

# **REABILITAÇÃO DA CANTINA DA FEUP PARA MELHORIA DO CONFORTO HIGROTÉRMICO**

**PEDRO DANIEL SILVA PEREIRA**

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

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

---

Coorientador: Professor Doutor Ricardo M. S. F. Almeida

JUNHO DE 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto: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](mailto: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 - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais,  
aos meus irmãos  
e aos meus sobrinhos

*Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas.*

*Muito conhecimento, que se sintam humildes*

*Leonardo da Vinci*



## **AGRADECIMENTOS**

Na realização da presente dissertação foi fundamental o apoio de todas as pessoas que de uma forma direta ou indireta demonstraram o seu contributo e às quais sou profundamente grato:

Ao Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos pelo acompanhamento ao longo de todo o trabalho transmitindo conhecimentos, esclarecendo dúvidas, sugerindo estratégias, alertando para as possíveis adversidades e pela simpatia demonstrada nas várias reuniões.

Ao Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida pelo auxílio no manuseamento do software de simulação, bem como pelos conhecimentos transmitidos em diversas áreas.

Ao Engenheiro Pedro Pereira pela disponibilidade e acompanhamento nas várias recolhas dos dados.

Ao responsável da cantina e seus funcionários pela simpatia e cooperação na realização dos ensaios e medições.

À minha família, especialmente aos meus pais, pela possibilidade de alcançar os meus objetivos, sem eles não teria sido possível.

Aos meus irmãos por todo o apoio e conselhos.

Aos meus tios pela estadia durante estes cinco anos em que me fizeram sentir sempre em casa.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo deste percurso, especialmente à Ana por todo apoio e carinho demonstrado.



## RESUMO

A qualidade dos edifícios está diretamente relacionada com o grau de satisfação expresso pelos seus ocupantes. Os espaços destinados à alimentação, como é o caso das cantinas universitárias, além de uma alimentação de qualidade, devem proporcionar aos seus utilizadores níveis de conforto adequados.

No presente trabalho pretende-se avaliar o conforto higrotérmico da cantina da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, bem como simular alternativas de intervenção usando *software* de simulação dinâmica.

Inicialmente procedeu-se à monitorização da temperatura e humidade relativa através de medições *in-situ* resultantes da instalação de sensores no interior do edifício onde está implantada a cantina. Os valores obtidos permitem caracterizar o ambiente interior do edifício.

Para avaliar o conforto higrotérmico na cantina foram utilizados os modelos gráficos propostos pela ASHRAE 55 e pela EN 15251, permitindo concluir que a humidade se encontra dentro dos limites toleráveis e que o conforto térmico varia ao longo do período de monitorização. A cantina apenas é confortável nos meses de abril e maio, sendo que durante o Inverno e o Verão os seus ocupantes encontram um local desconfortável condicionado pelas temperaturas baixas e elevadas, respetivamente.

Tendo por base as informações de projeto, as medições *in-situ* e a atividade do edifício procedeu-se à modelação do caso de estudo e respetiva simulação térmica usando o DesignBuilder e o EnergyPlus.

Partindo da simulação térmica da situação atual propuseram-se alternativas de intervenção com a finalidade de melhorar o conforto higrotérmico na cantina. No entanto, nem todas as alternativas apresentam melhorias em relação à situação atual.

A alternativa mais interessante, em termos de elementos construtivos, pelos resultados obtidos é a colocação de estores pelo exterior dos envidraçados, com o objetivo de redução do sobreaquecimento em períodos de temperatura exterior elevada. A garantia de condições de conforto só poderá ser obtida com o recurso a aquecimento/arrefecimento por sistemas a propor em projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conforto Higrotérmico, Cantina, Medições *In-situ*, Simulação Térmica, Alternativas de Intervenção.



## **ABSTRACT**

Buildings quality is directly related with its costumer's level of satisfaction. Feeding places as university cafeteria, in addition to quality food must also provide suitable comfort levels to their customers.

The primary objective of this study is to evaluate FEUP's cafeteria hygrothermal comfort and simulate alternative intervention using dynamic simulation software.

Temperature and relative humidity were measured through in-situ measurements, from sensors placed within the building regarding the cafeteria. These values were used to define the building interior environment.

In order to evaluate hygrothermal comfort graphical models proposed by ASHRAE 55 and EN 15251 were used. The conclusion was that humidity of the place is within tolerable limits and thermal comfort varies according to monitoring periods. The cafeteria is comfortable during April and May, although costumers find it an uncomfortable place during winter and summer, due to low and high temperature respectively.

Case study modelling was made according to project information, in-situ measurements, building activity and thermal simulation using the software "design builder" and "energy plus".

From the results of the simulation, alternative intervention strategies to improve cafeteria's hygrothermal comfort were studied and proposed. However, not all the studied solutions have revealed to be a significant improvement compared to the current situation.

The most interesting alternative intervention is to protect the glazing area with exterior blinds programmed according to solar radiation potential, with the objective of reducing the overheating during periods with high exterior temperature. Guarantee of comfort conditions can only be obtained with the use of heating/cooling systems to be proposed in project.

**KEYWORDS:** Hygrothermal Comfort, Cafeteria; In-situ Measurements, Thermal Simulation, Alternative Intervention.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	2
<b>2. FUNDAMENTOS</b> .....	3
2.1. AVALIAÇÃO DO CONFORTO HIGROTÉRMICO .....	3
2.1.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.1.2. MODELOS DE CONFORTO .....	4
2.1.3. CONFORTO HIGROTÉRMICO EM CANTINA UNIVERSITÁRIA .....	7
2.2. SIMULAÇÃO TÉRMICA .....	7
2.2.1. INTRODUÇÃO .....	7
2.2.2. MODELOS DE CÁLCULO .....	9
<b>3. CASO DE ESTUDO</b> .....	11
3.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO .....	11
3.1.1. IMPLANTAÇÃO .....	11
3.1.2. ARQUITETURA .....	12
3.1.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS .....	14
3.2. SISTEMAS .....	17
3.3. OCUPAÇÃO .....	21
<b>4. MEDIÇÕES IN-SITU</b> .....	23
4.1. PLANO DE MEDIÇÃO .....	23
4.2. RESULTADOS .....	26
4.2.1. CLIMA EXTERIOR .....	26
4.2.1.1. Tratamento de dados .....	26
4.2.1.2. Temperatura Exterior .....	28
4.2.1.3. Humidade Relativa .....	30
4.2.1.4. Temperatura de Ponto de Orvalho .....	31

4.2.1.5. Radiação Solar .....	32
4.2.2. CLIMA INTERIOR .....	35
4.2.2.1. Temperatura .....	35
4.2.2.2. Humidade Relativa.....	40
4.2.2.3. Velocidade do ar .....	43
<b>4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
4.3.1. VARIABILIDADE ENTRE SENSORES .....	46
4.3.2. CORRELAÇÃO ENTRE ZONAS.....	52
4.3.3. MODELOS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO .....	55
<b>5. SIMULAÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1. MODELAÇÃO .....</b>	<b>61</b>
5.1.1. GEOMETRIA.....	61
5.1.2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS.....	63
5.1.3. GANHOS INTERNOS.....	64
5.1.3.1. Ocupação.....	64
5.1.3.2. Equipamentos .....	66
5.1.3.3. Iluminação.....	66
5.1.4. VENTILAÇÃO .....	67
<b>5.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>6. ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>6.1. DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>6.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
6.2.1. SIMULAÇÃO EM REGIME LIVRE .....	74
6.2.2. SIMULAÇÃO CONDICIONADA .....	77
<b>6.3. ANÁLISE CRÍTICA .....</b>	<b>81</b>
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>7.1. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>83</b>
<b>7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Fatores que afetam o conforto higrotérmico (adaptado de [2]) .....	3
Fig.2.2 – Balanço térmico do corpo [5] .....	4
Fig.2.3 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da humidade absoluta [5] .....	5
Fig.2.4 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da temperatura exterior média ponderada (adaptado de [6]) .....	6
Fig.2.5 – Esquema de organização interna do EnergyPlus [8] .....	8
Fig.2.6 – Ambiente de trabalho do DesignBuilder (adaptado de [10]) .....	9
Fig.3.1 – Localização do edifício em estudo .....	11
Fig.3.2 – Planta do piso 0 .....	12
Fig.3.3 – Planta do piso 1 .....	12
Fig.3.4 – Alçado noroeste .....	13
Fig.3.5 – Alçado nordeste .....	13
Fig.3.6 – Alçado sudeste .....	13
Fig.3.7 – Alçado sudoeste .....	13
Fig.3.8 – Desenho de pormenor das paredes exteriores .....	14
Fig.3.9 – Desenho de pormenor das paredes interiores .....	14
Fig.3.10 – Desenho de pormenor do pavimento térreo .....	14
Fig.3.11 – Desenho de pormenor da laje que faz a divisão do piso 0 com o piso 1 .....	15
Fig.3.12 – Desenho de pormenor da cobertura .....	15
Fig.3.13 – Pormenor de ligação na zona das grelhas de admissão natural de ar .....	15
Fig.3.14 – Pormenor de ligação na zona opaca .....	16
Fig.3.15 – Pormenor de ligação na zona da cobertura .....	16
Fig.3.16 – Sistemas de ventilação e climatização instalados no piso 1 .....	17
Fig.3.17 – Grelha de admissão natural de ar instalada na cantina .....	18
Fig.3.18 – Grelha de extração mecânica instalada na cantina .....	18
Fig.3.19 – Equipamento <i>Multi-Split</i> instalado no bar .....	19
Fig.3.20 – Grelhas de admissão de ar tapadas na zona do bar .....	19
Fig.3.21 – Local destinado a confeção de grelhados no grill .....	20
Fig.3.22 – Grelha de extração mecânica instalada na cozinha .....	20
Fig.3.23 – Exaustor instalado na cozinha .....	20
Fig.4.1 – Vista geral da estação meteorológica [12] .....	23

Fig.4.2 – Sensor Hobo Data Logger sobre a grelha de ventilação .....	24
Fig.4.3 – Posição dos sensores no piso 1 .....	25
Fig.4.4 – Criação do ficheiro climático TMY .....	28
Fig.4.5 – Variação da temperatura exterior ao longo do período de medição .....	28
Fig.4.6 – Variação das curvas de referência da temperatura exterior ao longo dos meses estudados .....	29
Fig.4.7 – Variação da temperatura exterior ao longo do período mais frio .....	29
Fig.4.8 – Variação da temperatura exterior ao longo do período mais quente .....	30
Fig.4.9 – Variação da humidade relativa ao longo do período de medição .....	31
Fig.4.10 – Variação da temperatura de ponto de orvalho ao longo do período de medição .....	32
Fig.4.11 – Variação da radiação global horizontal ao longo do período de medição .....	33
Fig.4.12 – Variação da radiação difusa horizontal ao longo do período de medição .....	33
Fig.4.13 – Variação da radiação direta normal ao longo do período de medição .....	34
Fig.4.14 – Variação da radiação direta normal ao longo de um dia .....	34
Fig.4.15 – Valores da temperatura medidos pelos sensores .....	35
Fig.4.16 – Variação da temperatura registada pelo sensor A .....	36
Fig.4.17 – Variação da temperatura na cantina .....	36
Fig.4.18 – Variação da temperatura no bar .....	37
Fig.4.19 – Variação da temperatura no grill .....	38
Fig.4.20 – Variação da temperatura na cozinha .....	38
Fig.4.21 – Variação da temperatura na cantina no dia 20 de fevereiro .....	39
Fig.4.22 – Variação da temperatura na cozinha no dia 20 de fevereiro .....	39
Fig.4.23 – Valores da humidade relativa medidos pelos sensores .....	40
Fig.4.24 – Variação da humidade relativa registada pelo sensor A .....	40
Fig.4.25 – Variação da humidade relativa na cantina .....	41
Fig.4.26 – Variação da humidade relativa no bar .....	41
Fig.4.27 – Variação da humidade relativa no grill .....	42
Fig.4.28 – Variação da humidade relativa na cozinha .....	42
Fig.4.29 – Anemómetro usado para registar a velocidade do ar .....	43
Fig.4.30 – Locais onde foi medida a velocidade do ar .....	44
Fig.4.31 – Valores de velocidade do ar para a admissão natural .....	45
Fig.4.32 – Valores médios e desvio padrão da temperatura medida pelos sensores .....	46
Fig.4.33 – Valores médios e desvio padrão da temperatura em cada zona .....	47

Fig.4.34 – Valores médios e desvio padrão da humidade relativa medida pelos sensores .....	47
Fig.4.35 – Valores médios e desvio padrão da humidade relativa em cada zona .....	48
Fig.4.36 – Valores de temperatura medidos pela estação meteorológica e pelo sensor A .....	49
Fig.4.37 – Valores de humidade relativa medidos pela estação meteorológica e pelo sensor A .....	49
Fig.4.38 – Correlação linear entre o bar e a cantina para os valores de temperatura .....	52
Fig.4.39 – Correlação linear entre o grill e a cantina para os valores de temperatura .....	53
Fig.4.40 – Correlação linear entre a cozinha e a cantina para os valores de temperatura .....	53
Fig.4.41 – Correlação linear entre o bar e a cantina para os valores de humidade relativa .....	54
Fig.4.42 – Correlação linear entre o grill e a cantina para os valores de humidade relativa .....	54
Fig.4.43 – Correlação linear entre a cozinha e a cantina para os valores de humidade relativa .....	55
Fig.4.44 – Avaliação do conforto térmico na cantina usando o modelo gráfico da ASHRAE 55 .....	56
Fig.4.45 – Avaliação do conforto térmico no bar usando o modelo gráfico da ASHRAE 55 .....	56
Fig.4.46 – Avaliação do conforto térmico no grill usando o modelo gráfico da ASHRAE 55 .....	57
Fig.4.47 – Avaliação do conforto térmico na cozinha usando o modelo gráfico da ASHRAE 55 .....	57
Fig.4.48 – Avaliação do conforto térmico adaptativo na cantina usando o modelo da ISO 15251 .....	58
Fig.4.49 – Avaliação do conforto térmico adaptativo no bar usando o modelo da ISO 15251 .....	58
Fig.4.50 – Avaliação do conforto térmico adaptativo no grill usando o modelo da ISO 15251 .....	59
Fig.4.51 – Avaliação do conforto térmico adaptativo na cozinha usando o modelo da ISO 15251 .....	59
Fig.5.1 – Alçado noroeste .....	61
Fig.5.2 – Alçado nordeste .....	62
Fig.5.3 – Alçado sueste .....	62
Fig.5.4 – Alçado sudoeste .....	62
Fig.5.5 – Modelo 3D do edifício em estudo .....	62
Fig.5.6 – Divisão do piso 1 por zonas .....	63
Fig.5.7 – Perfil de ocupação do edifício .....	65
Fig.5.8 – Introdução dos ganhos de calor resultantes dos equipamentos .....	66
Fig.5.9 – Introdução da iluminação .....	67
Fig.5.10 – Regime de renovação de ar na zona da cantina .....	67
Fig.5.11 – Regime de renovação de ar na zona do grill .....	68
Fig.5.12 – Regime de renovação de ar na zona do bar .....	68
Fig.5.13 – Regime de renovação de ar na zona da cozinha .....	69
Fig.5.14 – Variação da temperatura real e simulada na cantina .....	70
Fig.5.15 – Variação da temperatura real e simulada no bar .....	71

