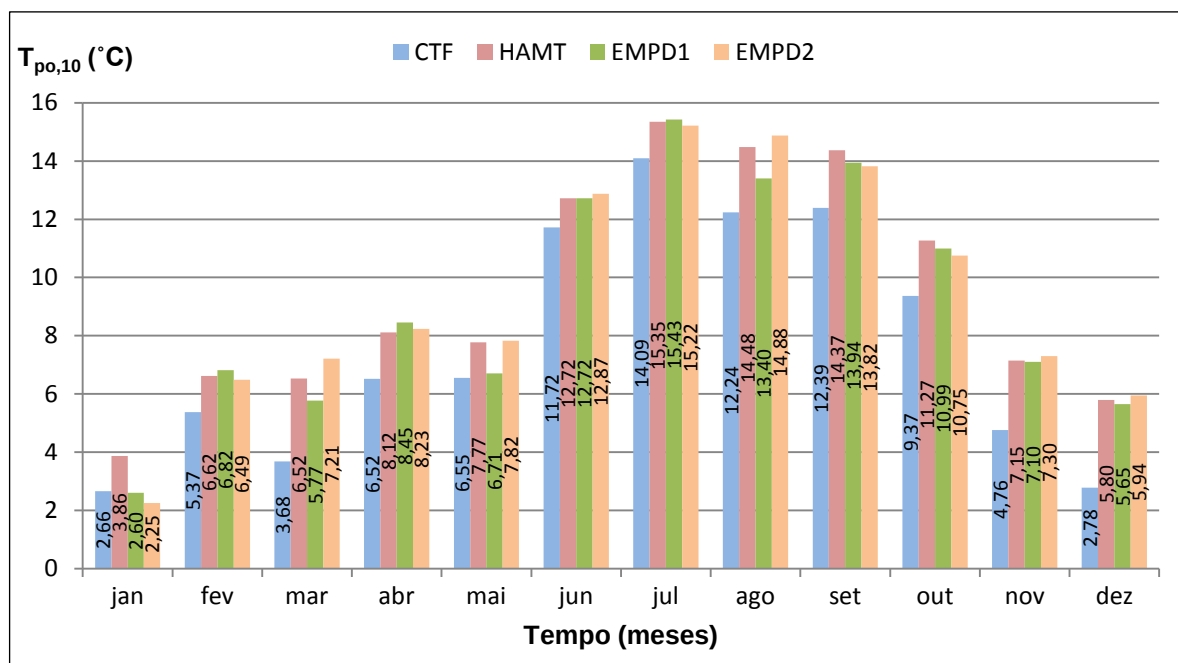
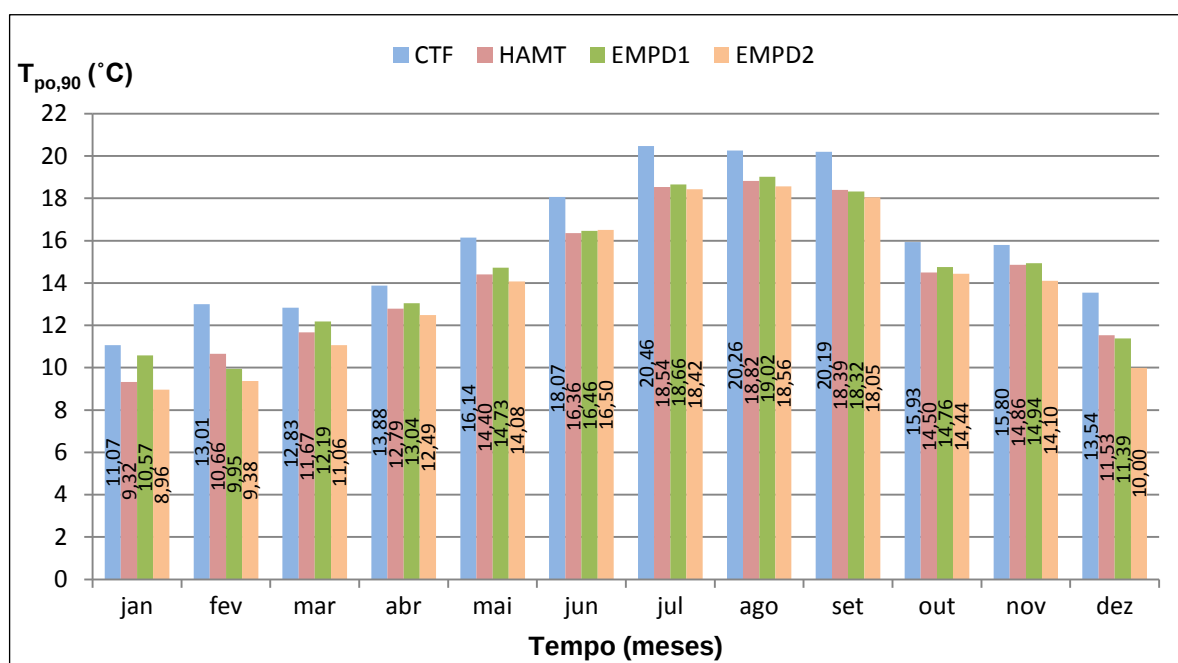
Figura 53 – Análise mensal da $T_{po,med}$ no Quarto.

Relativamente aos percentis 10 e 90, apresentam-se os seus valores nas Figuras 54 e 55, respetivamente.

Para o caso em que o reboco higroscópico assume uma maior capacidade de adsorção (EMPD2), verifica-se uma aproximação entre os valores obtidos nos modelos HAMT e EMPD2, já que 80% das temperaturas registadas mensalmente para ambos os modelos se situam num intervalo de valores semelhante. No entanto, quando se assume uma pequena espessura para a camada de adsorção, tal como se considera no caso EMPD1, as temperaturas registadas situam-se num intervalo de valores ligeiramente diferente do modelo HAMT. Para uma melhor perceção destas situações, analisam-se, de seguida, os valores obtidos para o mês de agosto:

- Para o modelo HAMT, 80% dos valores registados situam-se entre $T_{po,10}=14,48^{\circ}\text{C}$ e $T_{po,90}=18,82^{\circ}\text{C}$;
- Para o modelo EMPD2, 80% das temperaturas registadas situam-se entre $T_{po,10}=14,88^{\circ}\text{C}$ e $T_{po,90}=18,56^{\circ}\text{C}$;
- Para o modelo EMPD1, 80% dos valores registados situam-se entre $T_{po,10}=13,40^{\circ}\text{C}$ e $T_{po,90}=19,02^{\circ}\text{C}$;

Relativamente ao modelo CTF, a maioria das temperaturas registadas situa-se numa faixa de valores bastante mais alargada, quando comparada com os outros modelos. De facto, para o mês de agosto, 80% dos resultados situam-se entre $T_{po,10}=9,37^{\circ}\text{C}$ e $T_{po,90}=15,93^{\circ}\text{C}$.

Figura 54 – Análise mensal da $T_{po,10}$ no Quarto.Figura 55 – Análise mensal da $T_{po,90}$ no Quarto.

A diferença de valores registada para o modelo CTF poderá ser explicada pelo facto de não ser considerado o mecanismo de transferência de humidade. Deste modo, não é admitida a adsorção de vapor pelos materiais e os valores da humidade relativa interior atingem valores extremos.

Para evidenciar esta situação, considerou-se um período em que se registassem humidades relativas extremas e traçou-se o comportamento da HR_{int} e da $T_{po,int}$, tal como se evidencia nas Figuras 56 e 57.

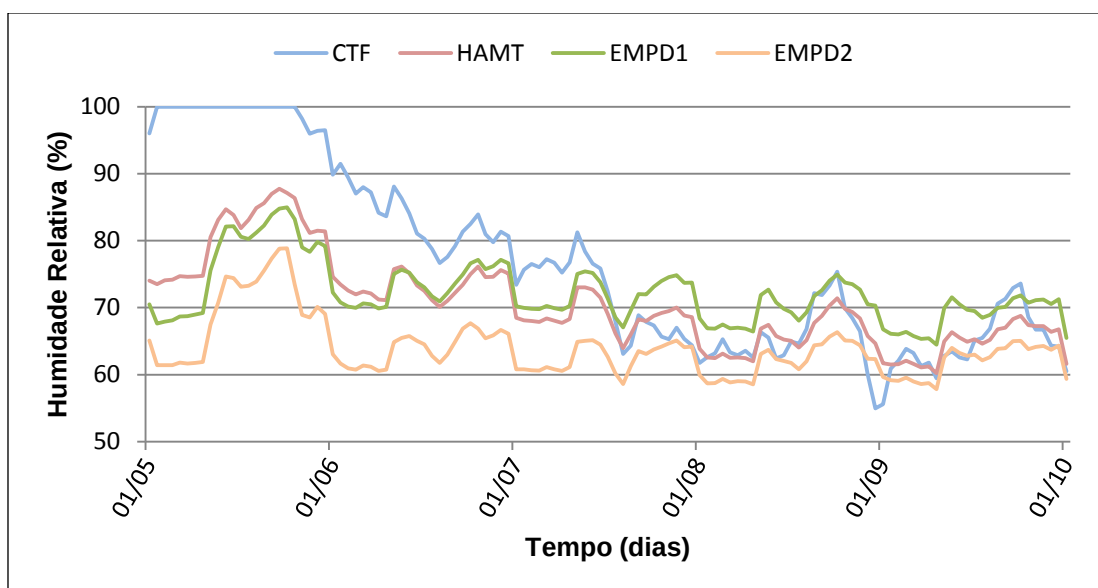


Figura 56 – Humidade relativa registada no Quarto entre o dia 5 e 9 de janeiro.

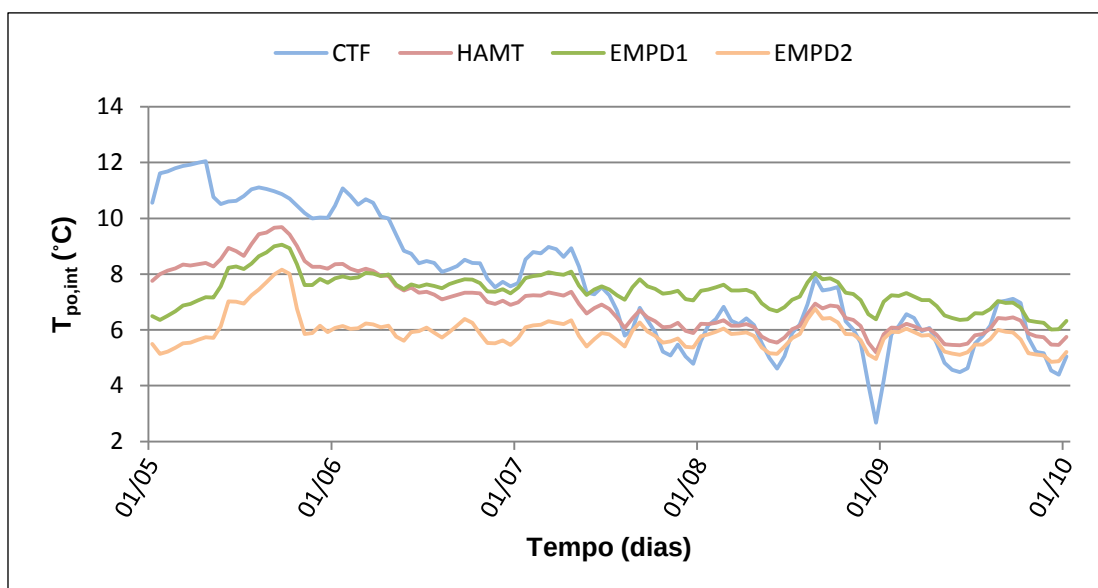


Figura 57 – Temperatura ponto de orvalho registada no Quarto entre o dia 5 e 9 de janeiro.