Fig.5.16 – Variação da temperatura real e simulada no grill.....	71
Fig.5.17 – Variação da temperatura real e simulada na cozinha.....	72
Fig.6.1 – Variação em regime livre da temperatura na simulação base e na alternativa A.....	74
Fig.6.2 – Variação em regime livre da temperatura na simulação base e na alternativa B.....	75
Fig.6.3 – Variação em regime livre da temperatura na simulação base e na alternativa C.....	75
Fig.6.4 – Diferenças entre a simulação base e as três alternativas de intervenção.....	76
Fig.6.5 – Variação condicionada da temperatura na simulação base e na alternativa A.....	77
Fig.6.6 – Variação condicionada da temperatura na simulação base e na alternativa B.....	77
Fig.6.7 – Variação condicionada da temperatura na simulação base e na alternativa C.....	78
Fig.6.8 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na simulação base.....	79
Fig.6.9 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na alternativa A.....	79
Fig.6.10 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na alternativa B.....	80
Fig.6.11 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na alternativa C.....	80

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores limite da zona de conforto segundo a norma EN 15251 (adaptado de [6]) .....	6
Quadro 2.2 – Valores de alguns tipos de edifícios (adaptado de [4]) .....	7
Quadro 3.1 – Valores de Rph para a extração mecânica .....	21
Quadro 3.2 – Número de lugares sentados em cada zona .....	22
Quadro 3.3 – Diferentes tipos de ocupação ao longo de um dia .....	22
Quadro 4.1 – Dados relevantes para simulação .....	26
Quadro 4.2 – Valores estatísticos da variação da humidade relativa .....	31
Quadro 4.3 – Valores estatísticos da temperatura de ponto de orvalho .....	32
Quadro 4.4 – Valores da velocidade do ar da extração mecânica .....	44
Quadro 4.5 – Valores da velocidade do ar de admissão natural .....	45
Quadro 4.6 – Valores característicos de cada zona durante o período de medição .....	50
Quadro 5.1 – Elementos construtivos e suas propriedades .....	64
Quadro 5.2 – Ocupação das diferentes zonas .....	65
Quadro 6.1 – Valores estatísticos da temperatura de cada simulação .....	76
Quadro 6.2 – Energia de climatização necessária para cada solução .....	80



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$\overline{X}_{obs}$  - Média dos valores observados

$T_{\infty}$  - Temperatura exterior [K]

$A_{grelha}$  - Área da grelha de ventilação [m<sup>2</sup>]

$A_i$  - Área superficial [m<sup>2</sup>]

$C_p$  - Calor específico [J/kg.K]

$C_{pair}$  - Calor específico do ar [J/kg.K]

CT - Fator de ponderação da transferência de calor [K/m<sup>3</sup>]

e - Espessura [m]

h - Altura solar

$h_i$  - Coeficiente de troca de calor [W/m<sup>2</sup>.K]

HR - Humidade relativa [%]

Hre - Humidade relativa exterior [%]

Hri - Humidade relativa interior [%]

$I_{dh}$  - Radiação difusa horizontal [W/m<sup>2</sup>]

$I_{gh}$  - Radiação global horizontal [W/m<sup>2</sup>]

$I_i$  Radiação direta normal [W/m<sup>2</sup>]

$\lambda$  - Coeficiente de condutibilidade térmica [W/m.°C]

$\lambda$  - Latitude [°]

$L_{ml}$  - Longitude do local [°]

$L_{ms}$  - Longitude do meridiano central do fuso horário a que o local está vinculado [°]

$m_i$  - Fluxo de ar no nó i [kg/s]

$m_{inf}$  - Massa de ar infiltrado [kg/s]

n - Numero de valores

$N_{surfaces}$  - Número total de superfícies na zona

$N_{zones}$  - Número de zonas

$P_e$  - Pressão exterior [Pa]

$P_i$  - Pressão interior [Pa]

$P_{se}$  - Pressão de saturação exterior [Pa]

$P_{si}$  - Pressão de saturação interior [Pa]

Q - Caudal [m<sup>3</sup>/h]

$Q_i$  - Ganhos internos por convecção [J/s]

Q<sub>sys</sub> - Taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W/s]

R<sub>ph</sub> - Renovações horárias [h<sup>-1</sup>]

T - Temperatura [°C]

T<sub>d</sub> - Temperatura de Ponto de Orvalho [°C]

T<sub>e</sub> - Temperatura exterior [°C]

T<sub>i</sub> - Temperatura interior [°C]

T<sub>L</sub> - Tempo local

T<sub>mp</sub> - Temperatura média exterior ponderada dos últimos 7 dias [°C]

T<sub>n-1</sub> - Temperatura média exterior do dia anterior i [°C]

T<sub>op<sub>conforto</sub></sub> - Temperatura operativa de conforto [°C]

T<sub>si</sub> - Temperatura da superfície exterior [K]

T<sub>z</sub> - Temperatura da zona [K]

T<sub>zi</sub> - Temperatura da zona i [K]

U - Coeficiente de transmissão térmica [W/m<sup>2</sup>.°C]

v - Velocidade [m/s]

V - Volume [m<sup>3</sup>]

X<sub>model,i</sub> - Valores previstos pelo modelo

X<sub>obs,i</sub> - Valores observados

ρ - Densidade aparente [Kg/m<sup>3</sup>]

ρ<sub>air</sub> - Massa volúmica do ar [kg/m<sup>3</sup>]

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

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar - Condicionado

BLAST - Building Loads Analysis and System Thermodynamics

DXF - Drawing Exchange Format

EN - Comité Européen de Normalisation

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

ISO - International Organization for Standardization

NRMSE - Normalized Root Mean Square Error

RMSE - Root Mean Square Error

SASUP - Serviços de Ação Social da Universidade do Porto

TMY - Typical Meteorological Year

USB - Universal Serial Bus

Abr - Abril

Fev - Fevereiro

Fig - Figura

inf - Inferior

Jan - Janeiro

Mai - Maio

Mar - Março

Méd - Média

nº - Número

P10 - Percentil 10

P90 - Percentil 90

sup - Superior

Vel. - Velocidade



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

As cantinas universitárias são espaços de eleição para a comunidade estudantil pela relação qualidade/preço que oferecem.

Inicialmente o conforto não era visto como um fator relevante na conceção destes espaços. No entanto, com a evolução da construção houve um aumento das exigências. Atualmente um espaço de alimentação não se pode restringir apenas à qualidade dos serviços prestados, é igualmente necessário que seja assegurado o conforto dos seus utilizadores.

O conforto higrotérmico assume cada vez mais importância na qualidade da construção, sendo que está relacionado com o grau de satisfação dos ocupantes. Torna-se assim necessário caracterizar o conforto higrotérmico dos edifícios existentes.

O presente trabalho visa avaliar as condições higrotérmicas no interior da cantina da FEUP, medindo e descrevendo o clima interior do edifício onde está implantada a cantina. Partindo dessas informações e com o auxílio de programas de simulação em regime dinâmico são apresentadas alternativas de intervenção de modo a melhorar o conforto higrotérmico da cantina.

### 1.2. OBJETIVOS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivos principais:

- Avaliar o conforto higrotérmico na cantina da FEUP;
- Simular possíveis alternativas de intervenção.

Para atingir os objetivos principais, foram definidos vários objetivos parciais:

- Adquirir competências na modelação e simulação de modelos usando o DesignBuilder;
- Criar um ficheiro climático usando dados obtidos pela estação meteorológica da FEUP;
- Analisar os elementos de projeto do caso de estudo;
- Monitorizar a temperatura e humidade relativa no interior do edifício utilizando sensores;
- Descrever e analisar o clima interior do edifício usando os modelos propostos pela ASHRAE 55 e pela EN 15251;
- Modelar e simular a situação real do edifício em estudo, utilizando o DesignBuilder;
- Validar o modelo de simulação comparando a temperatura na simulação e medida in-situ;
- Propor e simular alternativas de intervenção partindo do modelo validado.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos.

No capítulo 1 é feito o enquadramento do tema, definem-se os objetivos a atingir e descreve-se a organização do respetivo texto.

No capítulo 2 apresentam-se as noções base que suportam o trabalho desenvolvido, tais como: avaliação do conforto higrotérmico e descrição dos programas de simulação, nomeadamente o EnergyPlus e o DesignBuilder.

No capítulo 3 é exposto o caso de estudo, que consiste no edifício onde está implantada a cantina da FEUP, localizado no Porto. São apresentados elementos de projeto tais como: plantas, alçados, cortes, elementos construtivos e sistema de ventilação. Neste capítulo é ainda caracterizada a ocupação do edifício.

No capítulo 4 é feita a descrição do clima exterior e interior do edifício em estudo. Inicialmente é apresentado o plano de medição seguindo-se a apresentação dos resultados, onde para o clima exterior os parâmetros climáticos descritos são: temperatura exterior, humidade relativa, temperatura ponto de orvalho e radiação solar, no caso do clima interior os parâmetros medidos são a temperatura, humidade relativa e velocidade do ar. Posteriormente é feita a análise de resultados para cada zona do edifício usando modelos de avaliação do conforto térmico.

No capítulo 5 é efetuada a simulação térmica do modelo base, sendo descrita a modelação do edifício, nomeadamente a geometria, os elementos construtivos, os ganhos internos e a ventilação. Neste capítulo é ainda apresentada a validação do modelo através da comparação da temperatura na simulação com a temperatura medida *in-situ*.

No capítulo 6 apresentam-se algumas alternativas de intervenção para melhorar o conforto higrotérmico na cantina. São efetuadas simulações em regime livre e condicionadas de modo a analisar a adequabilidade de cada alternativa.

No capítulo 7 referem-se as conclusões gerais tiradas ao longo desta dissertação.

# 2

## FUNDAMENTOS

### 2.1. AVALIAÇÃO DO CONFORTO HIGROTÉRMICO

#### 2.1.1. INTRODUÇÃO

O conforto higrotérmico é intrinsecamente responsável pelo sentimento de bem-estar do ser humano, não dependendo apenas de fatores físicos, tais como temperatura ambiente, humidade relativa e velocidade do ar mas também de fatores pessoais como metabolismo, tipo de roupa e em menor medida, do género e sensibilidade térmica [1]. A Figura 2.1 contém fatores básicos que afetam o conforto.

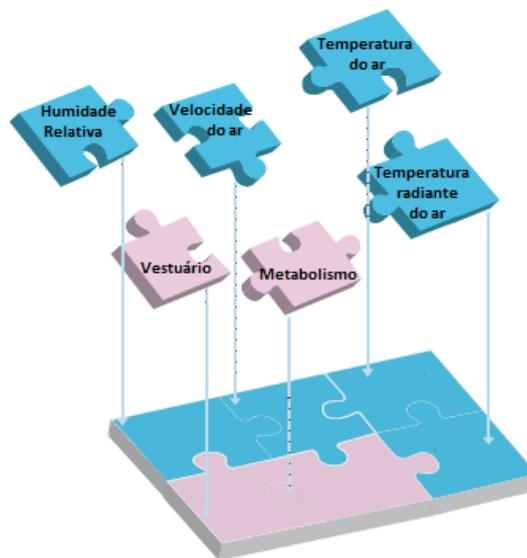


Fig.2.1 – Fatores que afetam o conforto higrotérmico (adaptado de [2])

O desempenho higrotérmico de um edifício está diretamente relacionado com a qualidade do seu ambiente interior, nomeadamente através do nível de conforto térmico que proporciona aos seus ocupantes [3].

Segundo a norma ASHRAE 55 o conforto térmico é definido como a condição mental de manifestar satisfação com o ambiente térmico, havendo grandes variações de pessoa para pessoa, tanto fisiologicamente como psicologicamente, uma vez que as condições necessárias para o conforto não são as mesmas para todas as pessoas [2].

Para quantificar o conforto de acordo com a norma ISO 7730 recorre-se à equação de conforto térmico que permite calcular o termo de acumulação de energia no corpo,  $S$ , correspondendo à diferença entre o metabolismo e a transferência de calor para o ambiente, sendo apresentada na equação (2.1) [4].

$$S = M + W \pm R \pm C \pm K - E \pm Re_s \quad (2.1.)$$

Em que os as variáveis da equação se encontram na Figura 2.2.

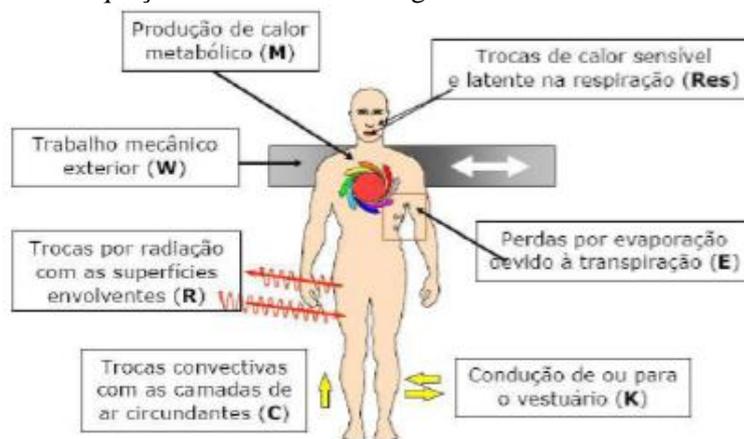


Fig.2.2 – Balanço térmico do corpo [5]

Este conjunto de variáveis permite que o corpo mantenha a sua temperatura aproximadamente constante com o valor de 36°C.

Por vezes variações de temperatura localizadas podem provocar desconforto aos utilizadores. Na norma ASHRAE 55 são expostos alguns fenómenos que provocam variações significativas no ambiente interior, tais como [2]:

- Correntes de ar;
- Assimetria de temperaturas de radiação;
- Assimetrias verticais de radiação;
- Pavimento excessivamente frio ou quente.

### 2.1.2. MODELOS DE CONFORTO

A norma ASHRAE 55 sugere um método gráfico para avaliar o conforto térmico de ambientes interiores, sendo apenas aplicado a espaços em que a atividade metabólica dos ocupantes se encontre no intervalo de 1,0 a 1,3 met, com uma resistência térmica fornecida pela roupa que varie entre 0,5 clo no Inverno e 1,0 clo no Verão, sendo a velocidade do ar menor do que 0,2 m/s [2]. Na Figura 2.3 encontra-se o método gráfico de avaliação do conforto térmico.

As zonas indicadas na Figura 2.3 correspondem a uma situação de conforto térmico para 80% dos ocupantes, resultante do efeito conjunto de 10% de insatisfeitos devido a desconforto referente ao balanço térmico do global e os restantes 10% referentes a situações de desconforto térmico localizado [5].

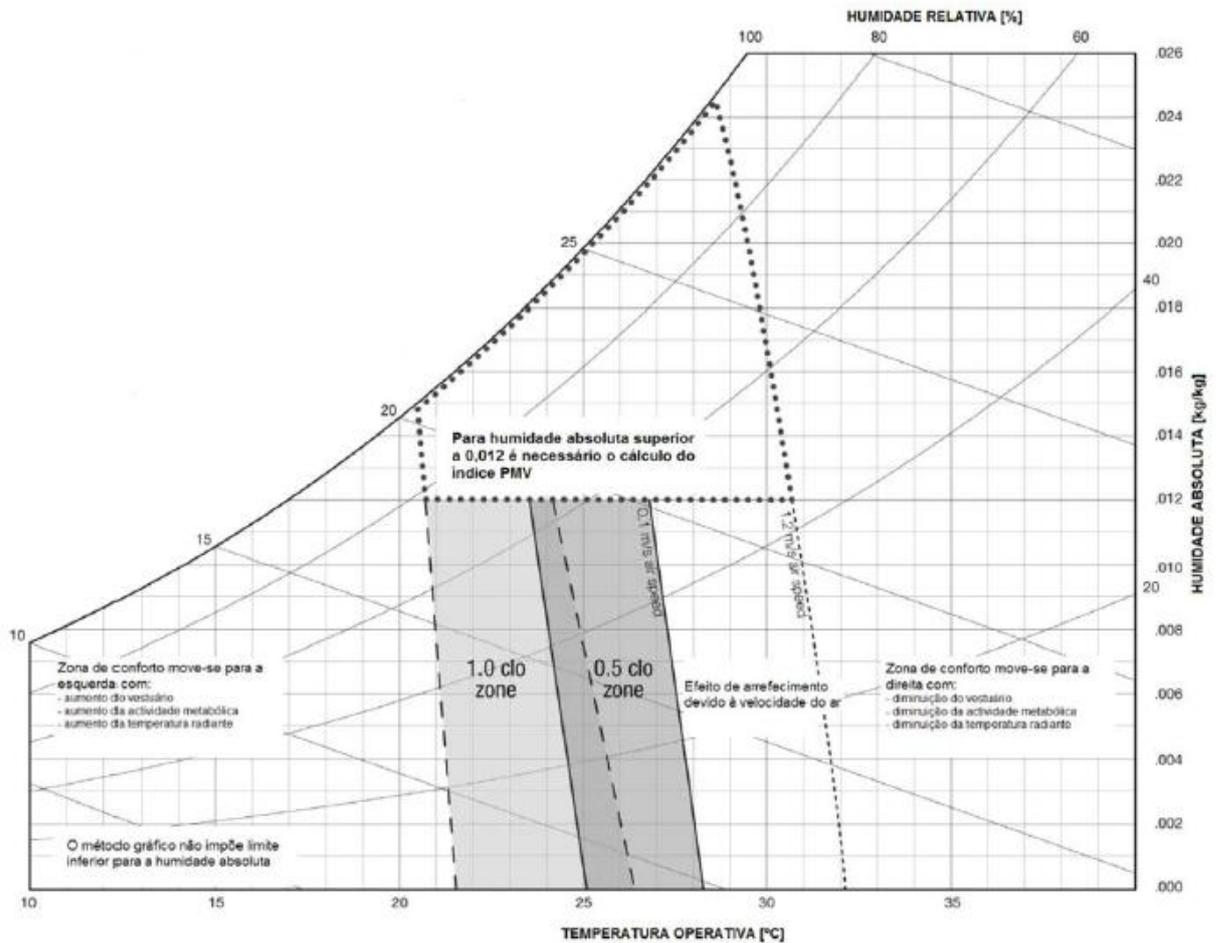


Fig.2.3 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da humidade absoluta [5]

Outro processo de avaliar o conforto térmico é o modelo adaptativo sugerido pela norma EN 152251, no qual a temperatura operativa de conforto é definida pela equação (2.2) [6].

$$Top_{conforto} = 0,33 \cdot Tmp + 18,8 \tag{2.2}$$

Onde:

$Tmp$  - Temperatura exterior média ponderada dos últimos 7 dias [°C];

A temperatura exterior ponderada é calculada pela equação (2.3).

$$Tmp = \frac{T_{n-1} + 0,8 \cdot T_{n-2} + 0,6 \cdot T_{n-3} + 0,5 \cdot T_{n-4} + 0,4 \cdot T_{n-5} + 0,3 \cdot T_{n-6} + 0,2 \cdot T_{n-7}}{3,8} \tag{2.3}$$

Onde:

$T_{n-i}$  - Temperatura média exterior do dia anterior  $i$  [°C]

Trata-se de um método gráfico no qual a zona de conforto é limitada por afastamentos em relação à temperatura operativa de conforto em função da classe de exigência de conforto térmico exigida. A Figura 2.4 contém o gráfico do modelo adaptativo de avaliação do conforto para edifícios sem sistemas de arrefecimento mecânico [6].

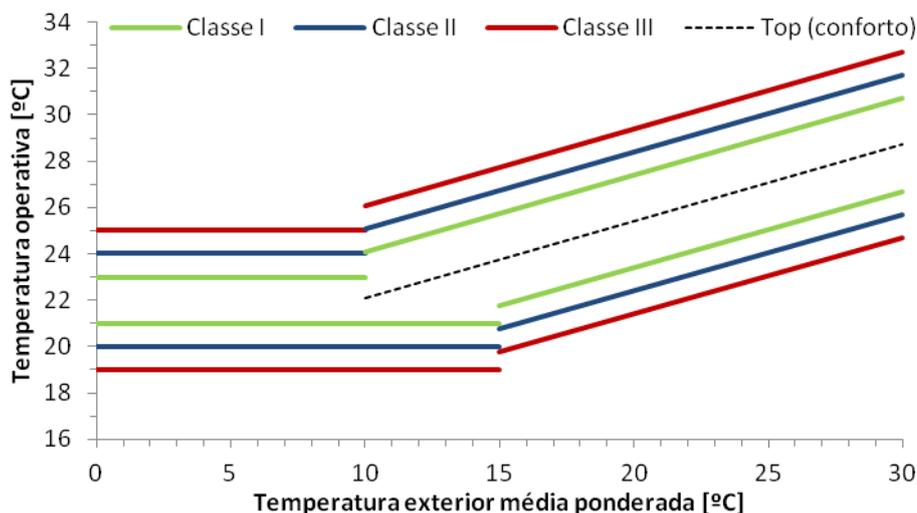


Fig.2.4 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da temperatura exterior média ponderada (adaptado de [6])

O modelo é usado quando a temperatura exterior média ponderada é superior a 15°C para o limite inferior, e superior a 10°C para o limite superior. Abaixo dessas temperaturas os valores que limitam a zona de conforto térmico são considerados como se o edifício fosse climatizado [6]. No Quadro 2.1 encontram-se os valores que limitam a zona de conforto em função da classe de exigência. Os valores são referentes a espaços tais como: cantinas, restaurantes e cafetarias.

Quadro 2.1 – Valores limite da zona de conforto segundo a norma EN 15251 (adaptado de [6])

Categoria	Edifício climatizado limite		Afastamento da Top (conforto)		Aceitabilidade [%]
	inf	sup	inf	sup	
I	21	23	-2	+2	94
II	20	24	-3	+3	90
III	19	25	-4	+4	85
IV	-	-	-	-	<85

Na categoria I 94 % dos ocupantes encontram-se satisfeitos, sendo o conforto térmico elevado. O nível de conforto decresce nas restantes categorias, sendo que na categoria II 90 % dos ocupantes estão satisfeitos e na categoria III o número de satisfeitos baixa para 85 %. A categoria IV encontra-se fora da zona de conforto.

### 2.1.3. CONFORTO HIGROTÉRMICO EM CANTINA UNIVERSITÁRIA

Devido à falta de estudos realizados sobre o conforto higrotérmico em cantinas ou espaços com ocupação semelhante, neste ponto apenas serão apresentados valores consultados em normas que limitam alguns dos fatores relativos ao nível de conforto.

Em relação ao conforto térmico, foram seguidos os valores das normas ISO 7730 e ASHRAE 55. O Quadro 2.2 contém valores de projeto de alguns tipos de edifício, no qual se encontra a cantina.

Quadro 2.2 – Valores de alguns tipos de edifícios (adaptado de [4])

Tipo de edifício/espço	Atividade [W/m <sup>2</sup> ]	Categoria	Temperatura Operativa [°C]		Máximo da temperatura média do ar [m/s]	
			Verão	Inverno	Verão	Inverno
Escritório	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
Sala de conferência		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Auditório						
Cantina/Restaurante		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21
Sala de aula						

Como se pode visualizar a cantina corresponde à categoria C, pelo que os valores de conforto local serão atribuídos em função dessa mesma categoria. Assim, ainda segundo as normas anteriores os valores a partir dos quais os utilizadores sentem desconforto são os seguintes [4]:

- Assimetria de temperaturas de radiação: teto quente < 7°C; teto frio < 18°C; parede quente < 35°C; parede fria < 13°C;
- Diferença de temperatura do ar na vertical < 4°C;
- Temperatura no pavimento > 17 e < 31°C.

Os valores presentes nas normas permitem construir um ambiente interior de referência que proporciona aos seus utilizadores níveis aceitáveis de conforto higrotérmico.

## 2.2. SIMULAÇÃO TÉRMICA

### 2.2.1. INTRODUÇÃO

Existem no mercado vários programas de simulação térmica, como é o caso do EnergyPlus.

O programa EnergyPlus deriva dos programas *BLAST* e *DOE-2*, desenvolvidos e lançados no final dos anos 70 e início dos anos 80, para dar resposta a crise energética da década de 70. Ambos os programas tentam resolver o mesmo problema partindo de duas perspetivas ligeiramente diferentes. Assim o EnergyPlus tem como objetivo analisar o consumo de energia e a carga térmica de um edifício ao longo de um período de tempo com base na perspetiva física do edifício associada aos respetivos sistemas mecânicos [7].

O programa dispõe de várias características e funcionalidades das quais se destacam [7]:

- Definição dos intervalos de tempo para interação entre zonas térmicas, o ambiente e os sistemas AVAC;
- Simulação em intervalos de tempo entre 10 minutos e 1 hora utilizando dados climáticos horários do clima local;
- Ficheiros de *input* e *output* em ASCII;
- Troca de calor por condução entre os vários elementos construtivos;
- Melhoria nas transferências de calor com o solo usado modelos tridimensionais;
- Transferência de massa combinando humidade relativa com a adsorção/desadsorção;
- Modelos de conforto térmico baseados na atividade, temperatura de bolbo seco e humidade;
- Modelação de janelas e biblioteca comercial com vários tipos de janelas;
- Controlo da iluminação;
- ConFIGuração de sistemas AVAC.

O EnergyPlus é uma compilação de vários módulos que trabalham juntos para calcular a energia de aquecimento e arrefecimento que um edifício necessita, permitindo através do *output* de sistemas e plantas um impacto direto na carga térmica do edifício, em vez de calcular as cargas térmicas e simular em seguida os sistemas e plantas. A simulação é acoplada permitindo investigar com mais precisão o impacto no conforto térmico dos ocupantes. Na Figura 2.5 encontra-se representado o diagrama da interceção dos diferentes módulos [7].

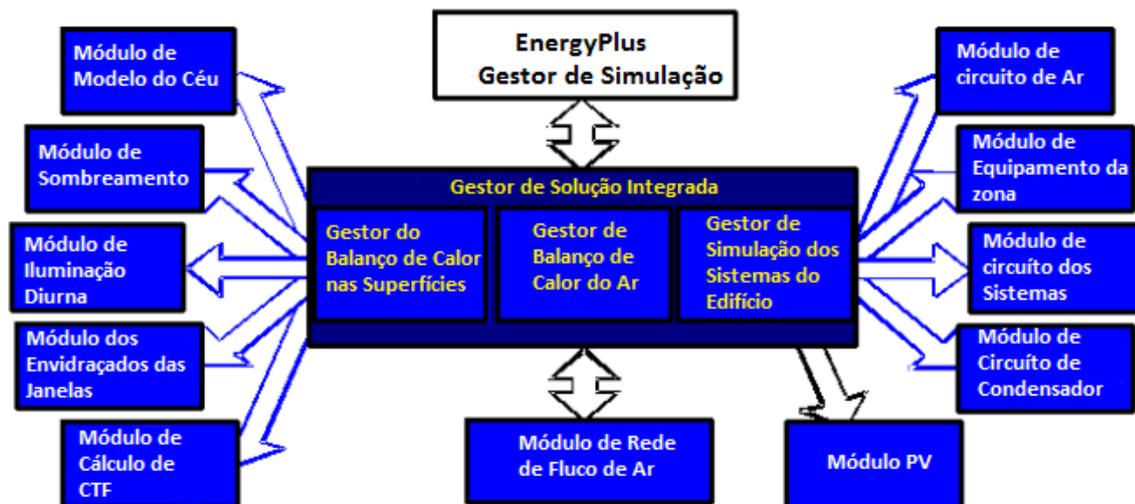


Fig.2.5 – Esquema de organização interna do *EnergyPlus* [8]

Apesar das vantagens apresentadas, o EnergyPlus não é muito intuitivo no que diz respeito à introdução de dados, nomeadamente geométricos, contudo existem programas que usam o EnergyPlus como ferramenta de simulação dinâmica, mas onde a introdução dos dados se torna mais simples, como é o caso do DesignBuilder.

O DesignBuilder é um *software* em que a interface permite introduzir dados de forma rápida e precisa contribuindo para ganhos significativos de produtividade, no qual se destacam as seguintes características [9]:

- Criação rápida de modelos 3D de edifícios, permitindo importar plantas e usar ferramentas de desenho;

- Divisão o edifício por zonas usando ferramentas próprias;
- Introdução de sistemas (AVAC, águas sanitárias e iluminação) com facilidade para todo o edifício ou para cada zona;
- Visualização gráfica do modelo em 3D;
- Introdução de ganhos da atividade de forma rápida e fácil;
- Facilidade na exportação dos resultados das simulações.

Na Figura 2.6 encontra-se o ambiente de trabalho do DesignBuilder.



Fig.2.6 – Ambiente de trabalho do *DesignBuilder* (adaptado de [10])

## 2.2.2. MODELO DE CÁLCULO

O EnergyPlus permite calcular inúmeras variáveis dispondo de uma vasta lista de modelos de cálculo, contudo, apenas serão descritos os modelos mais relevantes para a realização deste estudo, sendo referenciada a formulação matemática do modelo da temperatura interior.

É efetuado um balanço térmico onde são incluídas as componentes que traduzem as trocas de calor com uma dada zona. A equação (2.4) traduz a formulação inicial de equilíbrio térmico [11].

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (2.4.)$$

Onde:

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

$\rho_{air}$  - Massa volúmica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$C_p^{air}$  - Calor específico do ar [J/kg.K];

$C_T$  - Fator de ponderação da transferência de calor [K/m<sup>3</sup>]

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  - Somatório das cargas internas convectivas;

$Q_i$  - ganhos internos por convecção [J/s];

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  - Transferência de calor por convecção da superfície das zonas;

$h_i$  - Coeficiente de troca de calor [W/m<sup>2</sup>.K];

$A_i$  - Área superficial [m<sup>2</sup>];

$T_{si}$  - Temperatura da superfície exterior [K];

$T_z$  - Temperatura da zona [K];

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

$\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z)$  - Transferência de calor devido a infiltração do ar exterior;

$m_{inf}$  - Massa de ar infiltrado [kg/s];

$T_\infty$  - Temperatura exterior [K];

$C_p$  - Calor específico [J/kg.K];

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  - Transferência de calor devido a mistura de ar entre zonas;

$T_{zi}$  - Temperatura da zona i [K];

$m_i$  - Fluxo de ar no nó i [kg/s];

$N_{zones}$  - Número de zonas;

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

Para calcular a temperatura de cada zona o programa usa a equação (2.5) definida pelo Método de Euler [12].

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_\infty + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply} - \left(\frac{C_z}{\delta t}\right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta t}\right)}{\left(\frac{11}{6}\right) \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C} \quad (2.5.)$$

## 3

## CASO DE ESTUDO

## 3.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

## 3.1.1. IMPLANTAÇÃO

O edifício em estudo é um espaço de restauração destinado a servir a comunidade da FEUP. Este espaço tem como principal atividade a cantina da faculdade funcionando da mesma forma que as restantes cantinas da Universidade do Porto. No entanto, o edifício não se restringe apenas à comum cantina universitária, existindo no seu interior serviços alternativos como o grill e o bar com ementas e preços próprios, aumentando assim a variedade de oferta aos utilizadores. Apesar dos diferentes propósitos dos serviços aqui existentes, a confeção de todas as refeições cinge-se a uma cozinha única.

O órgão responsável pelo edifício e sua respetiva manutenção são os Serviços de Ação Social da Universidade do Porto (SASUP).