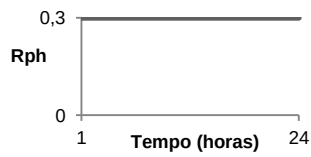
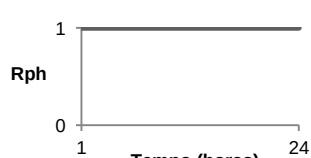
6

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

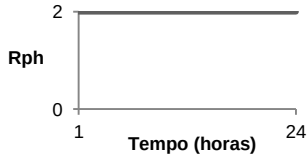
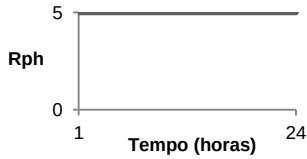
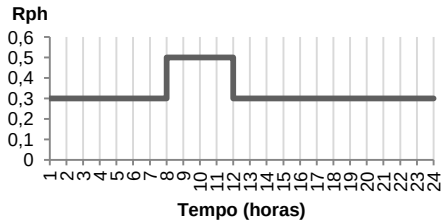
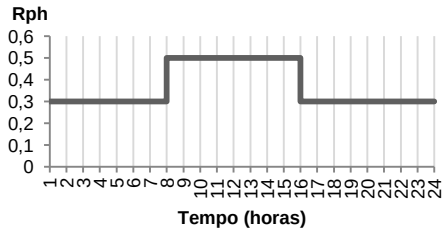
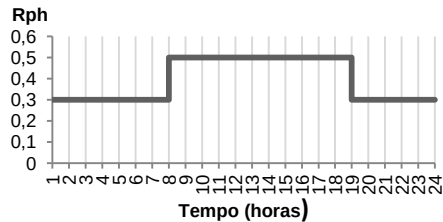
6.1. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

Para avaliar o comportamento higrotérmico da habitação face aos diversos regimes de ventilação definidos, foi necessário dar início ao processo de simulação. Para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido nesta fase, descreveram-se todas as simulações realizadas nos Quadros 27, 28, 29 e 30.

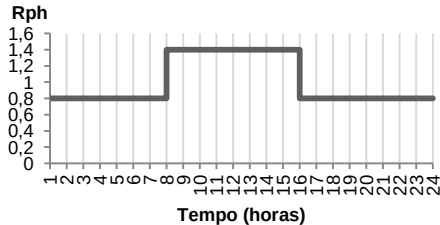
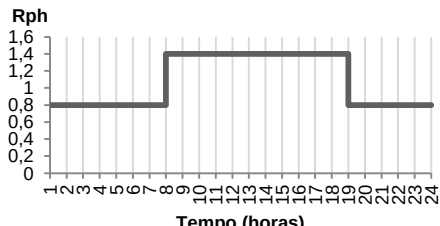
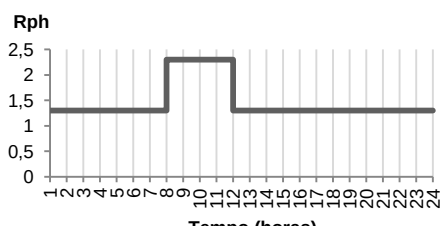
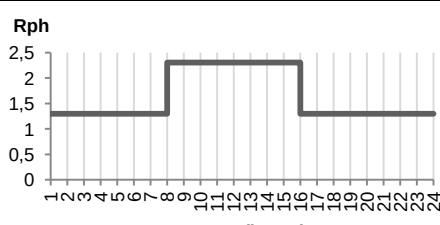
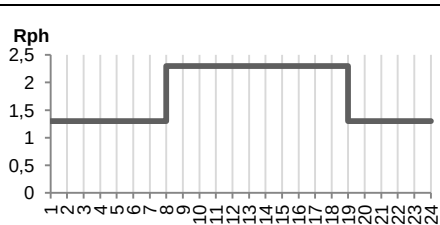
Quadro 29 – Simulações realizadas na habitação.

Simulação	Regime de ventilação implementado na habitação	$Rph_{min} (h^{-1})$	$Rph_{máx} (h^{-1})$	Horário da ventilação ao longo do dia
1	Constante	0,3	0,3	
2	Constante	0,6	0,6	
3	Constante	1	1	

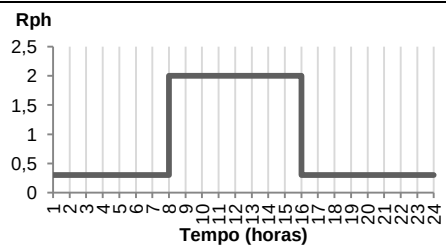
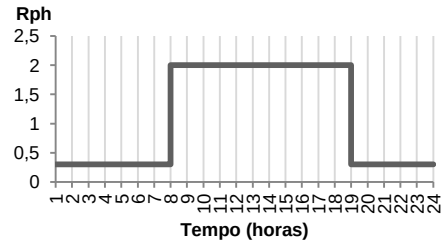
Quadro 30 – Simulações realizadas na habitação.

Simulação	Regime de ventilação implementado na habitação	$R_{ph_{min}} (h^{-1})$	$R_{ph_{máx}} (h^{-1})$	Horário da ventilação ao longo do dia
4	Constante	2	2	
5	Constante	5	5	
6	Variável (RV1)	0,3	0,5	
7	Variável (RV2)	0,3	0,5	
8	Variável (RV3)	0,3	0,5	
9	Variável (RV4)	0,8	1,4	

Quadro 31 – Simulações realizadas na habitação.

Simulação	Regime de ventilação implementado na habitação	$Rph_{min} (h^{-1})$	$Rph_{máx} (h^{-1})$	Horário da ventilação ao longo do dia
10	Variável (RV5)	0,8	1,4	
11	Variável (RV6)	0,8	1,4	
12	Variável (RV7)	1,3	2,3	
13	Variável (RV8)	1,3	2,3	
14	Variável (RV9)	1,3	2,3	

Quadro 32 – Simulações realizadas na habitação.

Simulação	Regime de ventilação implementado na habitação	$R_{ph_{min}}$ (h^{-1})	$R_{ph_{máx}}$ (h^{-1})	Horário da ventilação ao longo do dia
15	Variável (RV10)	0,3	2	
16	Variável (RV11)	0,3	2	
17	Variável (RV12)	0,3	2	

6.2. COMPORTAMENTO TIPO DA HABITAÇÃO

Para ser possível ter uma primeira noção do comportamento higrotérmico da habitação face a um determinado regime de ventilação, analisou-se os resultados para uma taxa de renovação horária igual a $1 h^{-1}$. Deste modo, foi possível avaliar para cada uma das zonas térmicas a respetiva temperatura e humidade relativa interior.

Em qualquer uma das zonas consideradas a temperatura interior tende a crescer nos meses mais quentes e a diminuir nos meses mais frios, tal como se evidencia na Figura 58, para as zonas 1, 2, 3 e 4.

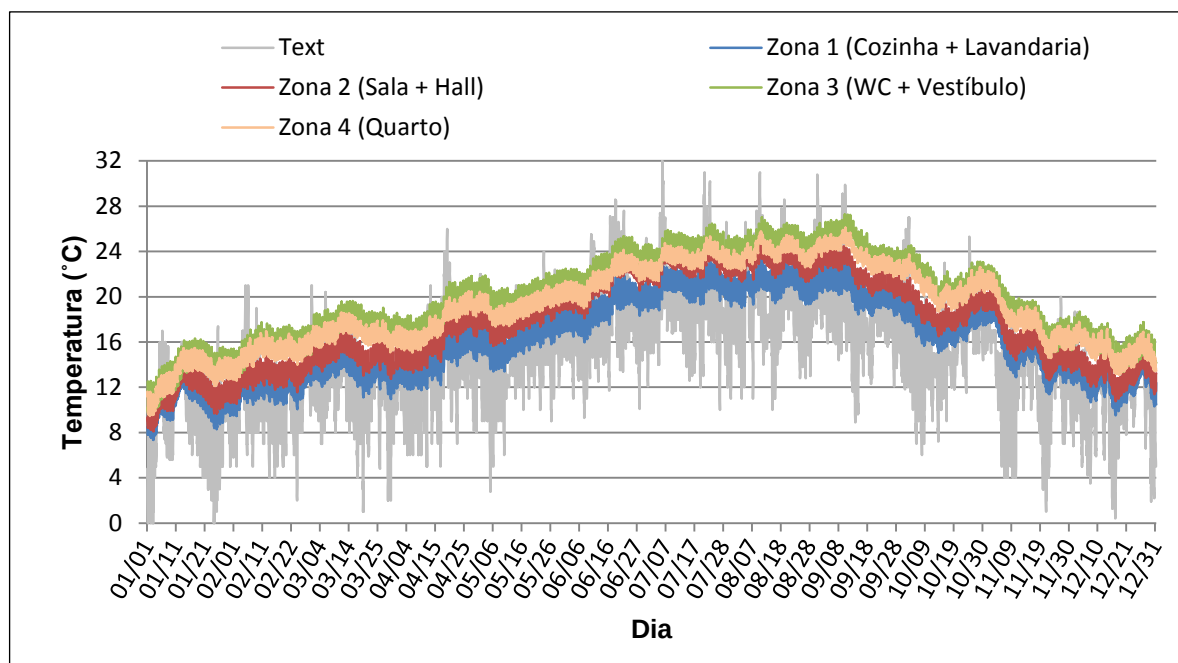


Figura 58 – Temperatura no interior da habitação ao longo do ano.

Através da Figura 58, é evidente a influência da temperatura exterior nas temperaturas registadas no interior da habitação, já que os seus comportamentos ao longo do ano são bastante semelhantes.

Analogamente à temperatura, também a humidade relativa interior varia de modo semelhante em todas as zonas térmicas, verificando-se mais uma vez a influência das condições exteriores nos valores registados. Nos meses mais frios verifica-se uma oscilação significativa do seu valor e atingem-se valores bastante elevados. No que diz respeito aos meses mais quentes, a amplitude de oscilação é menor e a humidade relativa interior assume um comportamento mais estável, quando comparada com os meses mais frios. Devido à grande oscilação dos valores da humidade relativa torna-se pouco perceptível se representarmos as quatro zonas em simultâneo. Deste modo, evidencia-se o seu comportamento apenas no Quarto (Figura 59).

O comportamento descrito para a humidade relativa interior torna-se mais evidente quando a análise se centra por exemplo nos meses de janeiro e agosto. Assim, enquanto em janeiro se registam humidades no Quarto entre os 50% e 90%, no mês de agosto registam-se valores entre os 45% e 75% (Figuras 60 e 61). O mesmo se pode verificar em outras zonas da habitação, como é o caso da Zona 1, onde em janeiro são registadas humidades relativas entre os 50% e os 90%, e em agosto valores entre os 55% e os 85% (Figuras 62 e 63).

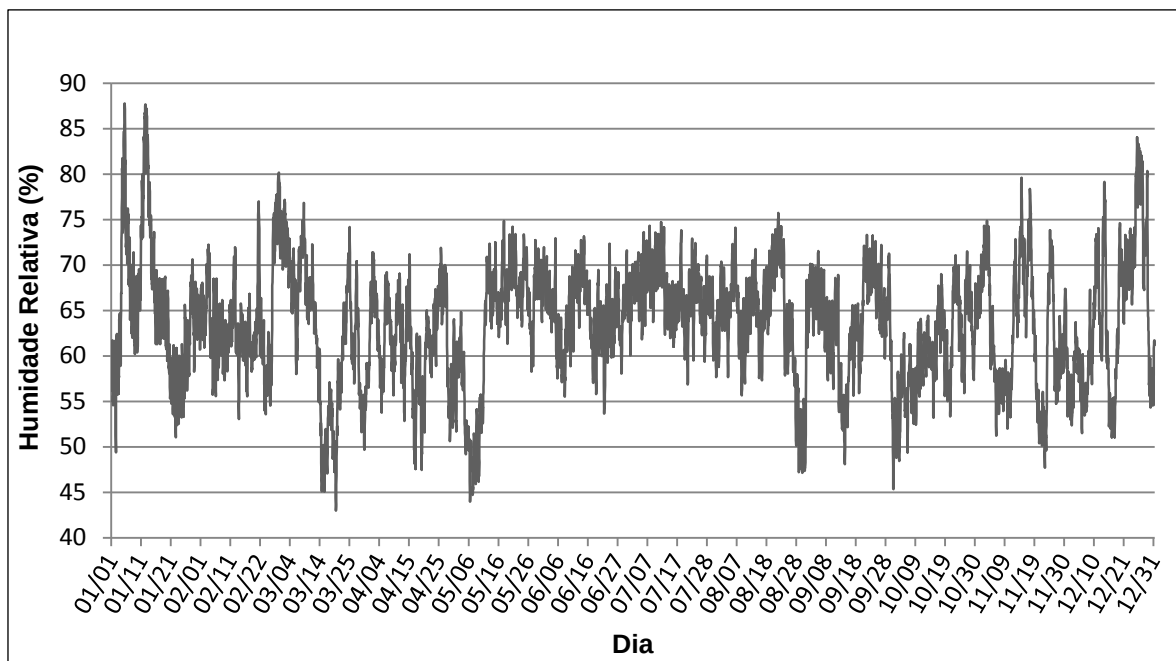


Figura 59 – Humidade relativa registada na Zona 4 (Quarto) durante o período de simulação.