O edifício localiza-se na rua Dr. Roberto Frias, Paranhos, Porto (Figura 3.1).

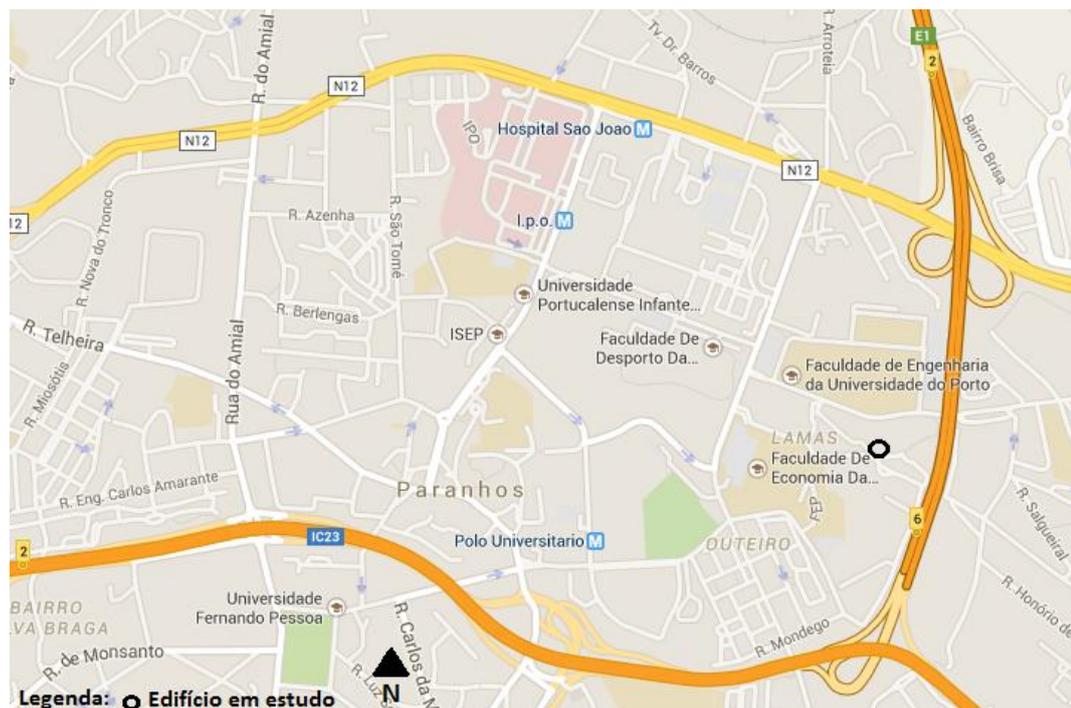


Fig.3.1 – Localização do edifício em estudo

Aquando da construção, este edifício estava ligeiramente isolado das habitações existentes, sendo totalmente amplo dos lados norte e oeste. A sul e a este era delimitado por estradas existindo algumas moradias do lado oposto das respetivas estradas. As habitações não criam zonas de sombra no edifício devido ao seu afastamento e altura reduzida. Nos últimos anos foi construído um edifício com uma altura considerável do lado sudoeste, que pode causar sombreamento em algumas zonas do edifício.

### 3.1.2. ARQUITETURA

O edifício é constituído por dois pisos. O piso 0 destinado a arrumações e o piso 1 destinado às atividades de restauração. Nas Figuras 3.2 e 3.3 encontram-se, respetivamente, as plantas do piso 0 e do piso 1.

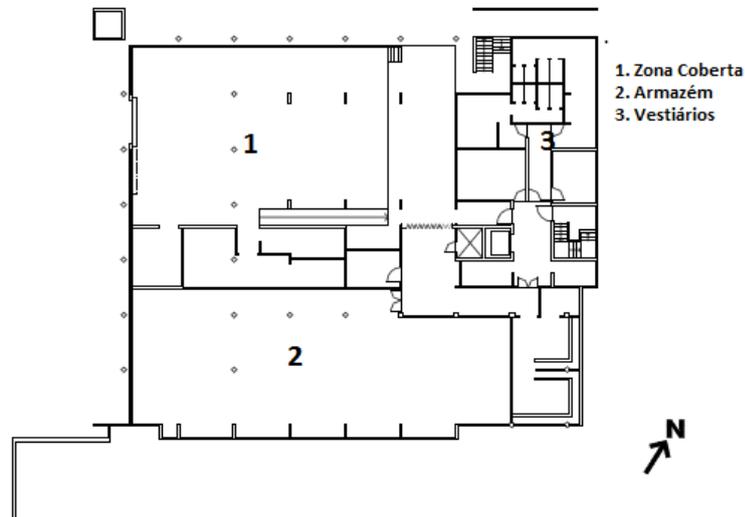


Fig.3.2 – Planta do piso 0

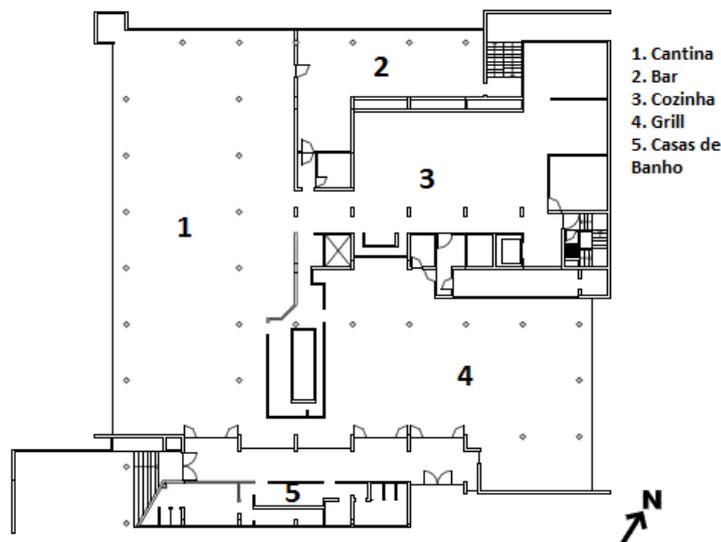


Fig.3.3 – Planta do piso 1

Como se pode verificar, os pisos têm áreas diferentes, sendo a área do piso 1 superior. Esta diferença resulta num corpo em balanço com cerca de 1.5 metros de comprimento ao longo das vistas noroeste e sudoeste. Na vista sudeste a área do piso 1 volta a ser maior, no entanto, neste caso não temos um corpo em balanço, mas sim parte do piso 1 em contacto com o solo. Em relação à vista nordeste os pisos encontram-se alinhados.

Na Figura 3.3 pode-se observar que o piso 1 se encontra dividido por zonas. Esta será a divisão que orientará todo o trabalho. A análise será efetuada sobre as seguintes zonas: cantina, bar, cozinha e grill.

As Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 contêm os alçados para uma melhor percepção da ligação do edificio ao terreno, da altura dos pisos e do posicionamento dos elementos de sombreamento.

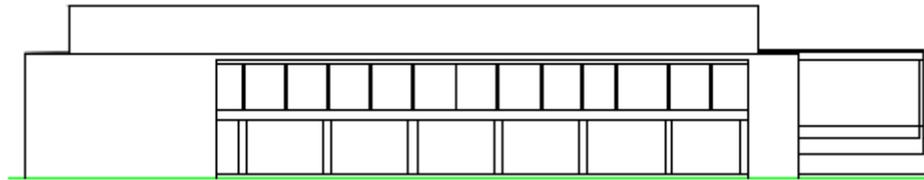


Fig.3.4 – Alçado noroeste

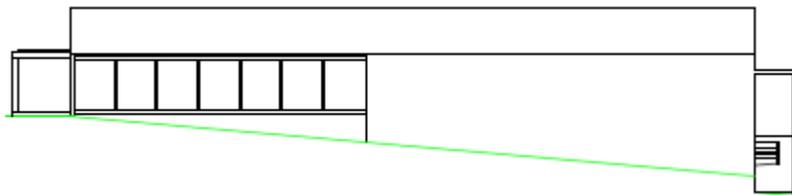


Fig.3.5 – Alçado nordeste

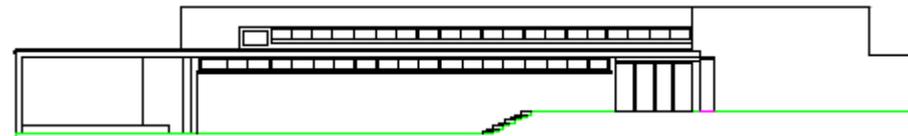


Fig.3.6 – Alçado sudeste



Fig.3.7 – Alçado sudoeste

É possível observar que todo o piso 0 está em contacto com o terreno. O mesmo não acontece no piso 1 em que apenas, junto ao alçado sudeste, há contacto com o solo. As paredes exteriores do piso 1 não intercetam o terrenos estando apenas em contato com o ar exterior. No piso 0 existem algumas paredes que apenas intercetam pequenas porções do solo e as restantes funcionam como muros de suporte, estando totalmente em contacto com o terreno.

No que diz respeito ao pé direito, o piso 0 apresenta uma pequena variação da zona coberta para o espaço onde se localizam os armazéns, por sua vez o pé direito do piso 1 varia consideravelmente. Essa variação é provocada essencialmente pela existência de uma zona na cobertura onde estão instalados os ventiladores.

### 3.1.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Nos dados de projeto estavam incluídos alguns desenhos de pormenor. Através da análise desses desenhos e com auxílio do caderno de encargos foi possível saber qual a constituição dos vários elementos construtivos. Apenas serão referenciados os elementos necessários para efetuar a modelação do edifício. Os desenhos de pormenor representativos desses mesmos elementos encontram-se nas Figuras 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12.

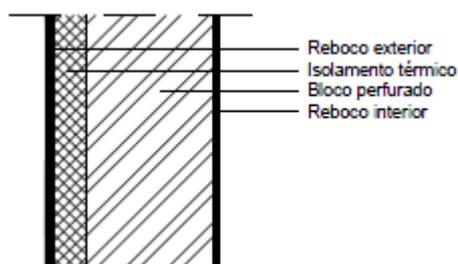


Fig.3.8 – Desenho de pormenor das paredes exteriores

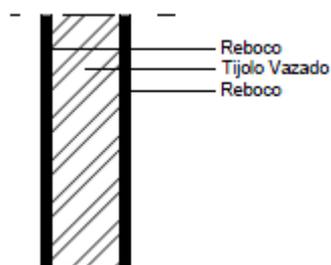


Fig.3.9 – Desenho de pormenor das paredes interiores

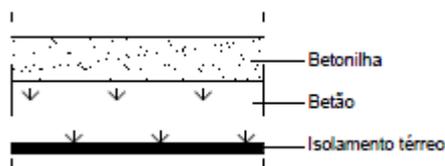


Fig.3.10 – Desenho de pormenor do pavimento térreo

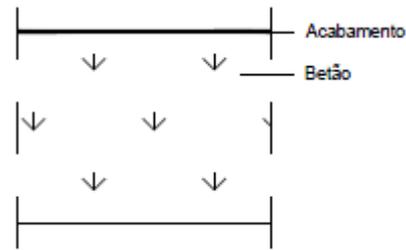


Fig.3.11 – Desenho de pormenor da laje que faz a divisão do piso 0 com o piso 1

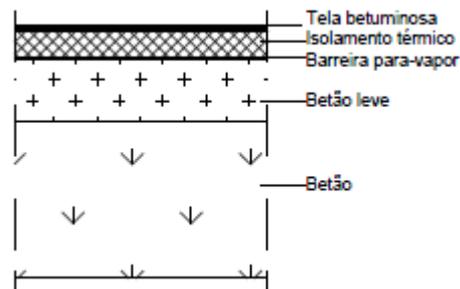


Fig.3.12 – Desenho de pormenor da cobertura

O edifício apresenta uma considerável área envidraçada sendo que estes são constituídos por um vidro simples, laminado, incolor, liso, translúcido de 8 mm de espessura e respetiva caixilharia em alumínio fixa sem corte térmico.

Na Figura 3.13 pode-se visualizar a ligação dos vidros à caixilharia de alumínio, bem como a posição das grelhas de admissão natural de ar ao longo do corpo em balanço.

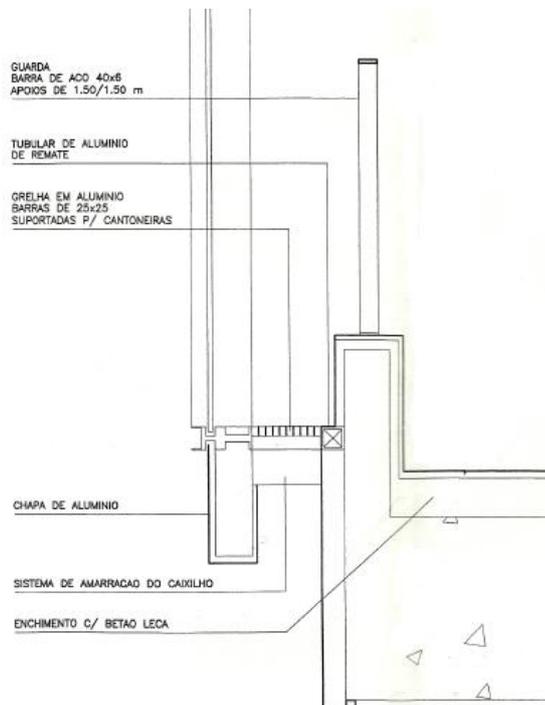


Fig.3.13 – Pormenor de ligação na zona das grelhas de admissão natural de ar

Como se pode ver pela Figura 3.8 o isolamento térmico está colocado pelo lado exterior. Na zona opaca exterior o isolamento não apresenta descontinuidades, contribuindo assim para a inexistência de pontes térmicas. A Figura 3.14 evidencia a continuidade do isolamento térmico na zona opaca mais propriamente na laje de separação dos dois pisos que compõem o edifício.

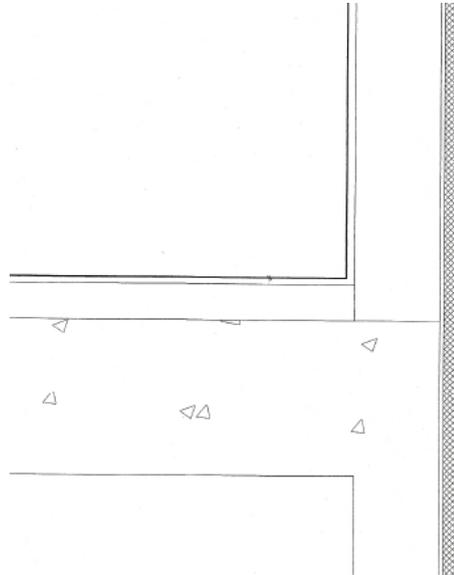


Fig.3.14 – Pormenor de ligação na zona opaca

Na Figura 3.15 é representada a ligação das paredes exteriores à cobertura, evidenciando a continuidade do isolamento térmico.

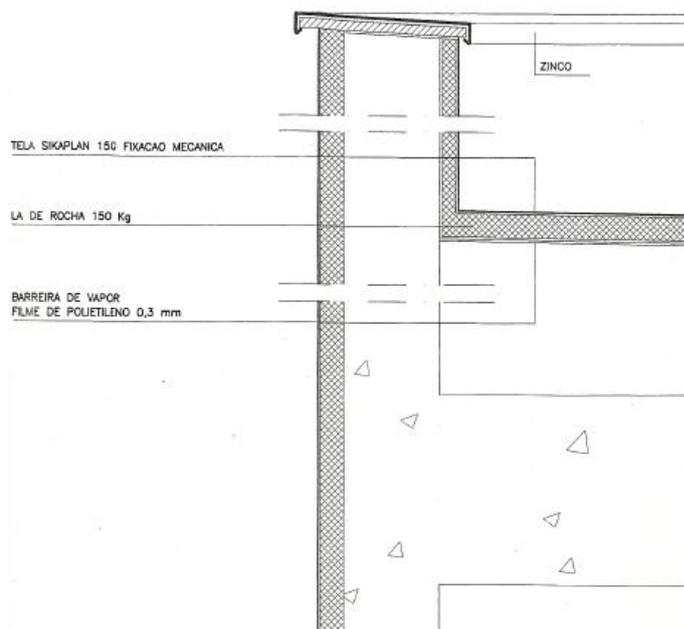


Fig.3.15 – Pormenor de ligação na zona da cobertura

Como se pode observar nos pormenores de ligação, houve alguma preocupação em assegurar a continuidade do isolamento térmico, de modo a evitar a existência de pontes térmicas, assegurando assim um melhor comportamento do edifício do ponto de vista térmico.

### 3.2. SISTEMAS

O conforto higrotérmico no interior dos edifícios pode melhorar com a existência de alguns sistemas, nomeadamente: de aquecimento, arrefecimento e renovação de ar, condicionando a variação do clima e assegurando uma melhor qualidade do ar.

No presente caso de estudo, a renovação de ar assume particular importância, uma vez que se trata de uma unidade de restauração onde existe elevada produção de vapor. Foi adotado um sistema de ventilação mista, no qual há admissão de ar natural e mecânica combinada com extração mecânica. Em relação aos sistemas de aquecimento e arrefecimento são praticamente inexistentes, existindo apenas dois *Multi-Split* na zona do bar.

Como já foi referido anteriormente, os dois pisos do edifício apresentam características muito distintas. No que toca à renovação de ar, o piso 0 pode-se dividir em duas zonas, uma que está em contacto direto com o ambiente exterior, sendo apenas coberta e sem paredes exteriores e outra, delimitada pela envolvente exterior do edifício, na qual existem infiltrações e extrações. No entanto, apenas o piso 1 será abordado mais profundamente uma vez que é neste piso que se encontram as zonas que serão analisadas ao longo do presente trabalho. A Figura 3.16 contém esquematizado o sistema de ventilação adotado no piso 1 e o sistema de regulação do clima instalado na zona do bar.

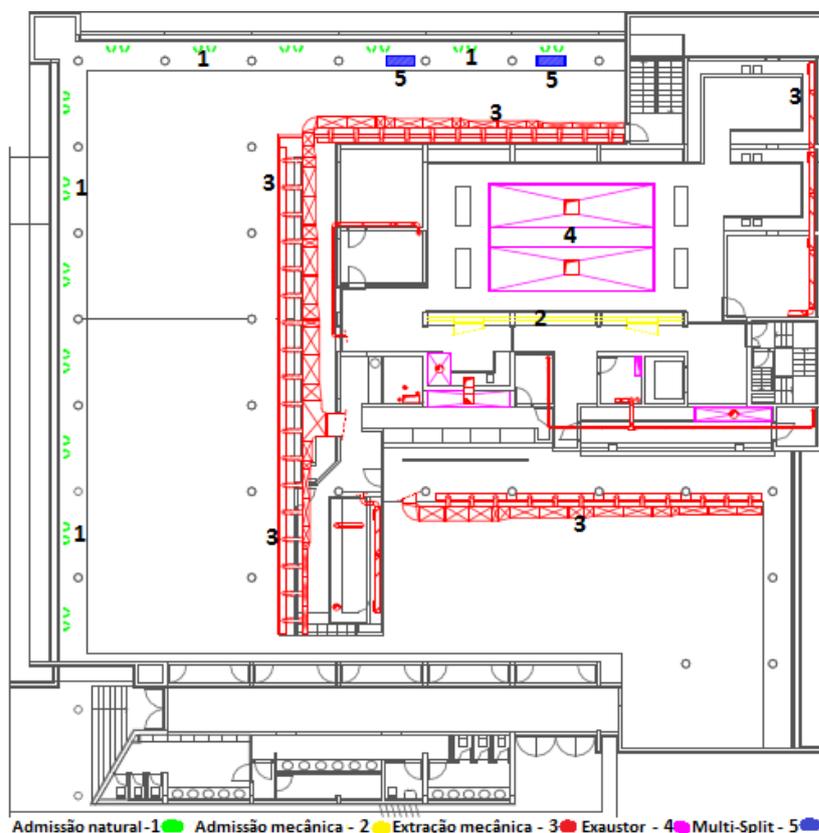


Fig.3.16 – Sistemas de ventilação e climatização instalados no piso 1

Como se pode visualizar na Figura 3.16 trata-se de um sistema de ventilação que conjuga diferentes componentes, contribuindo para que haja uma renovação de ar diferente em cada zona do edifício.

Na cantina existe admissão natural de ar e extração mecânica. A admissão é efetuada através de grelhas fixas colocadas no chão do corpo em balanço ao longo dos vãos envidraçados, ver Figura 3.17. Por sua vez a extração é feita por grelhas colocadas ao longo da divisória (situadas na cota superior da divisória, ver Figura 3.18) que separa esta zona das restantes. O posicionamento das grelhas permite a criação de um movimento transversal de ar com fluxo ascendente que percorre a cantina.



Fig.3.17 – Grelha de admissão natural de ar instalada na cantina



Fig.3.18 – Grelha de extração mecânica instalada na cantina

Inicialmente a zona do bar foi pensada para funcionar de forma isolada do restante edifício. Daí terem sido instalados nesta zona dois *Multi-Split* (Figura 3.19) para controlar o ambiente interior principalmente a temperatura, mantendo-a aproximadamente constante ao longo do ano. No entanto, a ausência de barreira física entre esta zona e a cantina reduz a eficácia dos equipamentos instalados. Como se pode ver na Figura 3.16 nesta zona existem grelhas de admissão de ar semelhantes às instaladas na cantina, mas estas encontram-se tapadas (Figura 3.20). A zona dispõe ainda de um

sistema de extração mecânica, cujas grelhas se encontram ao longo da parede que divide esta zona com a da cozinha.



Fig.3.19 – Equipamento *Multi-Split* instalado no bar

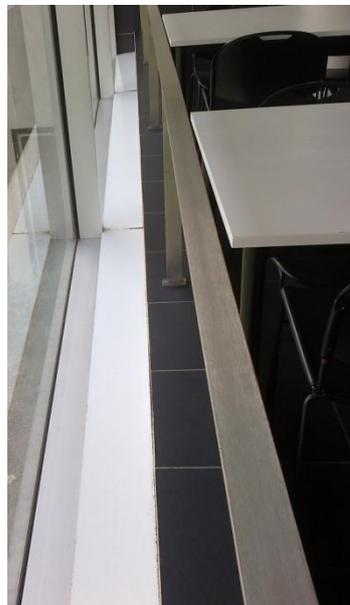


Fig.3.20 – Grelhas de admissão de ar tapadas na zona do bar

Embora no projeto de ventilação apenas esteja representada a extração mecânica, existem grelhas de admissão de ar no grill, semelhantes às instaladas na cantina e no bar, ao longo dos envidraçados. A localização das grelhas de extração é visível na Figura 3.16. A renovação de ar nesta zona é semelhante à cantina, com a particularidade de existir um pequeno local destinado à confeção de grelhados (Figura 3.21), estando este equipado com um exaustor que assegura a remoção da produção de vapores e cheiros. Entre o grill e a cantina não existe separação física, sendo que ocorre deslocação de ar entre as duas zonas.



Fig.3.21 – Local destinado a confeção de grelhados no grill

A renovação de ar na cozinha é um processo mais complexo uma vez que se trata de um local com elevada produção de vapor. Fora do período destinado à confeção de alimentos, esta zona possui grelhas de extração mecânica localizadas ao longo da parede exterior do alçado nordeste (Figura 3.22), sendo a admissão de ar proveniente das outras zonas do edifício. No entanto, é durante o período de confeção que assume particular interesse. De modo a manter a qualidade do ar, durante este período entram em funcionamento os exaustores que se encontram sobre a zona de produção de alimentos extraindo o vapor produzido, como se pode ver na Figura 3.23. Nesta zona existe também admissão forçada de ar para compensar a extração provocada pelos exaustores de modo a não alterar o equilíbrio do edifício. Tanto a admissão forçada como os exaustores funcionam segundo duas velocidades acionadas em função do nível de produção de vapor. A primeira velocidade é usada entre as 8:30 e as 11:30 quando se começam a preparar as refeições. A partir das 11:30 até às 13:30 é acionada a segunda velocidade, quando a produção de vapor atinge o seu pico.



Fig.3.22 – Grelha de extração mecânica instalada na cozinha



Fig.3.23 – Exaustor instalado na cozinha

É de notar que a admissão natural apenas é condicionada pelas propriedades do vento incidente, havendo infiltrações durante todo o ano. Existe ainda infiltração de ar pelas portas que dão acesso ao exterior, nomeadamente no período de abertura ao público afetando principalmente as zonas do grill e da cantina. Em relação à extração mecânica, as grelhas de extração são ligadas por condutas. Na saída dessas condutas existem ventiladores que forçam o movimento do ar. Os ventiladores estão colocados na cobertura, onde o ar é expulso para o exterior. Não existe informação sobre o funcionamento deste sistema, sabendo-se apenas que está programado mas os seus períodos de operação são desconhecidos.

Nos dados de projeto também constam os caudais de extração do sistema mecânico e dos exaustores. Com esses valores foi possível calcular o Rph da extração mecânica. O Quadro 3.1 contém esses valores.

Quadro 3.1 – Valores de Rph para a extração mecânica

Zona	Q [m <sup>3</sup> /h]	A <sub>grelha</sub> [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	V [m <sup>3</sup> ]	Rph [h <sup>-1</sup> ]
Cantina	5000	1,95	0,70	1573	3,2
Bar	3000	1,35	0,60	387	7,8
Grill	4500	1,25	1,00	1140	4,0
Cozinha s/exaustor	950	0,20	1,50	850	1,1
Cozinha c/exaustor 1ªVel.	9950	-	-	850	11,7
Cozinha c/exaustor 2ªVel.	18950	-	-	850	22,3

Estes valores de projeto correspondem ao funcionamento máximo do sistema de extração. Não existindo informação sobre o funcionamento da extração mecânica estes valores podem não corresponder à realidade. O sistema pode funcionar segundo um horário específico variando de zona para zona. No cálculo da área das grelhas e da velocidade do ar, devido à menor exatidão nas medições foram arredondados os resultados à centésima. Quando o exaustor entra em funcionamento não foi calculada a velocidade do ar uma vez que o ar é extraído por sistemas mecânicos diferentes.

### 3.3. OCUPAÇÃO

A ocupação é quantificada pelo número de pessoas que utilizam o edifício. Tratando-se de um local destinado à alimentação torna-se difícil obter um número exato de ocupantes. De facto, a variação da ocupação é bastante irregular, variando quer de dia para dia quer ao longo do próprio dia, uma vez que não existe a possibilidade de saber com exatidão quantas pessoas estiveram no edifício nem prever com a mesma exatidão quantas irão estar. O método utilizado para estimar este valor passou por contar os lugares disponíveis em cada zona. No Quadro 3.2 encontra-se a contagem do número de lugares sentados em cada zona.

Quadro 3.2 – Número de lugares sentados em cada zona

Zona	Número de lugares sentados
Cantina	324
Bar	52
Grill	120

É de salientar que no Quadro 3.2 não se encontra a zona da cozinha, pois nesta zona não existem lugares sentados. Assim, a sua ocupação é condicionada pelo número de funcionários que aí trabalham. Na cozinha a ocupação não é relevante dado o seu valor reduzido, tornando-se apenas relevante o funcionamento dos equipamentos usados no processo de confeção.

Ao Quadro 3.2 poderia ainda somar-se as pessoas que se encontram em fila de espera para comer, não sendo possível quantificar esse valor. No entanto, existem alturas em que há pessoas na fila de espera mas os lugares sentados não estão todos ocupados.

Os valores de ocupação variam ao longo do dia. O Quadro 3.3 contém os horários dos diferentes períodos de um dia normal de funcionamento.

Quadro 3.3 – Diferentes tipos de ocupação ao longo de um dia

Tipo de ocupação	Intervalo de horas
Apenas funcionários	8:00-11:30 e 14:30-18:00
Abertura ao público	11:30-14:30
Ocupação máxima	13:0-14:00
Sem ocupação	18:00-8:00

Os valores de ocupação máxima correspondem à altura do dia em que existem mais pessoas na fila de espera. O edifício fica sem qualquer tipo de ocupação após encerrar as suas atividades, sendo a hora de fecho por volta das 18:00 e a de abertura às 8:00.

Quando o edifício não se encontra aberto ao público a sua ocupação é condicionada pelo número de funcionários, sendo a ocupação por zonas afetada pelo tipo de tarefa que estes desempenham. De qualquer forma, esta ocupação é insignificante comparativamente ao valor obtido quando o edifício se encontra aberto ao público

# 4

## MEDIÇÕES IN-SITU

### 4.1. PLANO DE MEDIÇÃO

A análise do clima exterior e interior é extremamente importante para a realização desta dissertação, na medida em que é necessário caracterizar o ambiente em que o edifício se encontra bem como avaliar as condições higrotérmicas sentidas no interior do mesmo.

Assim para construir o clima exterior recorreu-se aos dados meteorológicos registados pela estação meteorológica da FEUP. O clima interior foi traçado a partir dos dados recolhidos por sensores instalados no interior do edifício.

A estação meteorológica está colocada na cobertura do edifício onde funciona o Departamento de Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, como se pode visualizar na Figura 4.1 [12].



Fig.4.1 – Vista geral da estação meteorológica [12]

Como se pode ver na Figura 4.1 a estação é composta pelos seguintes equipamentos [13]:

- Anemómetro;
- Cata-vento;
- Piranómetro;

- Pluviómetro;
- Sensor de temperatura e humidade;
- Sistema de aquisição de dados;
- Pirgeómetro.

As seguintes grandezas físicas medidas a partir destes equipamentos são [12]:

- Temperatura do ar [°C];
- Humidade Relativa [%];
- Direção do vento [°];
- Pressão atmosférica [bar];
- Velocidade do vento [m/s];
- Radiação atmosférica [W/m<sup>2</sup>];
- Radiação solar difusa [W/m<sup>2</sup>];
- Radiação solar global [W/m<sup>2</sup>];
- Precipitação [mm].

As grandezas físicas são registadas de 10 em 10 minutos e os dados são gravados numa base de dados disponível para qualquer utilizador [12].

Dada a localização da estação é possível que haja períodos em que ocorram falhas nas medições, perdendo-se dados de alguns períodos de medição. Nestas situações a única forma de contornar o problema é utilizar períodos de dados em que não ocorreram incidentes.

Para definir o clima interior foram utilizados sensores Hobo Data Logger (Figura 4.2), uma vez que permitem registar os valores de grandezas físicas de 10 em 10 minutos, permitindo uma caracterização detalhada do clima. As grandezas medidas pelos sensores utilizados são as seguintes:

- Temperatura do ar [°C];
- Humidade Relativa [%];

Foi necessário programar todos os sensores usados com o período de medição pretendido, verificando o estado da bateria de cada um. A recolha das medições pode ser feita a qualquer altura durante o período definido, sendo apenas necessário um computador e um cabo USB para descarregar os respetivos dados.



Fig.4.2 – Sensor Hobo Data Logger sobre a grelha de ventilação

Foram colocados 10 sensores, respetivamente identificados com uma letra de A a J. A sua posição foi escolhida de modo a abranger a maior parte possível da área do piso 1 como se pode ver na Figura 4.3.