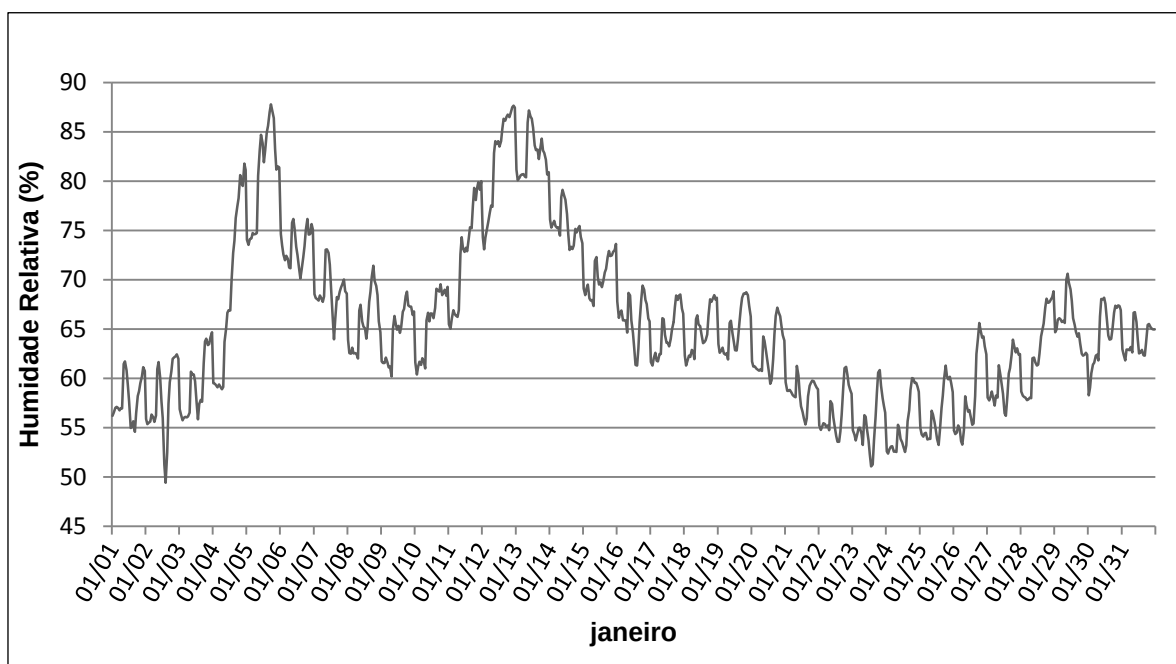


Figura 60 – Humidade relativa na Zona 4 (Quarto): janeiro.

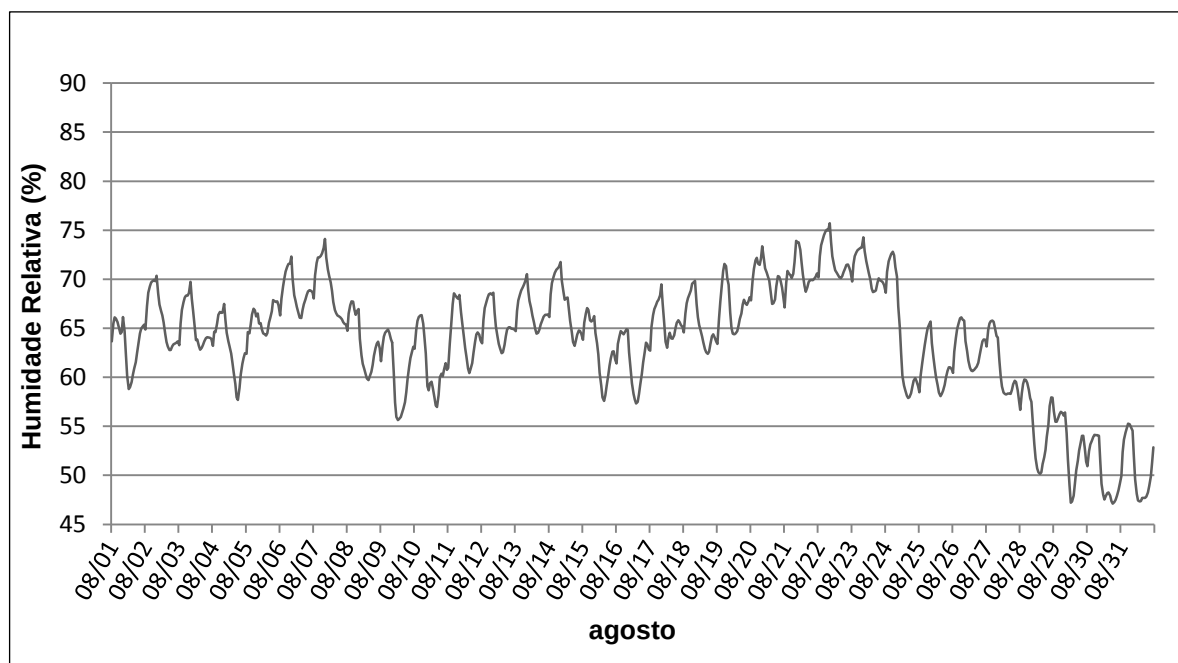


Figura 61 – Humidade relativa na Zona 4 (Quarto): agosto.

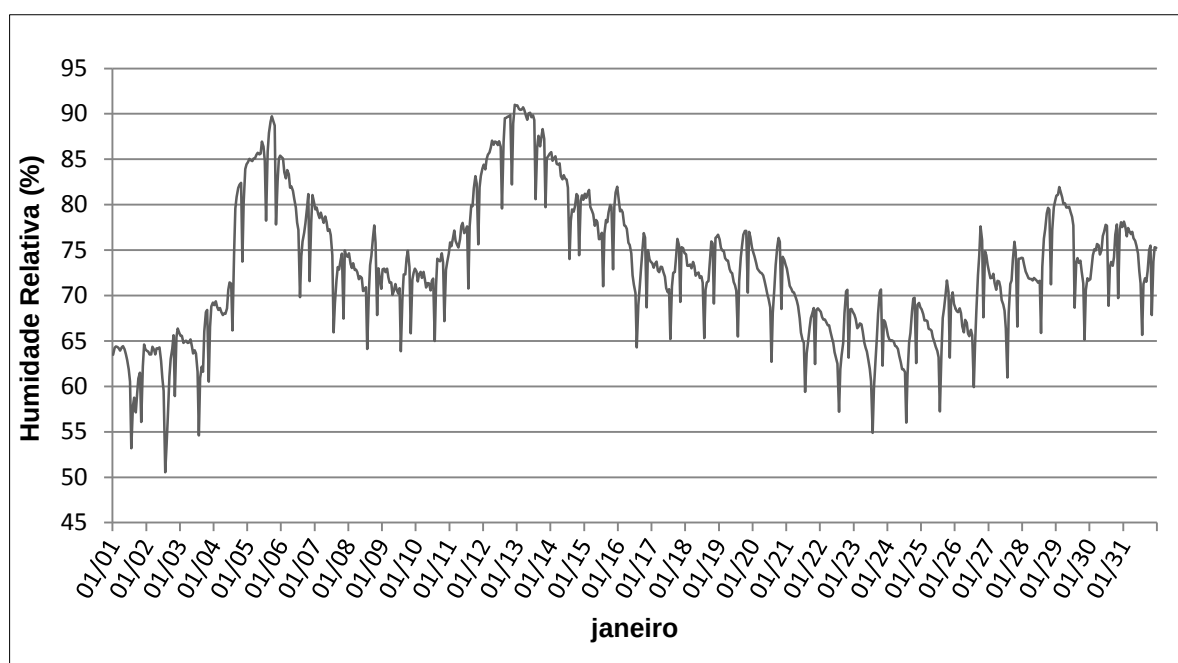


Figura 62 – Humidade relativa na Zona 1 (Cozinha + Lavandaria): janeiro.

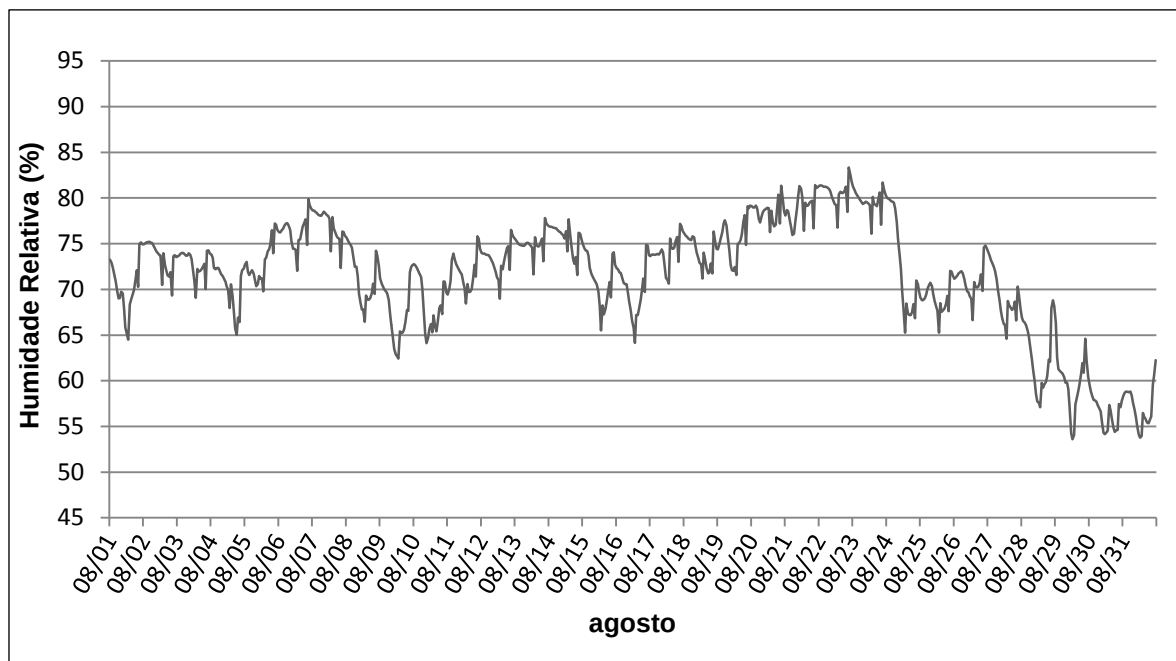


Figura 63 – Humidade relativa na Zona 1 (Cozinha + Lavandaria): agosto.

Apesar da temperatura e da humidade relativa evidenciarem o mesmo tipo de comportamento nas quatro zonas térmicas, os seus valores variam de zona para zona. Uma vez que foi considerado o mesmo nível de atividade (atividade sedentária) e o mesmo regime de ventilação em todas as zonas térmicas, a diferença entre os valores registados para cada um dos compartimentos no que diz respeito a temperatura e humidade relativa poderá ser devida ao efeito conjugado de diversos fatores, tais como:

- 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;

6.3. REGIME DE VENTILAÇÃO CONSTANTE

6.3.1. ENQUADRAMENTO

A ventilação assume um papel preponderante no comportamento higrotérmico das habitações, constituindo, no período de inverno, um importante meio de redução das condensações que ocorrem na face interior dos elementos de construção (condensações superficiais).

No que diz respeito ao período de aquecimento, como a diferença entre a temperatura interior e exterior é bastante pequena, o impacto da ventilação nas condições interiores, especialmente no arrefecimento do ar interior, também é reduzido.

No caso em estudo, analisou-se em detalhe a ventilação de inverno e o seu impacto no desempenho higrotérmico da habitação.

6.3.2. TEMPERATURA INTERIOR

Conforme o estabelecido nos Quadros 27 e 28, a habitação foi submetida a cinco diferentes regimes de ventilação constante, tendo-se obtido para cada um deles um determinado desempenho interior. No que diz respeito à temperatura interior, evidencia-se na Figura 64 o seu comportamento para a Zona 4 (Quarto).

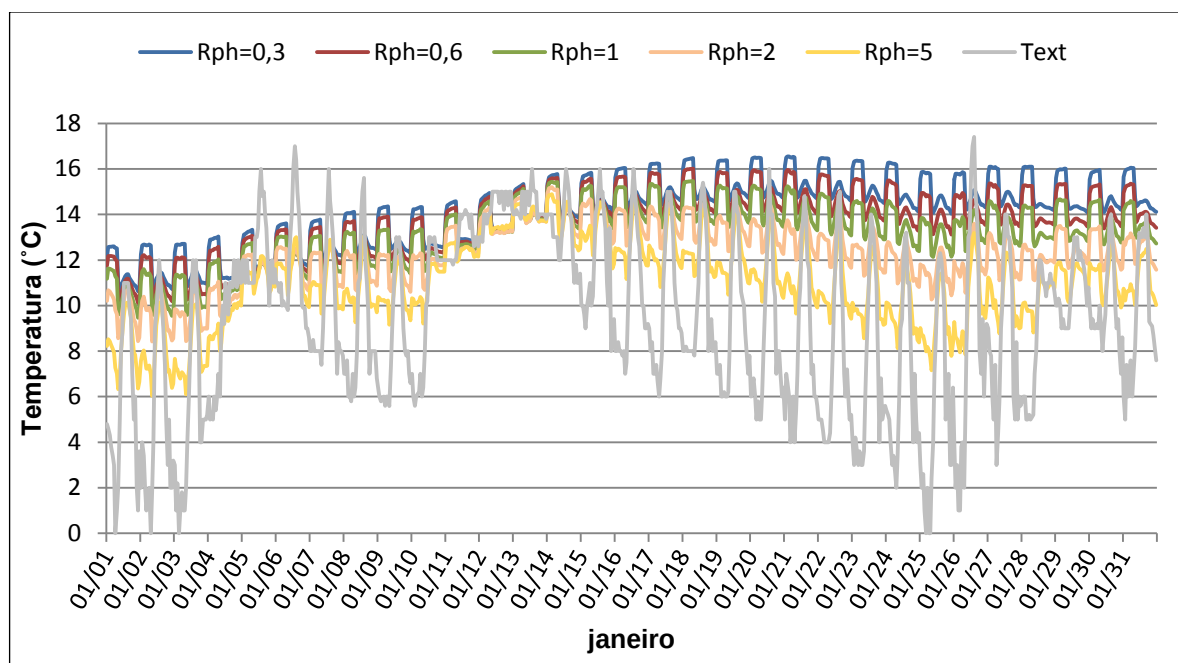


Figura 64 – Temperaturas registadas no Quarto para as diversas taxas de renovação horária: janeiro.

De acordo com a Figura 64, à medida que se aumenta a taxa de renovação horária no interior da habitação, maior é a influência do ambiente exterior na temperatura registada no seu interior.

De facto, fazendo a mesma análise para um período representativo de janeiro (Figura 65), torna-se evidente a diferença entre as temperaturas registadas para os vários valores de Rph e da sua crescente aproximação à temperatura exterior.

Para além disso, facilmente se compreende que quanto maior é a taxa de renovação horária implementada na habitação, maiores serão as necessidades de aquecimento para a obtenção de condições de conforto interior.

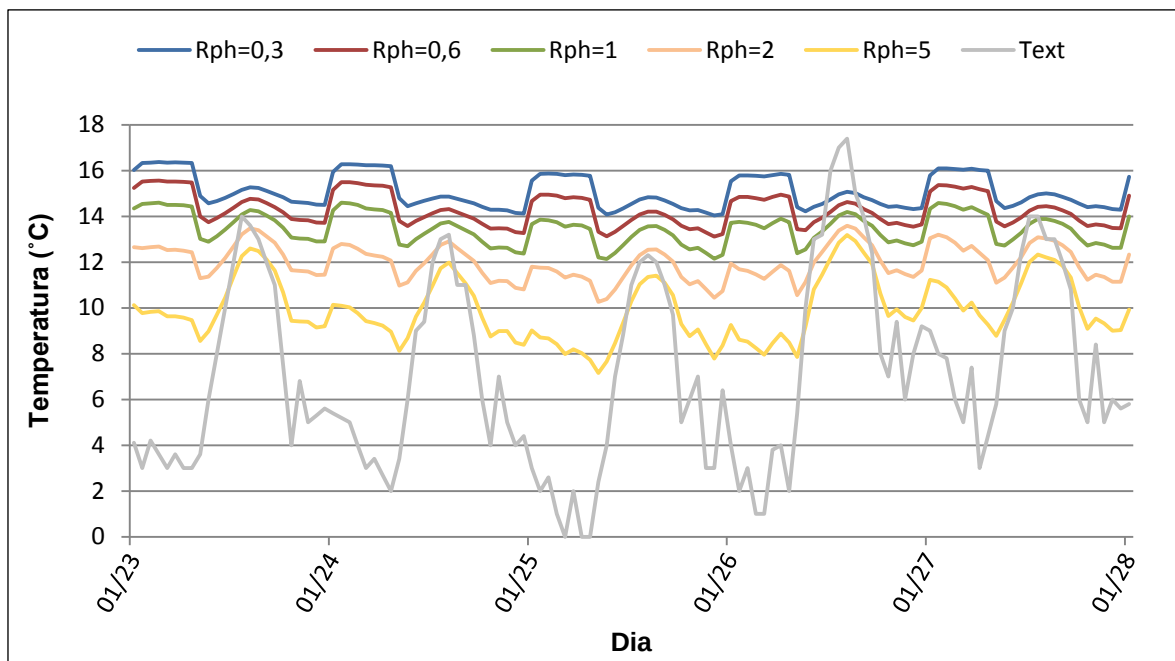


Figura 65 – Temperaturas registradas no Quarto para as diversas taxas de renovação horária: Período de 23 a 27 de janeiro.

6.3.3. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR

Analogamente à temperatura, também a humidade relativa interior se afasta das condições de conforto com o aumento da taxa de renovação de ar (Figura 66).

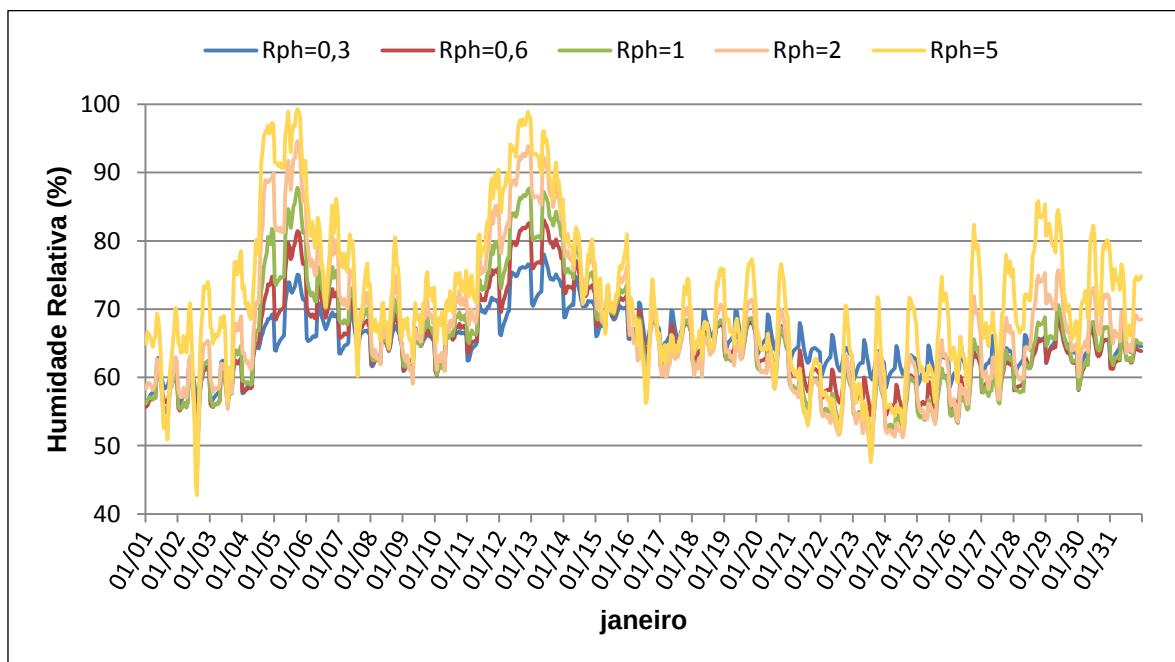


Figura 66 – Humidades relativas registradas no Quarto para as diversas taxas de renovação horária: janeiro.

Tendo em conta a dependência da humidade relativa face à temperatura, analisa-se na secção seguinte a variação da $T_{po,int}$ com a ventilação.

6.3.4. TEMPERATURA PONTO DE ORVALHO INTERIOR

Uma vez que neste ponto se está a trabalhar com regimes de ventilação constante, a fórmula de higrometria (1) é perfeitamente aplicável.

Tendo em conta que a temperatura ponto de orvalho funciona como um indicador da humidade absoluta, será possível relacionar esse parâmetro com as características exteriores, com a produção interna de vapor e com a ventilação.

Associando a taxa de atividade metabólica à produção interna de vapor (w), facilmente se conclui que em todas as zonas da habitação se produz a mesma quantidade de vapor por hora. No entanto, devido à diferença volumétrica interior, a higrometria será diferente consoante a zona térmica em estudo.

Neste contexto, apresentam-se as Figuras 67 e 68, procurando evidenciar o comportamento da T_{po} em duas zonas distintas da habitação: Zona 3 (Sala + Hall) e Zona 4 (Quarto).

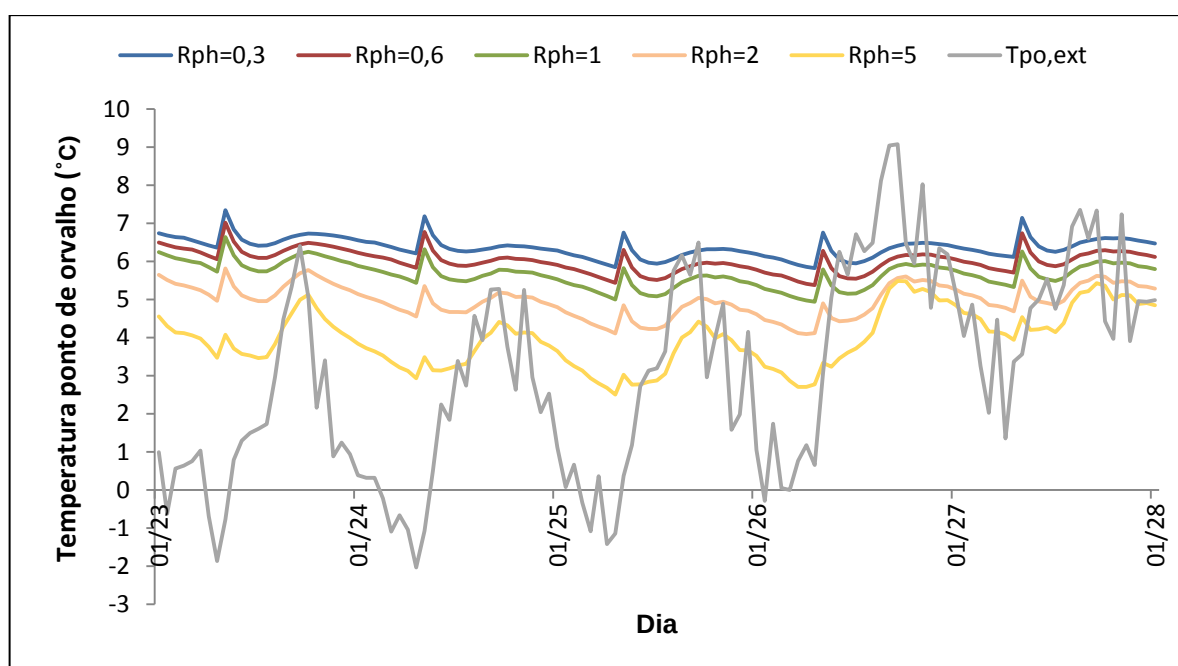


Figura 67 – Temperaturas ponto de orvalho registadas na Zona 3: Período de 23 a 27 de janeiro.