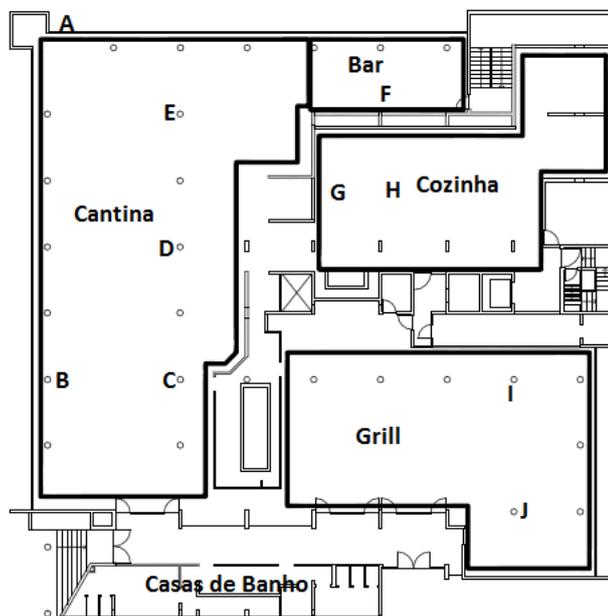


Fig.4.3 – Posição dos sensores no piso 1

De modo a evitar diferenças nas medições devido à posição dos sensores, foram colocados a aproximadamente 2,5 metros de altura em relação ao pavimento, com exceção do sensor A que foi colocado ao nível do pavimento sobre a grelha de ventilação.

Como se pode visualizar na Figura 4.3 os sensores em função do seu posicionamento permitem caracterizar as respetivas zonas. Dentro de cada zona os sensores foram posicionados de modo a facilitar a análise dos fatores físicos que influenciam o clima interior.

Na cantina foram colocados quatro sensores, pois trata-se da zona com maior área e mais relevante para o presente trabalho. Os sensores C, D e E encontram-se alinhados estando atados aos respetivos pilares como se observa na Figura 4.3, situando-se no local onde é formada uma fila de ocupantes que esperam por ser atendidos nos períodos de maior ocupação do edifício. O sensor B foi colado na testa de uma sanca que se prolonga pela envolvente do edifício, estando próximo da área de envidraçados orientada a sudoeste.

No bar foi colocado apenas um sensor, visto ser uma área reduzida, sendo instalado na parede que separa esta zona e a cozinha. O sensor situa-se em frente aos envidraçados orientados a noroeste, perto de uma porta de emergência com acesso direto ao exterior.

No grill optou-se por colocar dois sensores, estando estes alinhados. O sensor J foi atado num pilar situado na zona de refeição, e o sensor I foi colado na testa da sanca que se encontra por cima do local onde é exposta a comida que está à disposição dos clientes e relativamente próximo do local de confeção de grelhados.

Na cozinha também foram instalados dois sensores, sendo o principal objetivo destes registar as alterações que os equipamentos usados na confeção de alimentos produzem no ambiente interior. Assim o sensor H foi colado na parte exterior do sistema de exaustão e o sensor G fixado numa parede da cozinha revestida por azulejo paralelamente ao sensor H.

As casas de banho, o corredor de acesso a zona da cantina e do grill e todos os locais de passagem interiores que ligam as zonas acima descritas, não vão ser analisados, uma vez que não têm influência no conforto dos ocupantes.

O período de medição foi escolhido de modo a abranger variações significativas do clima, tais como: temperaturas baixas, períodos de chuva, temperaturas elevadas, períodos de céu nublado e períodos de céu limpo. Embora a análise de resultados do clima exterior e interior seja feita até ao dia 31 de maio, os dados da estação meteorológica foram tratados a partir do dia 1 de janeiro e os dados registados pelos sensores a partir do dia 19 de janeiro, dia em que foram instalados no edifício.

## 4.2. RESULTADOS

### 4.2.1. CLIMA EXTERIOR

#### 4.2.1.1. Tratamento de dados

Os dados registados pela estação meteorológica permitem caracterizar o clima exterior do edifício em estudo, no entanto, para se efetuar a simulação com o DesignBuilder é necessário criar um ficheiro climático, do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY), ou seja Ano Meteorológico Tipo. Consiste num conjunto de valores de radiação solar e outros elementos meteorológicos, de hora a hora, para um período de 1 ano. Representa apenas condições típicas de um dado local, não fornecendo as condições extremas [14].

Para criar o ficheiro climático será usado um ficheiro TMY já existente (neste caso o TMY do Porto de 2002) no qual serão alterados apenas os dados que interferem na simulação. O ficheiro TMY do Porto de 2002 pode ser descarregado a partir da biblioteca de dados do DesignBuilder. O Quadro 4.1 apresenta o conjunto de dados relevantes para a simulação bem como a respetiva forma de obtenção.

Quadro 4.1 – Dados relevantes para simulação

Variável	Forma de obtenção	Unidade
Temperatura de Bolbo Seco	Obtido da estação meteorológica	°C
Temperatura de Ponto de Orvalho	Calculado através da equação (4.1) [15]: $Td = \frac{b \times \gamma(T, HR)}{a - \gamma(T, HR)} \quad (4.1.)$	°C
	Onde: $\gamma(T, HR) = \frac{a \times T}{b - T} + \ln\left(\frac{HR}{100}\right) \quad (4.2.)$	
Humidade Relativa	Obtido da estação meteorológica	%
Pressão Atmosférica	Obtido da estação meteorológica	Pa
Intensidade de Radiação Infravermelha do Céu	Obtido da estação meteorológica	Wh/m <sup>2</sup>
Radiação Global Horizontal	Obtido da estação meteorológica	Wh/m <sup>2</sup>
Radiação Directa Normal	Calculado através da equação (4.3) [16]: $I_i = \frac{I_{gh} - I_{dh}}{\text{sen}(h)} \quad (4.3.)$	Wh/m <sup>2</sup>

Radiação Difusa Horizontal	Obtido da estação meteorológica	Wh/m <sup>2</sup>
Direção do Vento	Obtido da estação meteorológica	°
Velocidade do Vento	Obtido da estação meteorológica	m/s
Precipitação	Obtido da estação meteorológica	mm

A equação (4.1) apenas é válida nas seguintes condições [15]:

- 0°C < T < 60°C;
- 1% < HR < 100%;
- 0°C < Td < 50°C.

Sendo nestas condições a= 17,271 e b=237,7°C.

Na equação (4.3) os valores da radiação global horizontal (Igh) e da radiação difusa horizontal (Idh) são obtidos da estação meteorológica, no entanto o valor da altura solar (h) é calculado através da equação (4.4) [16]

$$h = \text{sen}^{-1}(\cos \lambda \cos \delta \cos H + \text{sen} \lambda \text{sen} \delta) \quad (4.4.)$$

Onde:

$\delta = 23,5 \text{ sen} \{360 (284 + n) / 365\}$ , n representa o número do dia do ano considerado;

$\lambda$  – Latitude em graus;

$H = 15 (TL + ET / 60 - 12) + L_{ms} - L_{ml}$  (ângulo horário do sol [°]);

TL – Tempo local (0 – 24 horas);

$ET = 9,87 \text{ sen}(1,978n - 160,22) - 7,53 \text{ cos}(0,989n - 80,11) - 1,5 \text{ sen}(0,989n - 80,11)$ ;

(Equação do tempo, em minutos de arco);

$L_{ms}$  – longitude do meridiano central do fuso horário a que o local está vinculado [°];

$L_{ml}$  – longitude do local [°].

As restantes variáveis do ficheiro TMY do Porto não foram alteradas, uma vez que não são usadas pelo EnergyPlus na simulação, não sendo referenciadas no presente trabalho.

O processo de tratamento de dados, desde o ficheiro inicial até à obtenção do ficheiro final que será utilizado na simulação, está descrito na Figura 4.4.

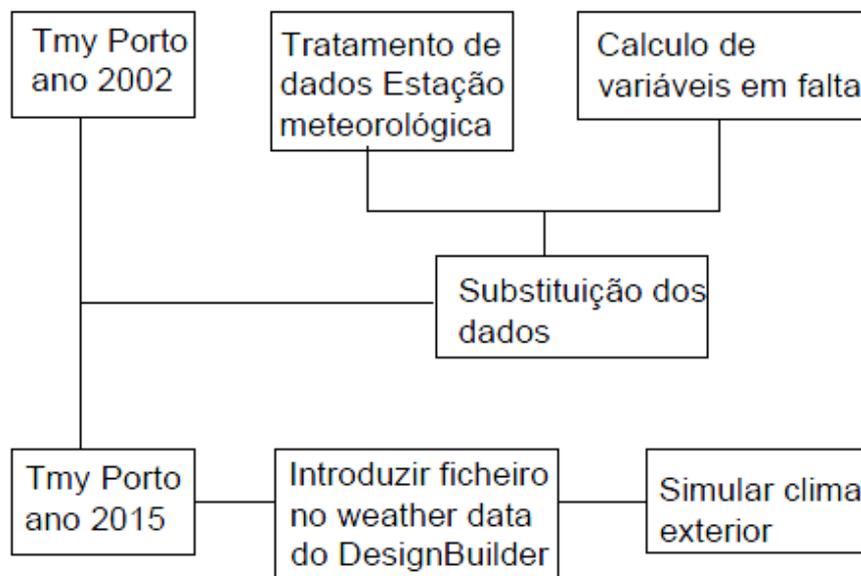


Fig.4.4 – Criação do ficheiro climático TMY

A estação meteorológica apresentou algumas falhas, pelo que existem intervalos de tempo dentro do período de medição em que não há registo de dados. Para efetuar a simulação serão usados os dados do clima do Porto de 2002, de forma a completar as falhas referidas e os valores fora do período de medição. Na apresentação das variáveis do clima exterior os dados em falta não serão substituídos, assim, nos gráficos que se seguem existem períodos de tempo em branco, sem dados.

#### 4.2.1.2. Temperatura Exterior

A temperatura exterior é um dos dados mais relevantes na caracterização do clima exterior, na Figura 4.5 é representada a sua variação ao longo do período de medição. Para uma melhor perceção da variação a Figura 4.6 realça as curvas de temperatura mínima, média e máxima para os meses contidos no intervalo estudado.

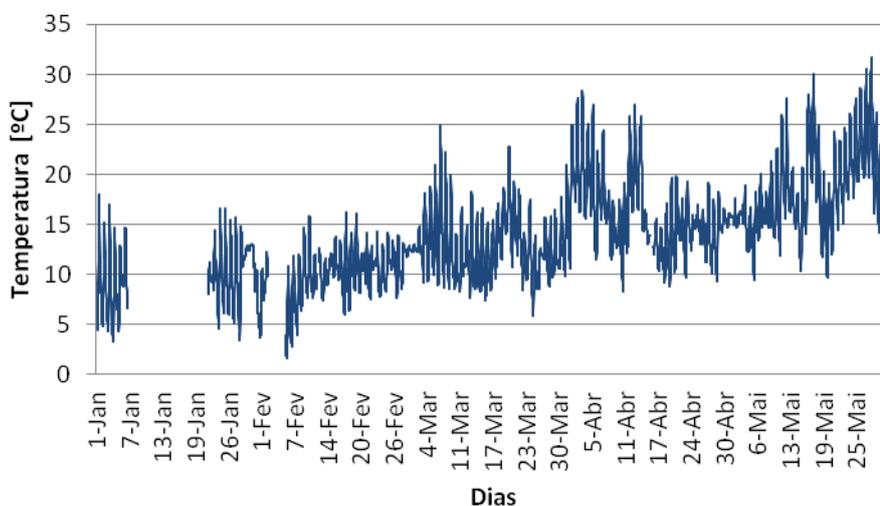


Fig.4.5 – Variação da temperatura exterior ao longo do período de medição

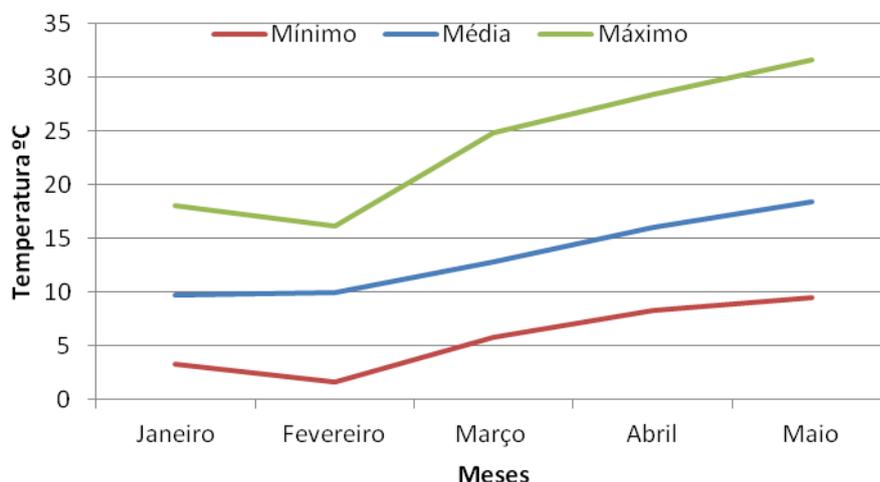


Fig.4.6 – Variação das curvas de referência da temperatura exterior ao longo dos meses estudados

Como se pode visualizar nas Figuras anteriores existe uma variação considerável da temperatura, traduzindo-se numa diferença de aproximadamente 30°C entre o valor mínimo e máximo registados. O mês de fevereiro é o que apresenta temperaturas mais baixas, sendo que a temperatura mínima é próxima de 0°C. Por outro lado o mês de maio é o mais quente, no qual a temperatura média é superior à temperatura máxima registada em fevereiro. Durante março e abril verifica-se um aumento da temperatura aproximadamente constante, ocorrendo no mês de abril alguns picos de temperatura próximos dos registados em maio. O mês de janeiro também apresenta temperaturas baixas, no entanto, neste mês faltam alguns dados, não sendo possível caracterizá-lo corretamente.

Devido à extensão do período de medição não é possível visualizar a variação da temperatura ao longo de um dia. Assim as Figuras 4.7 e 4.8 representam a variação durante o período mais frio (dias 6, 7 e 8 de fevereiro) e o período mais quente (dias 26, 27 e 28 de maio), respetivamente.