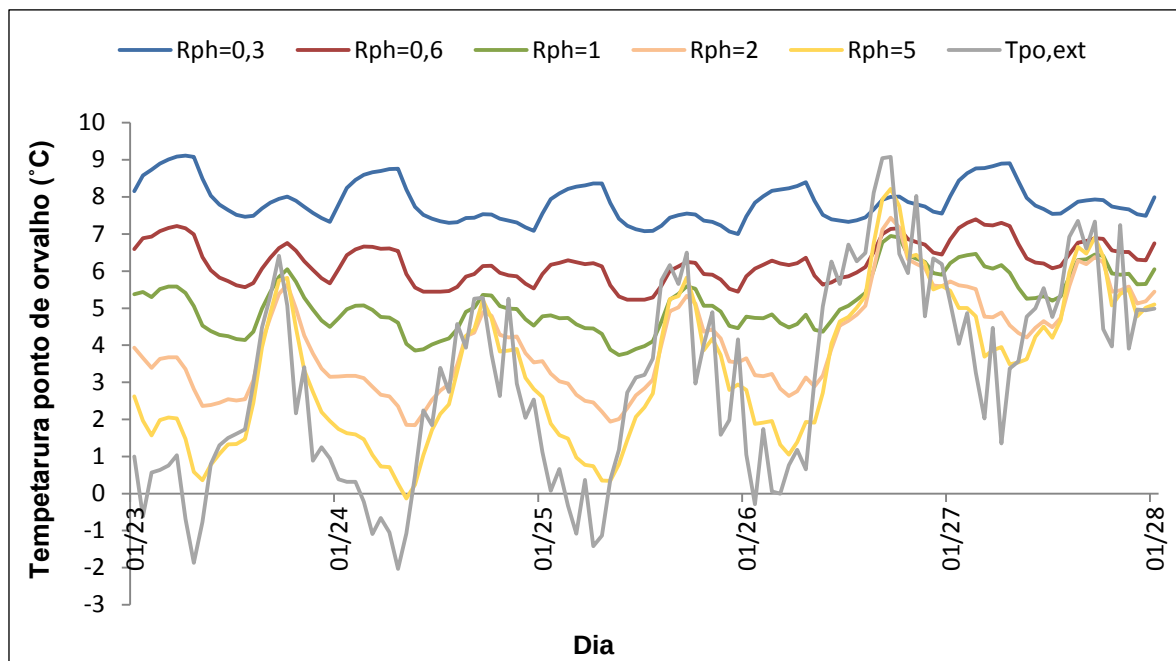


Figura 68 – Temperaturas ponto de orvalho registradas na Zona 4: Período de 23 a 27 de janeiro.

6.3.5. RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS

Conhecido o comportamento higrotérmico da habitação para os vários regimes de ventilação, interessa agora analisar o risco de desenvolvimento de fungos. De acordo com a norma EN 13788 [10], sempre que a humidade relativa superficial interior ($HR_{sup,int}$) de determinado elemento construtivo for superior a 80%, o risco de desenvolvimento de fungos na sua superfície interior é elevado. Neste sentido, evidencia-se na Figura 69 a variação da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto para os diferentes cenários de ventilação em regime constante.

De acordo com a Figura 69, à medida que se aumenta a taxa de renovação horária no interior da habitação, maior é o risco de desenvolvimento de fungos no seu interior. Essa tendência é evidente em dois períodos específicos de janeiro, tal como se evidencia nas Figuras 70 e 71.

Entre o dia 4 e 6 de janeiro (Figura 70), para uma taxa de renovação interior de 2 h^{-1} , a parede exterior do Quarto fica sujeita ao desenvolvimento de fungos durante um período de tempo de aproximadamente 24h. No entanto, quando a taxa cresce para um valor de 5 h^{-1} , esse período de tempo aumenta para um valor próximo das 48h.

Entre o dia 11 e 14 de janeiro (Figura 71), apenas se geram condições favoráveis ao desenvolvimento de fungos quando a taxa de renovação interior assume os valores 1 h^{-1} , 2 h^{-1} ou 5 h^{-1} . Na verdade, enquanto a taxa de renovação de 1 h^{-1} tem associado um período de risco de aproximadamente 12h, à taxa mais elevada de 5 h^{-1} corresponde um período de risco bastante mais longo, que ronda as 72h.

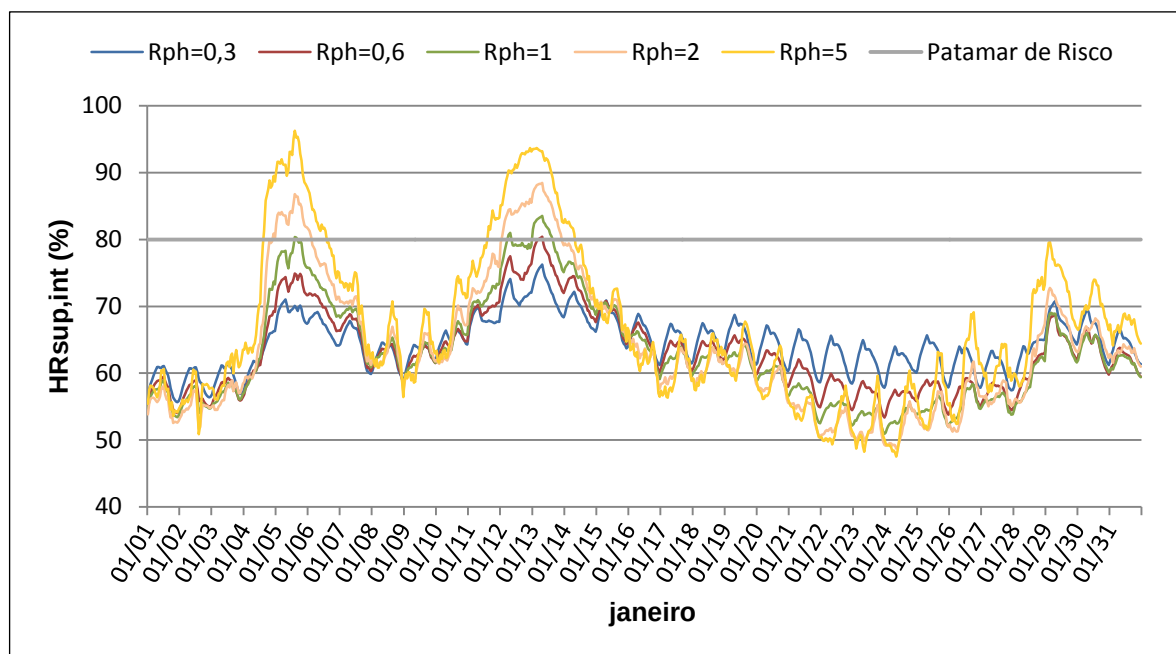


Figura 69 – Variação da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto: janeiro.

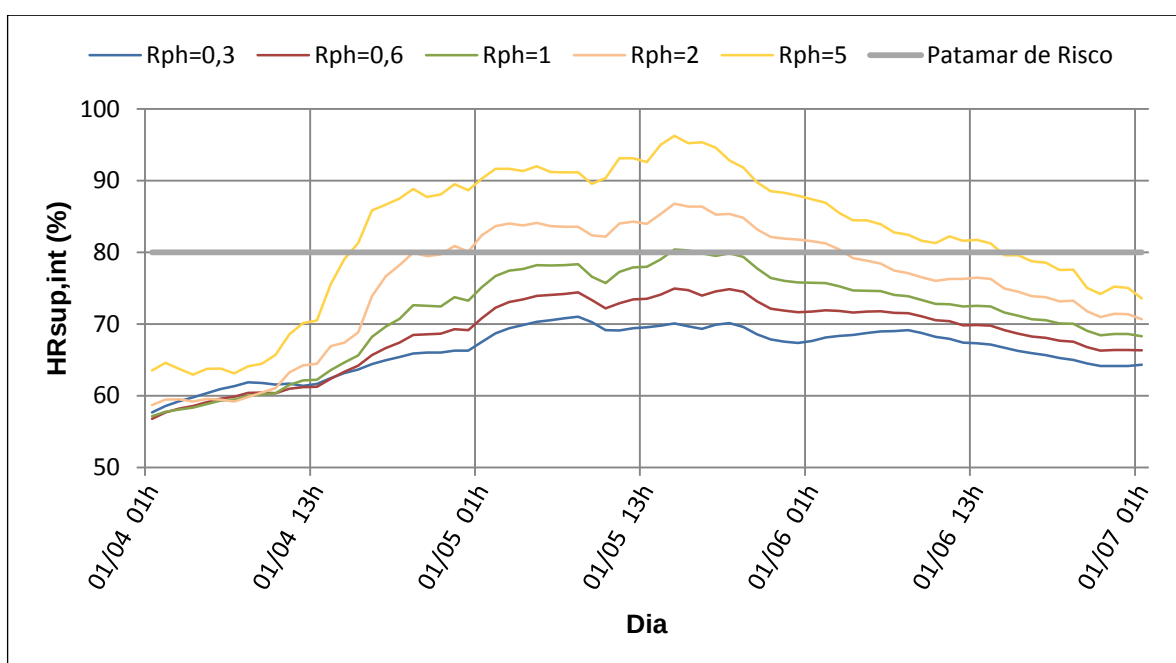


Figura 70 – Variação da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto: Período de 4 a 6 de janeiro.



Figura 71 – Variação da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto: Período de 11 a 14 de janeiro.

6.4. REGIME DE VENTILAÇÃO VARIÁVEL

6.4.1. INTRODUÇÃO

Conforme já foi mencionado no ponto 6.1, a habitação foi submetida a doze regimes de ventilação variável, admitindo-se em três deles (RV10 a RV12) uma forte variação da taxa de renovação horária ao longo do dia, sendo esse acréscimo igual a $1,7 \text{ h}^{-1}$. Deste modo, torna-se interessante analisar o comportamento higrotérmico da habitação face a determinados regimes variáveis, confrontando os resultados obtidos com situações de regime constante. Para tornar possível essa comparação tomaram-se como referência os regimes RV6 e RV12, cuja taxa de renovação horária média (Rph_{med}) é aproximadamente a mesma. Relativamente ao regime de ventilação constante utilizado na análise, tomou-se como referência o caso em que a habitação é submetida a uma taxa de renovação horária de 1 h^{-1} .

6.4.2. TEMPERATURA INTERIOR

Quando a habitação é submetida ao regime de ventilação RV6, as temperaturas registadas no interior do Quarto aproximam-se bastante da situação de regime constante, tal como se pode verificar na Figura 72.

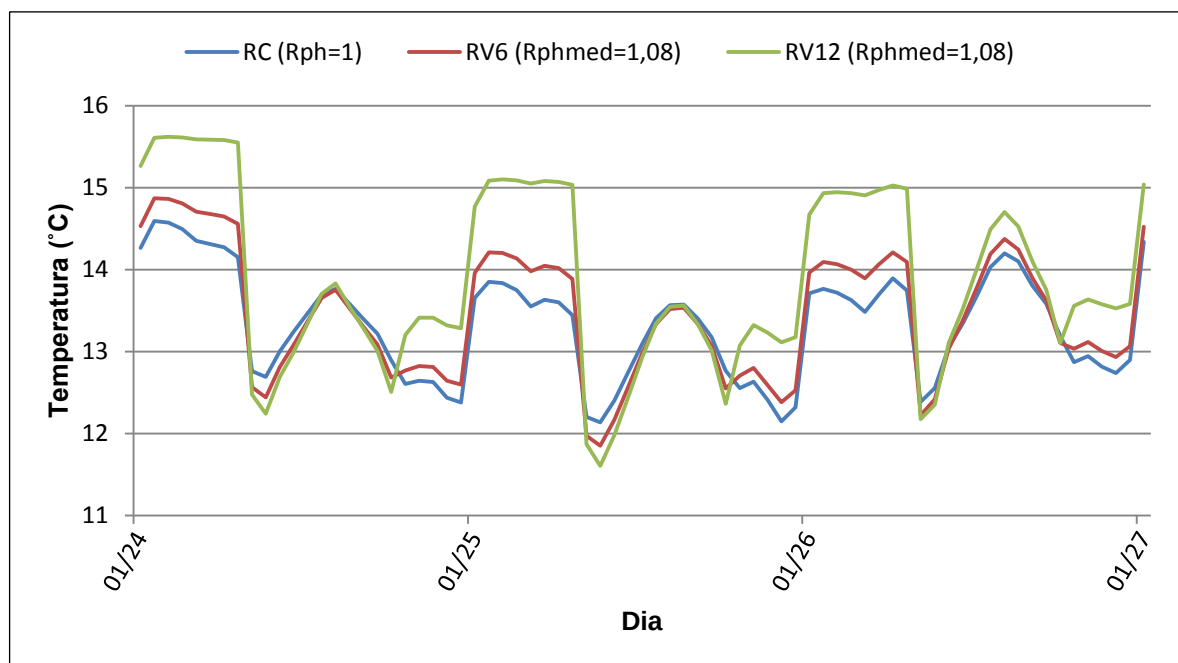


Figura 72 – Temperaturas registradas no Quarto para diferentes regimes de ventilação: Período de 24 a 26 de janeiro.

No entanto, quando se admite um forte acréscimo de Rph ao longo do dia, tal como se considera no regime RV12, a temperatura interior no Quarto tende a assumir valores ligeiramente mais elevados, quando comparados com a situação de regime constante. Para o período de janeiro representado, essa diferença pode atingir os 1,5°C.

Comparativamente ao regime constante e ao regime RV6, o regime variável RV12 conduz a maiores amplitudes de variação da temperatura.

6.4.3. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR

Relativamente à humidade relativa interior, devido à sua dependência face à temperatura, obtiveram-se os resultados ilustrados na Figura 73, onde se evidencia mais uma vez a proximidade entre o regime RV6 e o regime constante.

No entanto, para a situação em que é admitido um acréscimo significativo de Rph, é possível identificar diferenças de humidade relativa de 5%, relativamente à situação de regime constante.

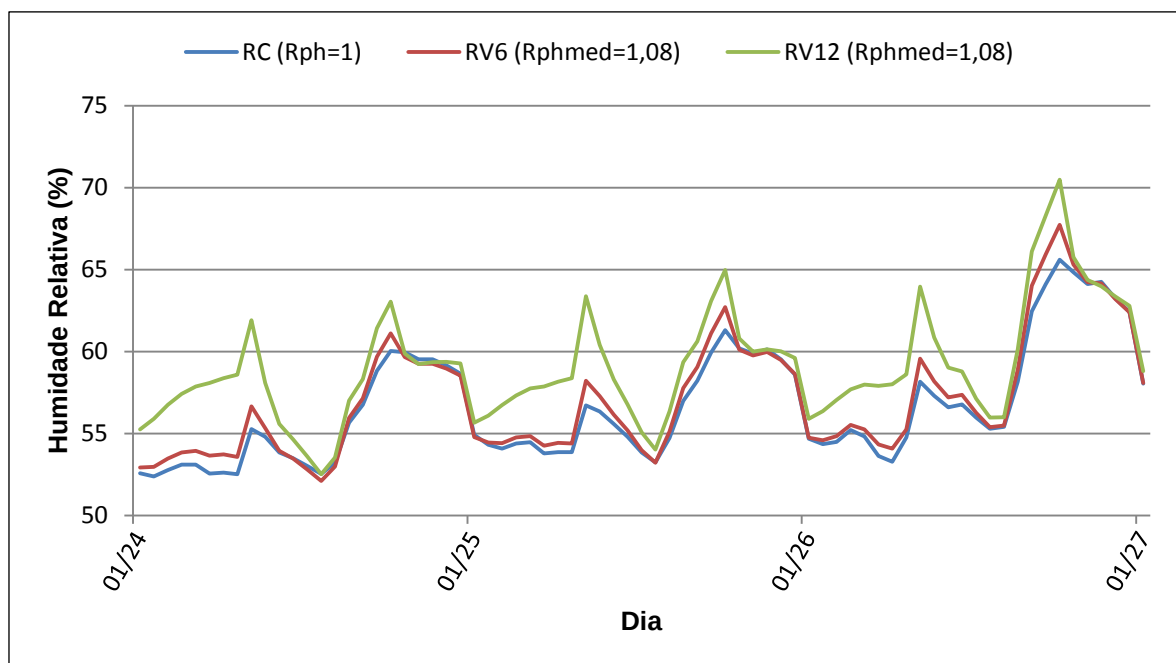


Figura 73 – Humidades relativas registadas no Quarto para diferentes regimes de ventilação: Período de 24 a 26 de janeiro.

6.4.4. RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS

Para avaliar a influência dos diferentes regimes de ventilação na probabilidade de desenvolvimento de fungos, analisou-se o comportamento da $HR_{sup,int}$ na parede exterior do Quarto, para dois dias representativos de janeiro (Figura 74).

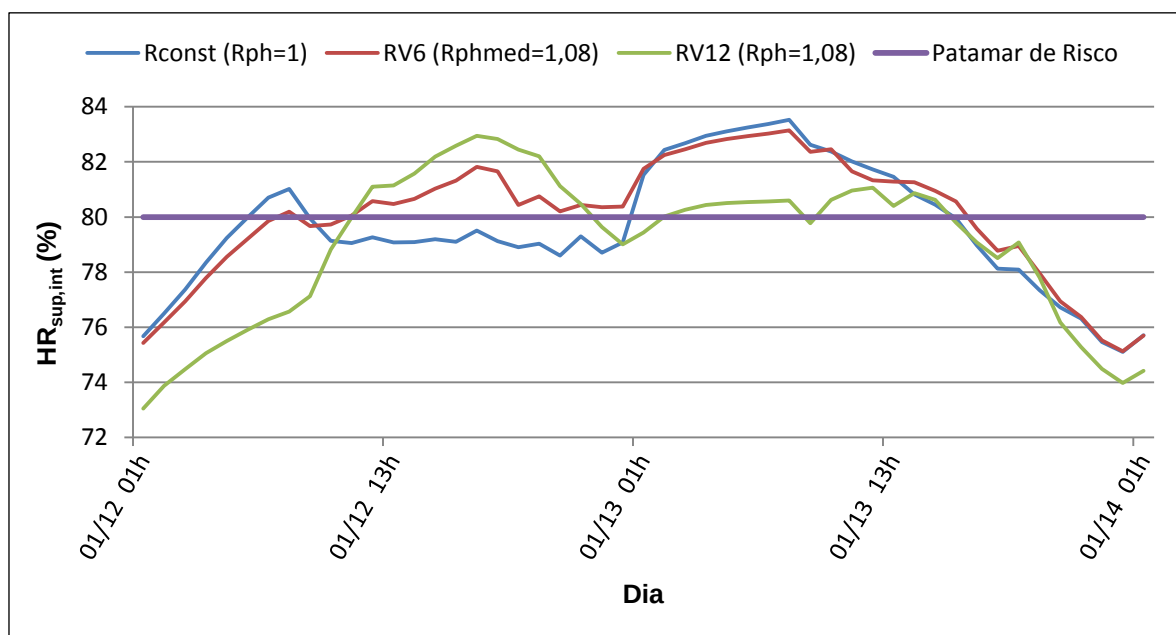


Figura 74 – Risco de desenvolvimento de fungos na parede exterior do Quarto, considerando diferentes regimes de ventilação: Período de 12 a 13 de janeiro.

Comparando a situação de regime constante com o regime variável RV6, verifica-se uma tendência de aproximação dos dois regimes de ventilação. No entanto, existem determinados instantes em que o comportamento da $HR_{sup,int}$ face ao patamar de risco de 80%, é diferente consoante o regime considerado. Um desses instantes corresponde ao período compreendido entre o dia 12, às 13h, e o dia 13, à 1h. Deste modo, verifica-se uma maior tendência para o desenvolvimento de fungos no caso do regime variável RV6.

Em contrapartida, quando existe uma variação significativa da taxa de renovação horária (RV12), a $HR_{sup,int}$ na parede exterior tem um comportamento ligeiramente diferente da situação de regime constante. No entanto, verifica-se também um aumento do risco de desenvolvimento de fungos.

6.5. SÍNTESE DE RESULTADOS

Para uma melhor perceção do desempenho higrotérmico da habitação, face aos diversos regimes de ventilação considerados no presente trabalho, procedeu-se ao cálculo de alguns indicadores estatísticos. Os indicadores utilizados foram: Valor Médio (V_{med}), Percentil 10 ($P10$) e o Percentil 90 ($P90$).

Quando a habitação é submetida a determinado regime de ventilação constante (RC), as temperaturas registadas, durante o ano de simulação, no interior do Quarto, tendem a decrescer com o aumento da taxa de renovação horária, tal como se evidencia na Figura 75, através dos diferentes indicadores estatísticos.

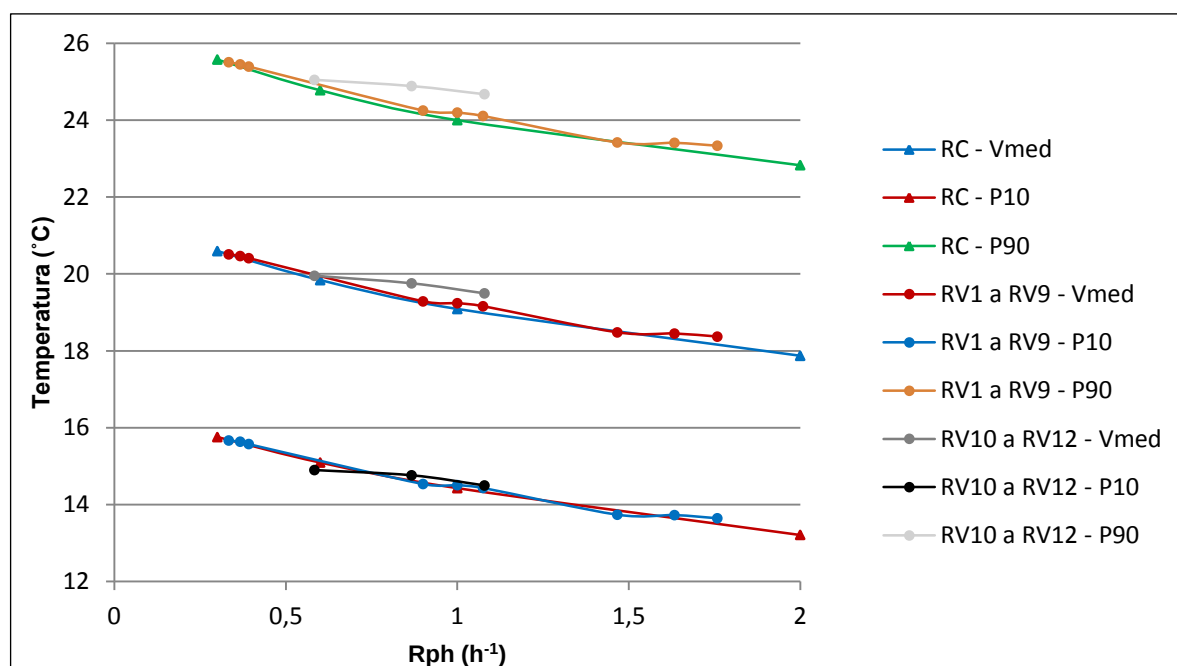


Figura 75 – Análise Anual: Temperatura no Quarto.

No caso em que o regime de ventilação é variável, o comportamento da temperatura interior tende a ser diferente, consoante se considere ou não uma forte variação da taxa de renovação ao longo do dia. Para os casos em que não existe uma mudança brusca das condições de ventilação (RV1 a RV9), as temperaturas registadas no interior do quarto, durante o período de simulação, revelam uma grande

proximidade às situações de regime constante. No entanto, quando a habitação é submetida a regimes variáveis que admitem um aumento significativo da taxa de renovação horária (RV10 a RV12), a temperatura interior no quarto tende a assumir valores, ao longo do ano, um pouco diferentes dos obtidos para os casos de regime constante.