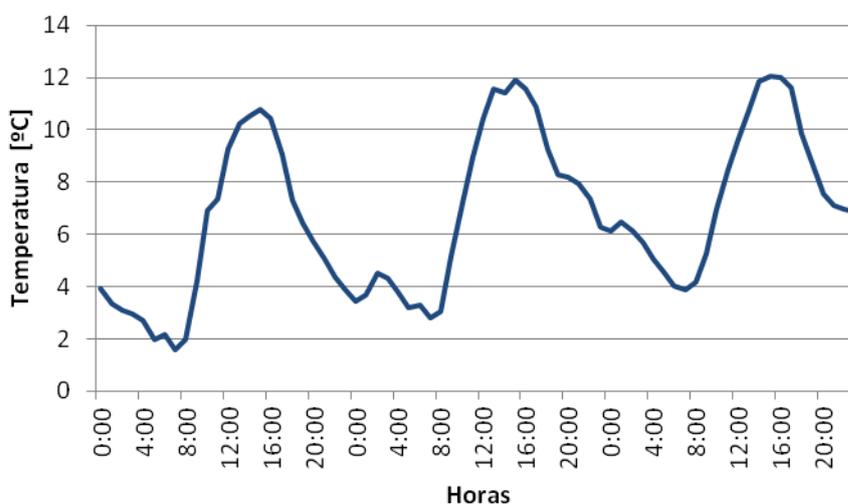


Fig.4.7 – Variação da temperatura exterior ao longo do período mais frio

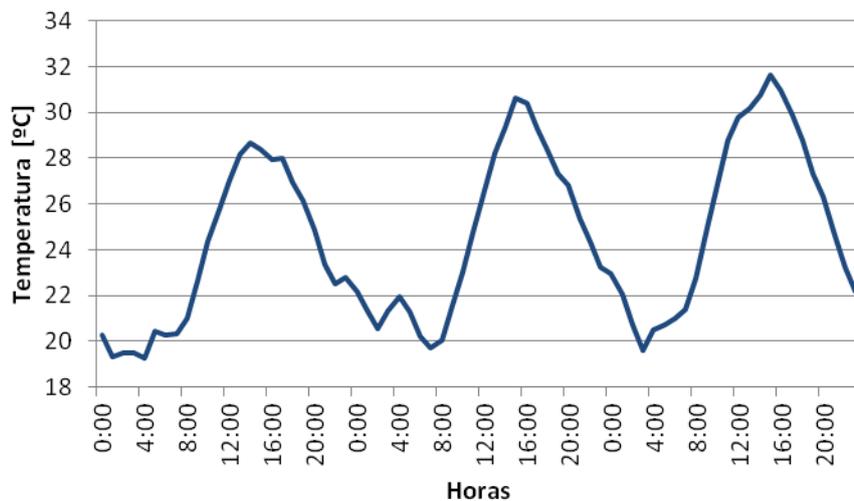


Fig.4.8 – Variação da temperatura exterior ao longo do período mais quente

A variação da temperatura exterior é semelhante nos dois períodos, alterando apenas a ordem de grandeza dos valores registados. Verifica-se um aumento de temperatura a partir das 8:00 da manhã atingido o valor máximo diário por volta das 16:00, voltando a descer até às 8:00 do dia seguinte.

O período frio é marcado por madrugadas severas que apresentam temperaturas inferiores a 5°C, valores que sobem ao longo do dia, no entanto, a temperatura máxima não passa dos 12°C, o que se traduz num período desconfortável para os habitantes.

Por sua vez, no período quente os valores mínimos registados durante a madrugada rondam os 20°C, proporcionando noites agradáveis. No entanto, os valores marcantes deste período são as temperaturas registadas a meio da tarde que ultrapassam os 30°C.

#### 4.2.1.3. Humidade Relativa

A humidade relativa traduz a quantidade de vapor de água presente no ar, a Figura 4.9 contém a variação da humidade relativa ao longo do período de medição e os dados estatísticos da referida variação estão presentes no Quadro 4.2.

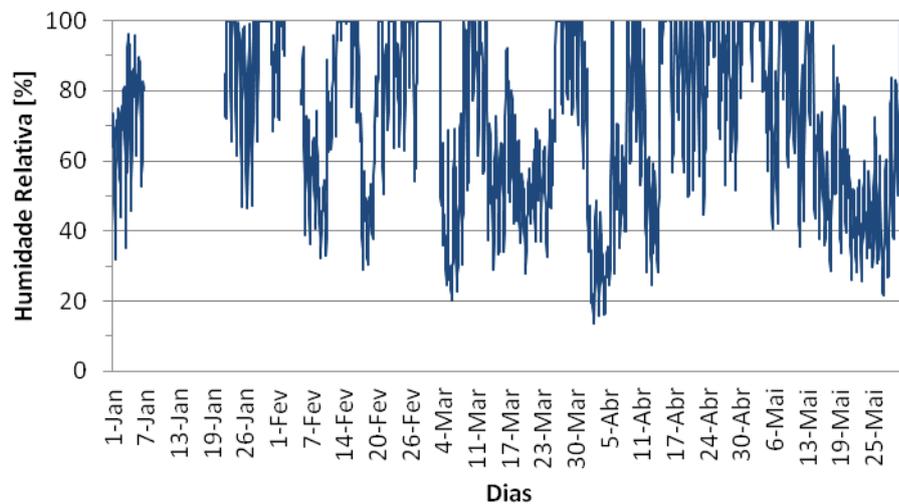


Fig.4.9 – Variação da humidade relativa ao longo do período de medição

Quadro 4.2 – Valores estatísticos da variação da humidade relativa

Humidade Relativa (%)	
Mínimo	13,5
Média	72,5
Máximo	100

É visível a acentuada variação da humidade relativa exterior, variando entre registos nos quais o ar se encontra totalmente saturado (HR=100%) e valores do ar praticamente sem vapor de água (HR=13,5%). No entanto, os períodos em que o ar se encontra totalmente saturado são muito mais frequentes, originando uma humidade relativa média de 72,5%, traduzindo-se num ambiente húmido durante o período de medição.

Como se pode ver na Figura 4.9, abril foi o mês mais chuvoso, sendo o que apresenta valores de humidade relativa mais elevados, atingindo com alguma frequência os 100%. Por sua vez, o mês de maio apresenta valores mais baixos de humidade relativa, fruto das elevadas temperaturas registadas.

#### 4.2.1.4. Temperatura de Ponto de Orvalho

A temperatura ponto de orvalho é a temperatura abaixo da qual ocorrem condensações. A Figura 4.10 mostra a variação da temperatura de ponto de orvalho ao longo do período de medição e os dados estatísticos da respetiva variação encontram-se no Quadro 4.3.

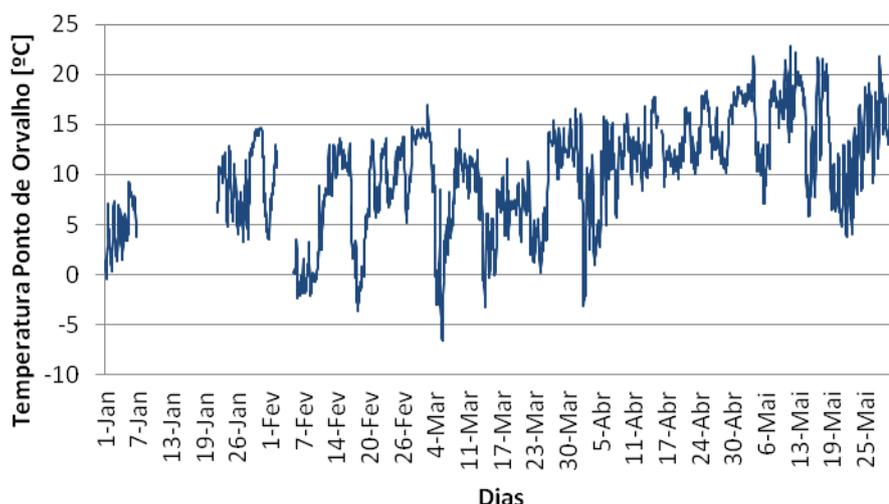


Fig.4.10 – Variação da temperatura de ponto de orvalho ao longo do período de medição

Quadro 4.3 – Valores estatísticos da temperatura de ponto de orvalho

Temperatura de Ponto de Orvalho °C	
Mínimo	-6,5
Média	10,1
Máximo	22,8

Como se pode observar no Quadro 4.3 a variação é acentuada, no entanto, a temperatura de ponto de orvalho média não é elevada. Este parâmetro depende da variação da temperatura exterior e da humidade relativa, como tal, apresenta valores máximos quando a humidade relativa e a temperatura exterior são elevadas.

O final de janeiro pode ser preocupante, uma vez que a temperatura exterior é próxima da temperatura de ponto de orvalho e os valores da humidade relativa são elevados. Quando a temperatura ponto de orvalho atinge valores mais elevados, merece igualmente atenção, dado que a temperatura exterior é da mesma ordem de grandeza, apesar disso, a temperatura exterior começa a subir nessa altura (aproximadamente a partir de dia 13 de maio), sendo superior à temperatura de ponto de orvalho.

Os valores mínimos de temperatura exterior não são preocupantes, pois correspondem a valores de temperatura de ponto de orvalho negativos, não havendo risco de ocorrer condensações.

#### 4.2.1.5. Radiação Solar

A radiação solar é a energia emitida pelo sol, as Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 representam a variação ao longo do período de medição da radiação global horizontal, da radiação difusa horizontal e da radiação direta normal respetivamente.

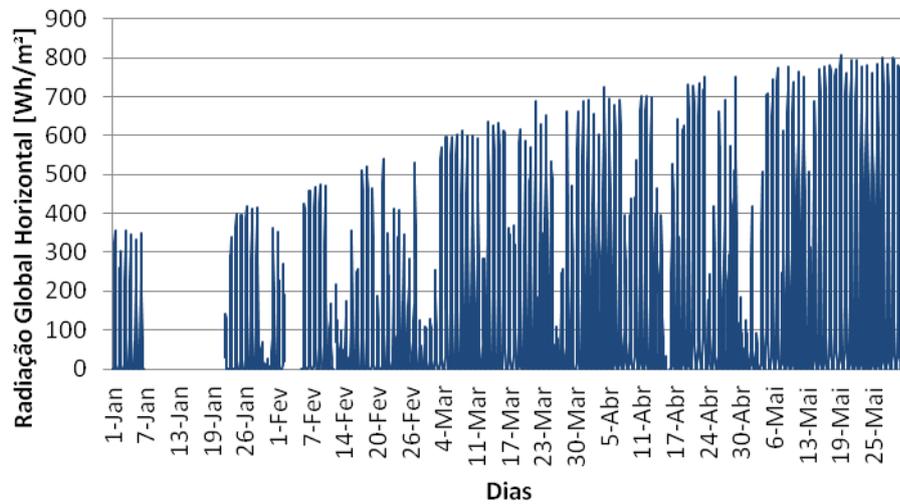


Fig.4.11 – Variação da radiação global horizontal ao longo do período de medição

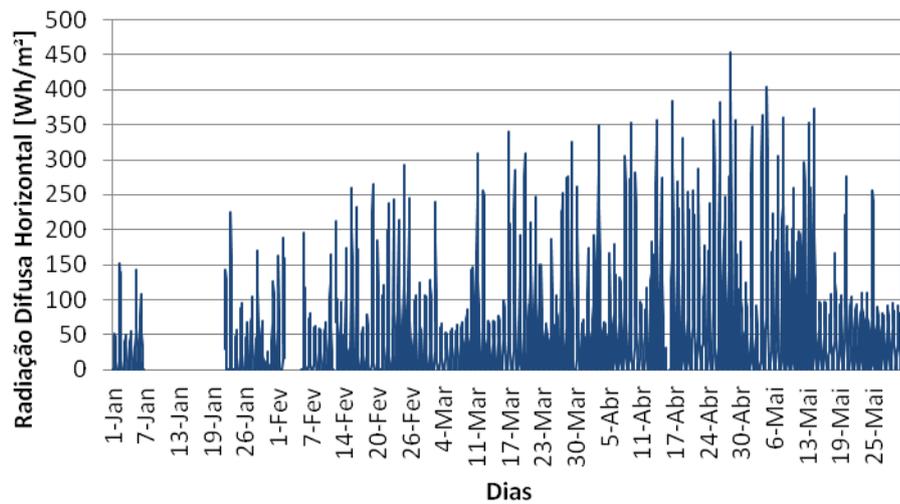


Fig.4.12 – Variação da radiação difusa horizontal ao longo do período de medição

Na Figura 4.11 observa-se com mais facilidade o acréscimo da radiação ao longo do intervalo de medição, sendo que os valores mais elevados são registados em maio, correspondendo ao mês mais quente. Em janeiro e fevereiro são registados valores mais baixos de radiação, contribuindo para as temperaturas baixas sentidas nestes meses. Nas Figuras 4.12 e 4.13 também se nota um aumento de radiação nos meses mais quentes, contudo a diferença não é tão acentuada, principalmente na radiação direta normal.

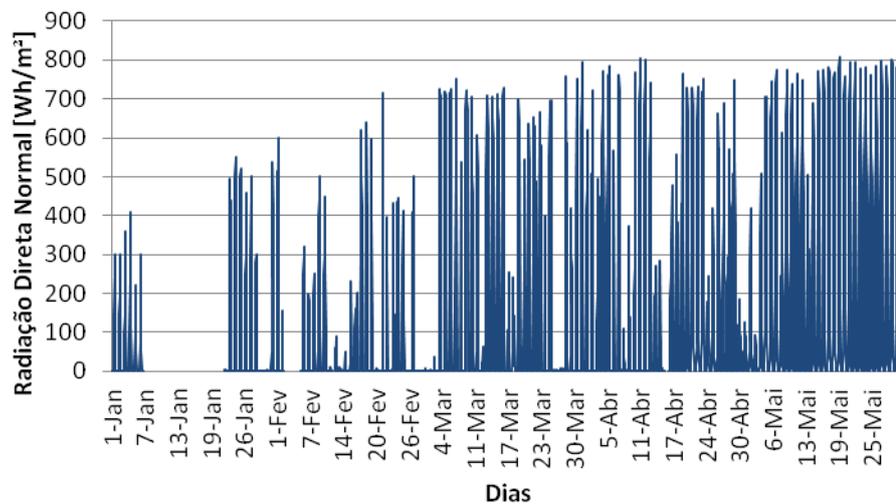


Fig.4.13 – Variação da radiação direta normal ao longo do período de medição

A Figura 4.14 contém a variação da radiação ao longo de um dia. Apenas será usada a radiação direta normal, uma vez que a variação das outras duas variáveis, ao longo de um dia de sol é semelhante, alterando apenas a ordem de grandeza dos valores. A Figura 4.14 corresponde a um dia aleatório (neste caso o dia 7 de maio) de céu limpo.

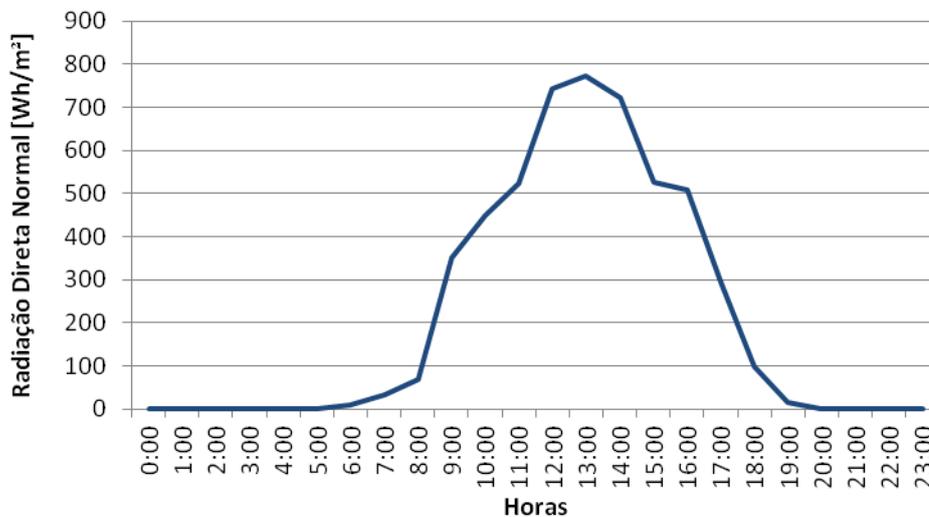


Fig.4.14 – Variação da radiação direta normal ao longo de um dia

Como mostra a Figura 4.14, o valor da radiação solar começa a crescer a partir das 6:00, correspondendo ao nascer do sol. O valor máximo é atingido por volta das 13:00, diminuindo até às 19:00, altura do pôr-do-sol., A radiação solar varia consideravelmente de dia para dia, em função da época do ano e das condições do céu, podendo ser zero durante todo o dia em períodos de céu muito nublado. A Figura 4.14 retrata um dos dias em que a incidência solar atinge o seu máximo, correspondendo aos dias de céu limpo.