No entanto, este aspeto pode ser analisado com mais detalhe a partir da Figura 76, onde se evidencia o comportamento da temperatura interior no Quarto para o mês de janeiro.

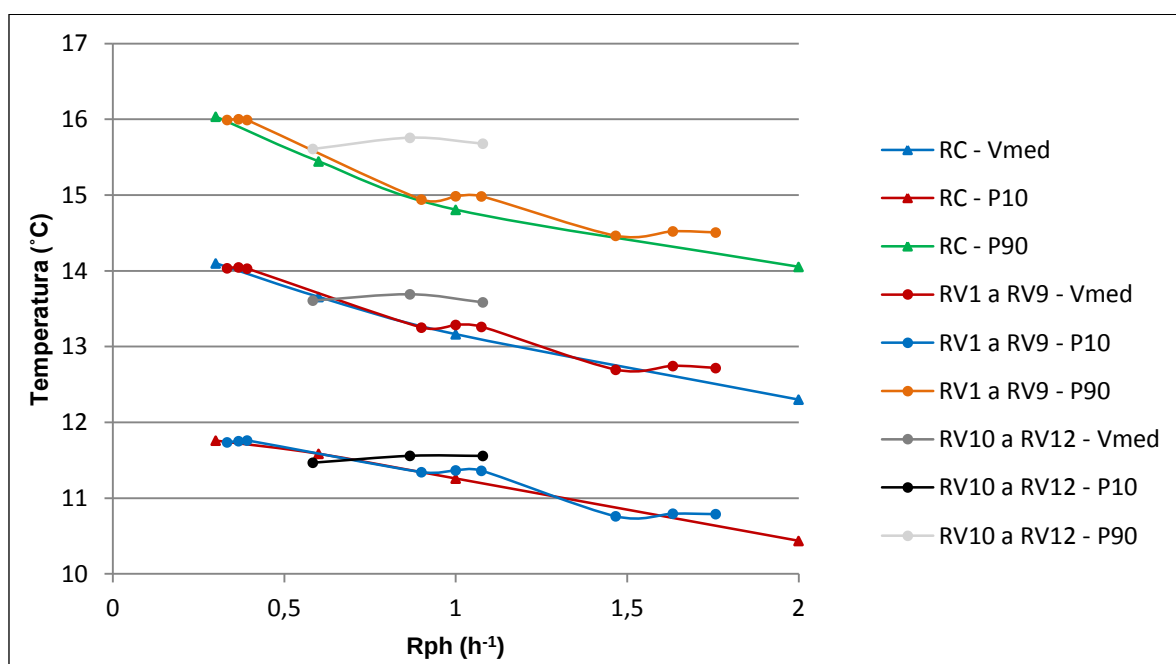


Figura 76 – Análise para o mês de janeiro: Temperatura no Quarto.

No caso do regime de ventilação ser constante, a temperatura interior tende a diminuir com o aumento da taxa de renovação horária. De facto, à medida que se aumenta a taxa de renovação interior, mais baixos são os valores dos respetivos indicadores.

Quando o regime é variável, apesar dos regimes RV6 e RV12 estarem associados a uma mesma taxa de renovação horária média, apenas o primeiro evidencia uma grande proximidade à situação de regime constante, tal como se pode comprovar através dos valores obtidos para cada um dos indicadores. Quando o regime utilizado é o RV12 registam-se temperaturas interiores mais elevadas, comparativamente à situação de regime constante. De facto, comparando o percentil 90 para ambos os regimes verifica-se uma diferença de aproximadamente 1°C na temperatura interior.

Relativamente à humidade relativa registada no Quarto no mês de janeiro, dada a sua dependência face à temperatura interior, o seu valor, para a situação de regime constante, tende a assumir valores de T_{med} e de T_{90} cada vez maiores com o aumento da taxa de renovação implementada na habitação (Figura 77).

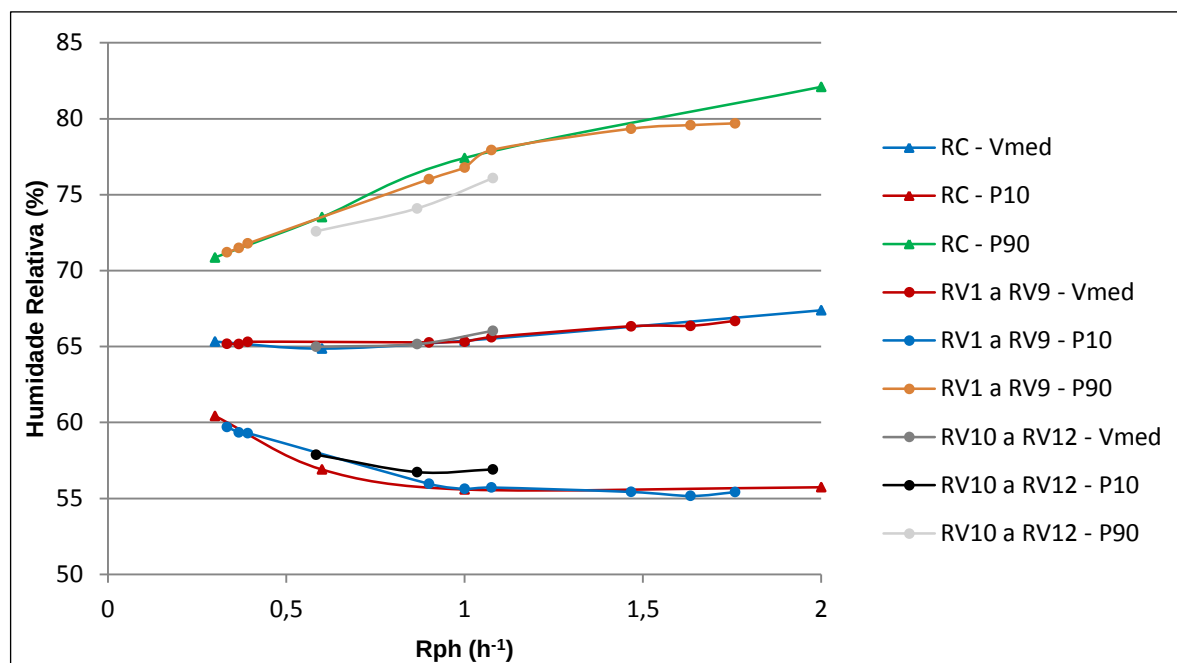


Figura 77 – Análise para o mês de janeiro: Humidade relativa no Quarto.

Perante regimes variáveis, mais uma vez se verifica uma grande aproximação dos regimes RV1 a RV9 aos regimes de ventilação constante. No entanto, quando é admitido um aumento brusco da taxa de renovação interior, tal como se considera no regime RV12, verifica-se um ligeiro afastamento da humidade relativa dos valores registados em regime constante.

No que diz respeito à temperatura ponto de orvalho interior, quando a habitação é submetida a determinado regime de ventilação constante, o seu valor no Quarto tende a crescer com o aumento da taxa de renovação horária (Figura 78), tal como se comprova pelo comportamento do percentil 90.

No entanto, de acordo com a fórmula (1), seria de esperar uma diminuição da temperatura ponto de orvalho interior para uma higrometria cada vez menor. A única explicação para este comportamento poderá estar associada à produção interna de vapor considerada no Quarto. O crescente parâmetro n.V, aliado a uma pequena e constante produção de vapor, faz com que a higrometria seja cada vez mais reduzida e as condições exteriores influenciem cada vez mais o interior do Quarto, o que pode justificar o aumento do percentil 90 para taxas de renovação crescentes.

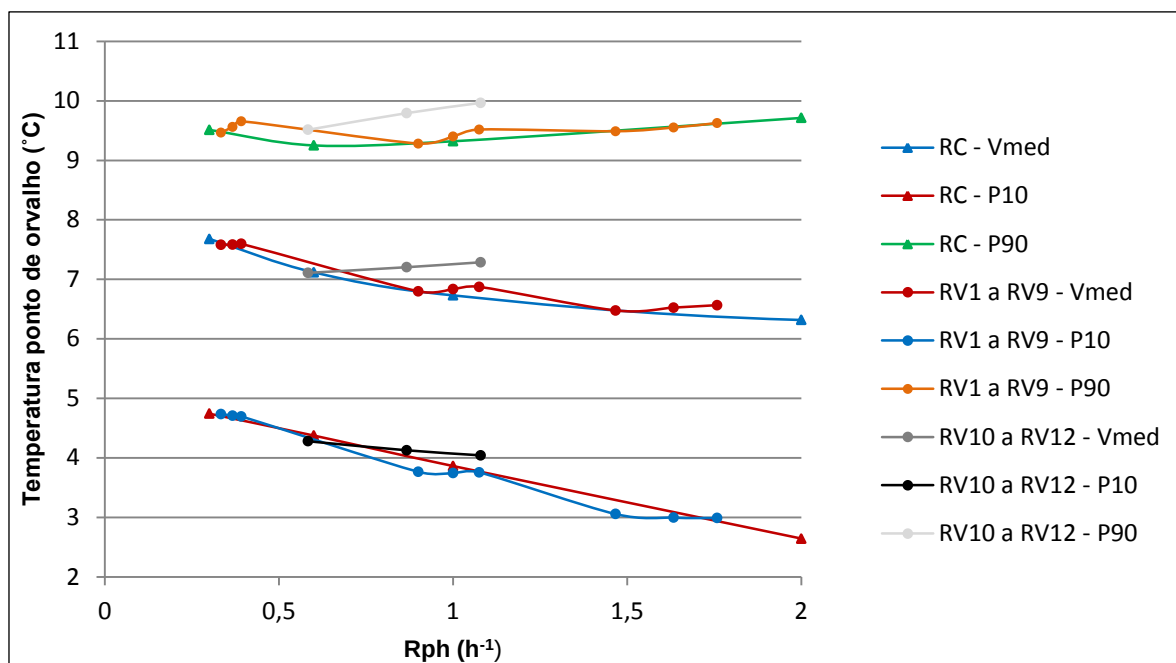


Figura 78 – Análise para o mês de janeiro: Temperatura ponto de orvalho no Quarto.

De facto, se esta análise for feita para um período de tempo em que as condições exteriores, em termos de temperatura ponto de orvalho, se mostrem mais estáveis é possível obter o comportamento esperado para a temperatura ponto de orvalho interior. Essa análise é ilustrada na Figura 79.

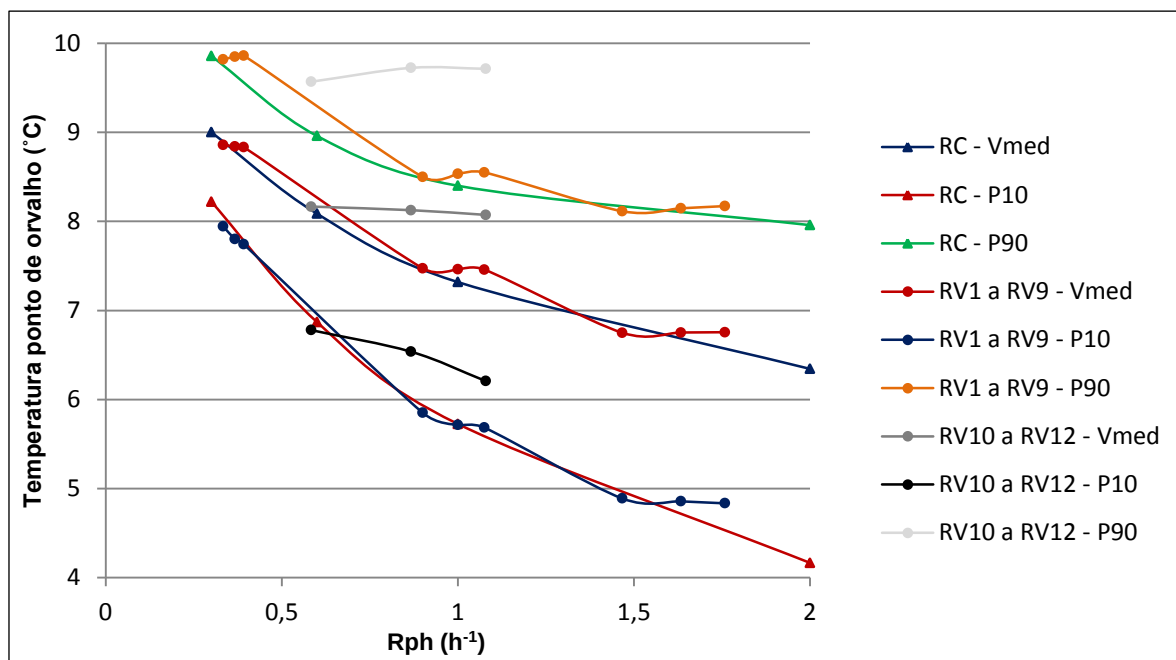


Figura 79 – Análise para a semana de 22 a 27 de janeiro: Temperatura ponto de orvalho no Quarto.

Tomando novamente como base de comparação os regimes RV6 e RV12, é evidente, mais uma vez, a tendência de aproximação do regime RV6 à situação de regime constante. No que diz respeito ao regime RV12, os valores registados para a temperatura ponto de orvalho interior tendem a ser ligeiramente superiores, tal como se comprova pelo valor dos respetivos percentis.

8

CONCLUSÕES

8.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permitiu alcançar o seu objetivo principal, cumprindo-se com sucesso todos os objetivos parciais definidos no capítulo 1. De seguida apresentam-se as principais conclusões deste trabalho:

- O programa de simulação EnergyPlus tem à sua disposição três diferentes modelos de transferência de calor e humidade: O modelo CTF, o modelo HAMT e o modelo EMPD. Aplicando os vários modelos foi possível analisar a influência de cada um no desempenho higrotérmico da habitação em estudo;
- O modelo que o EnergyPlus considera por defeito é o modelo CTF, que despreza no seu cálculo o mecanismo de transferência de humidade através dos elementos construtivos. Assim, quando a habitação é simulada com este tipo de modelo, não é admitida qualquer transferência de calor latente, nem qualquer adsorção da humidade do ar, por parte dos materiais existentes. O seu cálculo restringe-se apenas à transferência de calor através dos materiais, exigindo-se para a sua utilização o conhecimento de três propriedades fundamentais: Condutibilidade térmica, a massa volúmica e calor específico;
- O modelo HAMT trata-se de um modelo bastante completo, que tem em conta o efeito conjugado da transferência de calor e humidade através dos elementos construtivos. Neste caso, são admitidas transferências de calor latente e considera-se a adsorção da humidade do ar, por parte dos materiais constituintes da habitação. Para a sua utilização no EnergyPlus, é necessário quantificar para todos os materiais as seguintes propriedades: Condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico, curva de retenção, teor de humidade inicial, porosidade, coeficiente de transferência de água líquida por sucção (função do teor de humidade), coeficiente de transferência de água líquida de redistribuição (função do teor de humidade), fator de resistência à difusão de vapor (função da humidade relativa) e, por último, a condutibilidade térmica em função do teor de humidade do material;
- O modelo EMPD permite simular a adsorção e desadsorção de vapor de água à superfície das paredes, utilizando para isso apenas uma fina camada de espessura δM , localizada na superfície mais interior da parede. Para a sua correta utilização, além de ser necessário quantificar a condutibilidade térmica, a massa volúmica e o calor específico dos diversos materiais existentes, é também fundamental caracterizar detalhadamente o material higroscópico considerado à superfície das paredes. Para o caso em estudo, o material caracterizado foi o reboco interior, especificando-se o valor de δM e de quatro coeficientes, presentes na equação da sua curva de adsorção.

- O processo de cálculo do modelo EMPD é bastante sensível ao valor considerado para a espessura da camada superficial de reboco. Por essa razão, foram consideradas duas situações, EMPD1 e EMPD2, considerando em cada uma delas valores de δM iguais a 2,5mm e 4mm, respetivamente.
- Quando se utilizam os modelos CTF e EMPD, registam-se temperaturas interiores na habitação bastante similares. No entanto, quando se admitem transferências de calor latente, como no caso do Modelo HAMT, as temperaturas registadas têm uma alteração sensível.
- Quando se analisa a temperatura ponto de orvalho interior, os valores registados com o Modelo EMPD, admitindo-se uma maior capacidade de adsorção do reboco higroscópico (EMPD2), revelam uma grande proximidade aos resultados obtidos com o Modelo HAMT. Em contrapartida, quando essa capacidade é menor (EMPD1), as temperaturas ponto de orvalho situam-se num intervalo de valores ligeiramente diferente do Modelo HAMT.
- Comparativamente aos outros modelos, quando se utiliza o modelo CTF, os valores registados para a temperatura ponto de orvalho interior situam-se num intervalo bastante mais alargado. Esse comportamento pode ser justificado pelo facto de não ser admitida a adsorção de vapor pelos materiais no respetivo modelo.
- Uma vez que o modelo CTF não considera adsorção de vapor pelos materiais, atingem-se valores de humidade relativa interior bastante elevados, refletindo-se isso no valor da temperatura ponto de orvalho interior. Quando se utilizam os modelos HAMT e EMPD, registam-se humidades relativas interiores mais baixas.
- Numa situação de inverno e de ausência de aquecimento, à medida que se aumenta a taxa de renovação horária no interior da habitação, maior é a influência do ambiente exterior no seu comportamento higrotérmico. Deste modo, torna-se cada vez mais difícil obter condições de conforto interior, especialmente no que diz respeito a temperatura e humidade relativa. Para além disso, importa salientar também que, para uma ventilação crescente no interior da habitação, maior é o risco de desenvolvimento de fungos no seu interior.
Através dos resultados obtidos facilmente se compreende que a ventilação, apesar de melhorar a qualidade do ar interior, pode provocar grandes perdas térmicas e gerar situações de grande desconforto. No entanto, esta situação poderia ser contrariada se existisse aquecimento no período de inverno. Através da sua consideração e do seu efeito conjugado com a ventilação, poderia ser melhorado o conforto interior e minimizada a ocorrência de determinadas patologias.
- Um caudal de ventilação muito reduzido pode implicar um risco de desenvolvimento de fungos elevado.
- No caso em que a habitação é submetida a um regime de ventilação variável, foram analisadas duas situações distintas: uma primeira, que não admite uma mudança brusca das condições de ventilação diárias, e uma segunda, que considera um forte acréscimo de Rph num determinado período do dia.
Para a primeira situação, o comportamento higrotérmico da habitação tende a aproximar-se do comportamento registado para regimes de ventilação constante. No entanto, verificou-se um maior risco de desenvolvimento de fungos no caso variável.
Para a segunda situação, as condições interiores de humidade e temperatura tendem a afastar-se da situação de regime constante.
É de notar que estes resultados apenas ilustram uma tendência de comportamento da habitação face a determinadas condições de ventilação variáveis. De facto, para uma análise mais rigorosa, seria necessário considerar-se uma gama mais diversificada de regimes de ventilação.

8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Devido ao curto tempo disponível para realizar um trabalho desta dimensão, existem certos aspetos que, no meu ver, poderiam ser melhorados e explorados em trabalhos futuros.

No que diz respeito ao modelo estudado poderiam ser tidos em conta os seguintes pontos:

- Melhorar a quantificação dos ganhos internos de vapor;
- Submeter cada uma das zonas da habitação a condições de ventilação diferentes, especialmente a cozinha e a casa de banho (locais caracterizados pela elevada produção de vapor gerada);
- Considerar o contributo do aquecimento e conjugá-lo com o efeito da ventilação. Neste contexto, poderia também ser feita uma otimização, procurando definir um valor ótimo de R_{ph} que permitisse alcançar uma situação de conforto, com minimização da energia de aquecimento;

Relativamente a futuros temas, seria interessante avaliar qual a melhor estratégia a seguir, no que diz respeito a ventilação e a aquecimento, para a obtenção de condições de conforto interior.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mascarenhas, J. *Sistemas de Construção IX*. Livros Horizonte, Lisboa, 2008.
- [2] Concannon, P. *Technical note AIVC 57 – Residencial Ventilation*. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), Brussels, Belgium, 2002.
- [3] Freitas, V. *Recomendações Práticas para Implementação de Sistemas de Ventilação Mistos em Edifícios de Habitação*. Documento consultado a partir dos conteúdos da disciplina Patologia e Reabilitação de Edifícios.
- [4] Freitas, V. *Avaliação da Qualidade do Ambiente Interior: Conforto Térmico e Qualidade do Ar Interior*. Documento consultado a partir dos conteúdos da disciplina Patologia e Reabilitação de Edifícios.
- [5] Fanger, P. *Thermal Comfort*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1970.
- [6] International Standard Organization, *Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO 7730*, Suíça, 2005.
- [7] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), *Decreto de lei n.º 79-2006*, Diário da República 1.ª série – A, 4 de abril de 2006.
- [8] Ramos, N. *A Importância da Inércia Higroscópica no Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [9] Piedade, A., Rodrigues, A., Roriz, L. *Climatização em edifícios – Envolvente e comportamento térmico*. Edições Orion, 2000.
- [10] 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.
- [11] CEN, *Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods: EN ISO 13788*, 2001.
- [12] ANSI/ASHRAE Standard 160-2009: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings, USA, 2009.
- [13] Cartas, J. *Simulação dinâmica de um edifício de escritórios com os programas EnergyPlus e Trace 700*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [14] Afonso, M. *Simulação Higrotérmica de Edifícios – Aplicação do EMPD no cálculo da humidade interior*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [15] Esteves, T. *Optimização da envolvente exterior para minimização do risco de condensações superficiais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [16] EnergyPlus (2010a). engineering reference. In EnergyPlus Documentation Menu, pp. 29 a 33, 2010.
- [17] EnergyPlus (2010b). engineering reference. In EnergyPlus Documentation Menu, pp. 37 a 42, 2010.

- [18] EnergyPlus (2010c). getting started with energyplus. In EnergyPlus Documentation Menu, pp. 7 a 11, 2010.
- [19] EnergyPlus (2010d). input/output reference. In EnergyPlus Documentation Menu, pp. 60 a 61, 2010.
- [20] EnergyPlus (2010e). engineering reference. In EnergyPlus Documentation Menu, pp 51 a 57, 2010.
- [21] Pederson, C. *Advanced zone simulation in EnergyPlus: Incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability*. Proceedings: Building Simulation 2007, 3 a 6 de setembro de 2007, Tsinghua University, Beijing, China.
- [22] EnergyPlus (2010f). engineering reference. In EnergyPlus Documentation Menu, pp. 60 a 65, 2010.
- [23] Castro, P. *Critérios para Controlo de Humidade em Edifícios*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [24] Freitas, V., Torres, M., Guimarães. *Humidade Ascensional*. Feup Edições, Porto, 2008.
- [25] EnergyPlus (2010g). engineering reference. In EnergyPlus Documentation Menu, pp. 66 a 69, 2010.
- [26] Cunningham, M. *Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer*. Building and Environment, 1992.
- [27] Hagentoft, C.-E. *Introduction to Buildings Physics*. Lund (Sweden), 2001.
- [28] 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.
- [29] Martins, I., Faria, A., Ferreira, C., Rocha, E., Lage, G., Machado, I., Rocha, S. *Rede Social do Porto – Relatório de Pré-diagnóstico*. Ano de 2008. Disponível em http://www.cm-porto.pt/users/0/56/PdRSP_Relatorio_09c0809544420e609217983c1262080f.pdf. 21 de novembro de 2011.
- [30] Dias, P. *50 mil portugueses vivem em bairros sociais e não querem sair*. Jornal Semanário Grande Porto, 20 de julho de 2010, Porto.
- [31] Pesquisa realizada no site da Câmara Municipal da cidade do Porto (endereço: <http://www.cm-porto.pt/gen.pl?p=stories&op=view&fokey=cmp.stories/16394>). 22 de novembro de 2011.
- [32] Santos, P. *Optimização da Resistência Térmica da Envolvente de Edifícios Escolares*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [33] Imagem retirada do site da empresa de construção LUCIOS Engenharia e Construção (endereço: <http://www.lucios.pt/portfolio/requalificacao/bairro-de-lordelo-0>). 15 de janeiro de 2012.
- [34] Disponível no site do EnergyPlus (endereço: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>). 4 de dezembro de 2011.
- [35] Site da Fraunhofer (endereço: http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/downloads_e.html). 20 de setembro de 2011.