#### 4.2.2. CLIMA INTERIOR

Tal como no clima exterior, também no clima interior os dados usados serão as médias horárias dos valores medidos, sendo neste caso os valores registados pelos sensores instalados no interior do edifício. Além dos valores de temperatura e humidade relativa registados pelos sensores, foi também medida a velocidade do ar que atravessa as grelhas de ventilação, de modo a comprovar os valores de projeto referidos em §3.2.

##### 4.2.2.1. Temperatura

De modo a caracterizar a temperatura interior do edifício em estudo, a Figura 4.15 apresenta a mancha formada pelas curvas dos valores medidos pelos sensores instalados.

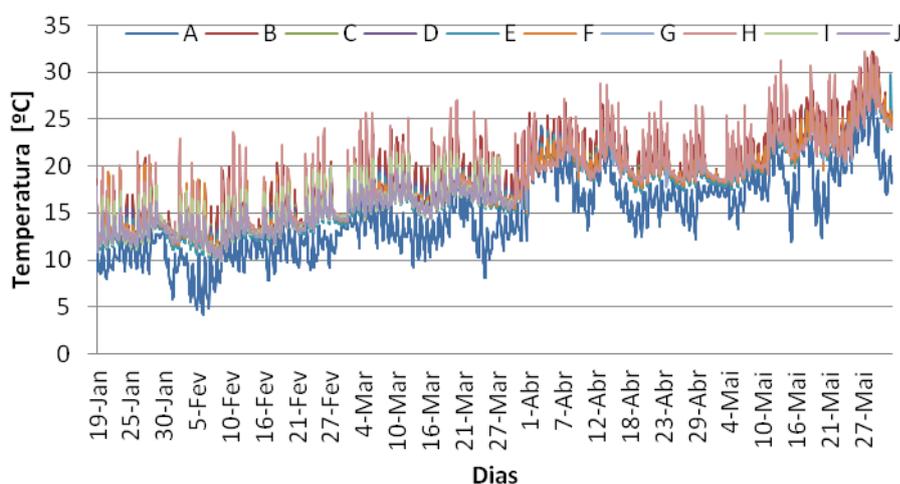


Fig.4.15 – Valores da temperatura medidos pelos sensores

Os valores registados pelos sensores aparecem envolvidos por uma mancha comum, com alguns afastamentos pouco significativos, à exceção do sensor A, em que a curva de temperatura se encontra fora da mancha resultante das restantes curvas. Os valores medidos pelo sensor A são inferiores aos dos restantes sensores, o que pode ser justificado pela localização deste, pois encontra-se sobre uma grelha de ventilação em contacto com o ar exterior.

Como foi referido no plano de medição, a localização dos sensores é tal que permite que estes sejam agrupados com a finalidade de definir a temperatura de cada zona. Apenas o sensor A não faz parte de nenhuma das zonas estudadas, sendo tratado de forma diferente dos restantes. A Figura 4.16 representa a variação da temperatura registada pelo sensor A.

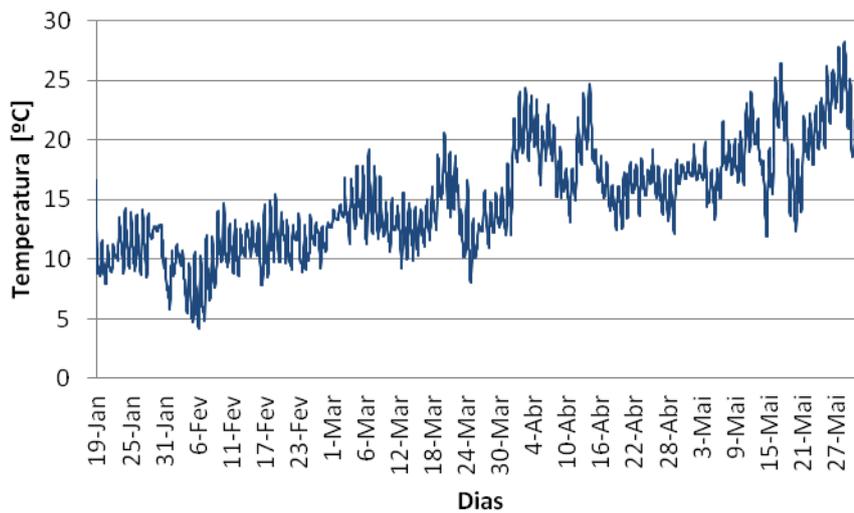


Fig.4.16 – Variação da temperatura registada pelo sensor A

Na Figura 4.16 pode-se observar a existência de temperaturas muito baixas, inferiores a 5°C em casos mais extremos, o que para um ambiente interior seria preocupante, no entanto, estes valores embora medidos dentro do edifício são referentes ao clima exterior sentido junto à grelha de ventilação em que o sensor foi colocado. Ao longo do período de medição nota-se que a temperatura aumenta, sendo até ao início de abril um aumento gradual, seguido por um aumento mais acentuado até meio do mês. No final de abril a temperatura desce, voltando em seguida a aumentar até ao final do período de medição.

A Figura 4.17 contém as curvas dos valores medidos pelos sensores instalados na cantina e a curva da temperatura média sentida nesta zona, sendo esta a média aritmética dos quatro sensores.

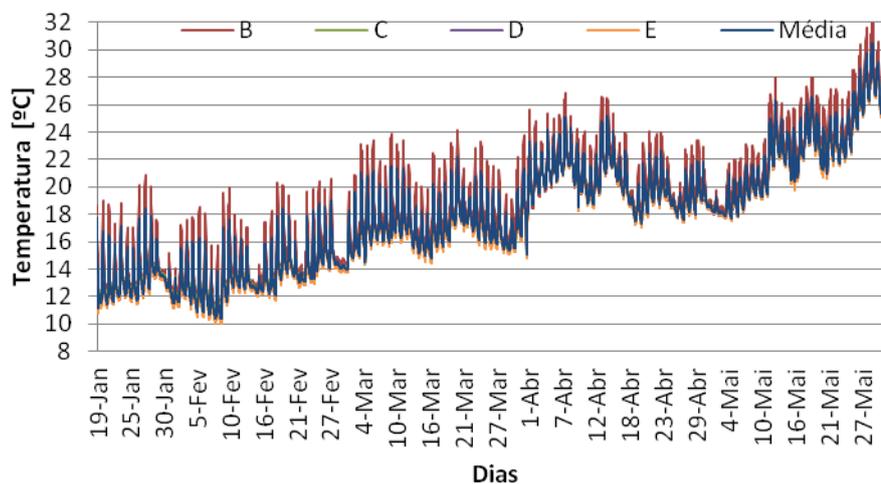


Fig.4.17 – Variação da temperatura na cantina

As curvas compostas pelos valores medidos pelos quatro sensores e a temperatura média formam uma mancha, onde é notório um ligeiro aumento da temperatura registada pelo sensor B em relação aos restantes. Essa variação pode estar relacionada com o posicionamento do sensor, que se encontra perto dos envidraçados onde a temperatura é mais elevada. É visível na Figura 4.17 um crescimento

acentuado da temperatura ao longo do intervalo de medição, sendo a temperatura na fase final da medição cerca de 12°C mais alta do que no início.

O bar é caracterizado unicamente pelo sensor F, a Figura 4.18 representa a curva de valores registados pelo respetivo sensor, sendo em simultâneo a curva da temperatura sentida nesta zona.

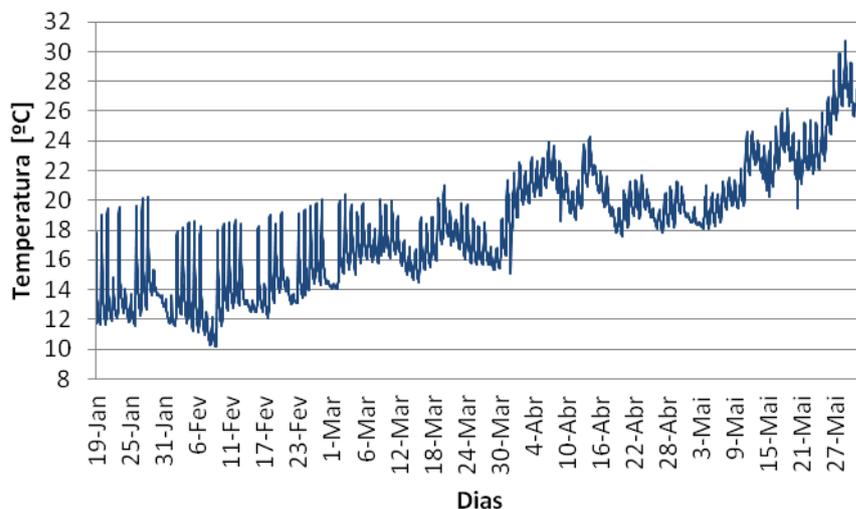


Fig.4.18 – Variação da temperatura no bar

Tal como na cantina, também nesta zona é possível observar um aumento da temperatura ao longo do período de medição, sendo a diferença entre a temperatura inicial e final do período de medição aproximadamente a mesma verificada na cantina (12°C). No entanto, a partir do momento em que a temperatura é mais elevada (a partir de dia 4 de abril) nota-se uma redução na amplitude de variação da temperatura ao longo do dia como se pode verificar na Figura 4.18. Essa redução pode estar relacionada com a entrada em funcionamento dos dois equipamentos *Multi-Split* instalados nesta zona, condicionando o ambiente interior.

A curva da temperatura média e as curvas dos valores registados pelos sensores instalados no grill estão representadas na Figura 4.19. Esta zona entrou em obras durante o período de medição, tendo os sensores sido retirados no início das obras, pelo que apenas existem dados até ao dia 29 de março. Como se pode ver na Figura 4.19 a variação nesta zona é menor que nas restantes, no entanto, as curvas de valores não podem ser comparadas, visto que nesta zona os meses de abril e maio não são registados e, sendo estes os meses mais quentes é normal que no grill a variação de temperatura ao longo do período de medição seja menor. Entre janeiro e março nota-se um aumento de temperatura tal como acontece nas outras zonas. É ainda visível que os valores registados pelo sensor I são ligeiramente superiores, o que pode estar relacionado com o facto de este se encontrar perto do local destinado a confeção de grelhados onde a temperatura é mais elevada.

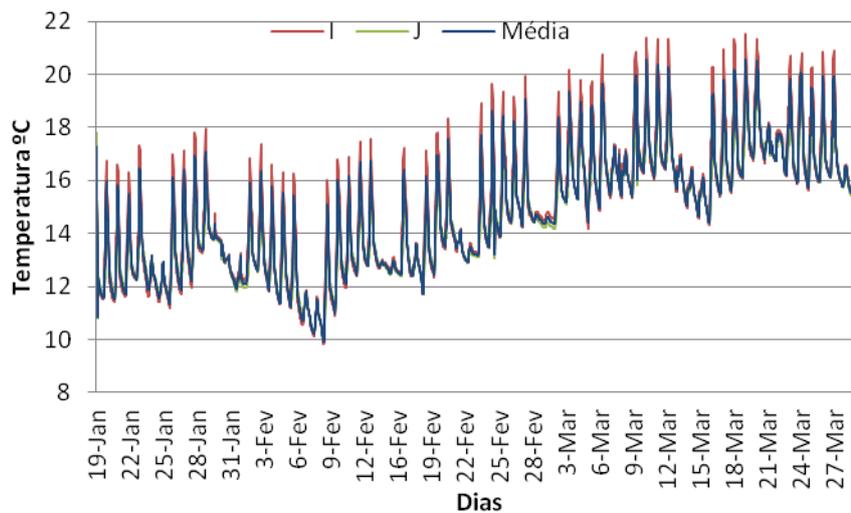


Fig.4.19 – Variação da temperatura no grill

Na Figura 4.20 encontram-se as curvas dos sensores instalados na cozinha e a curva da temperatura média calculada pela média aritmética dos respetivos sensores.

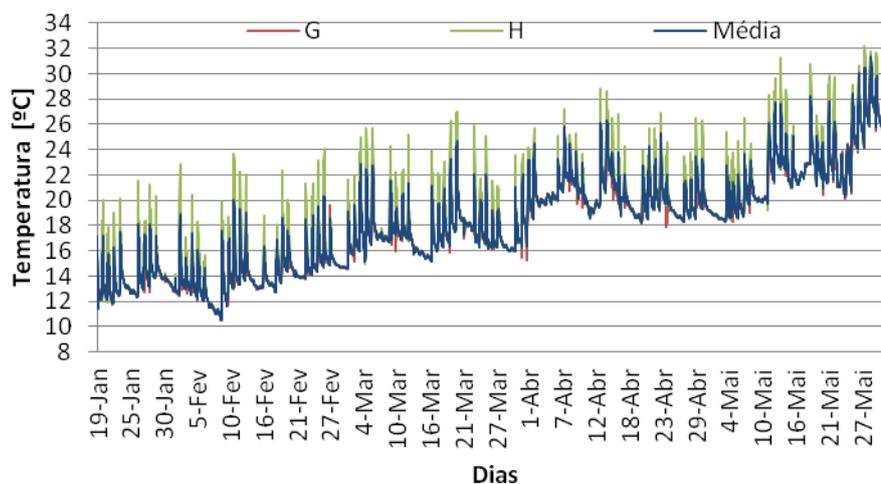


Fig.4.20 – Variação da temperatura na cozinha

É visível que a curva de valores registados pelo sensor H apresenta valores de temperatura mais elevados do que as restantes curvas, o que já seria esperado uma vez que o sensor se encontra colado ao exaustor. A temperatura nesta zona atinge valores mais elevados do que nas restantes devido aos equipamentos que contém, no entanto, é também registado um aumento gradual da temperatura ao longo do período de medição como se pode ver na Figura 4.20.

De modo a perceber como varia a temperatura ao longo de um dia, as Figuras 4.21 e 4.22 representam a variação da temperatura durante o dia 20 de fevereiro para a zona da cantina e da cozinha respetivamente. O dia foi escolhido aleatoriamente.

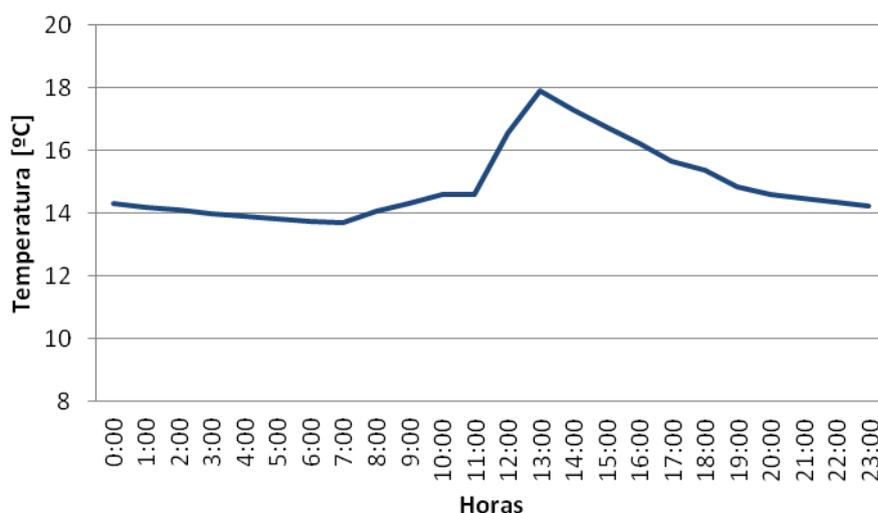


Fig.4.21 – Variação da temperatura na cantina no dia 20 de fevereiro

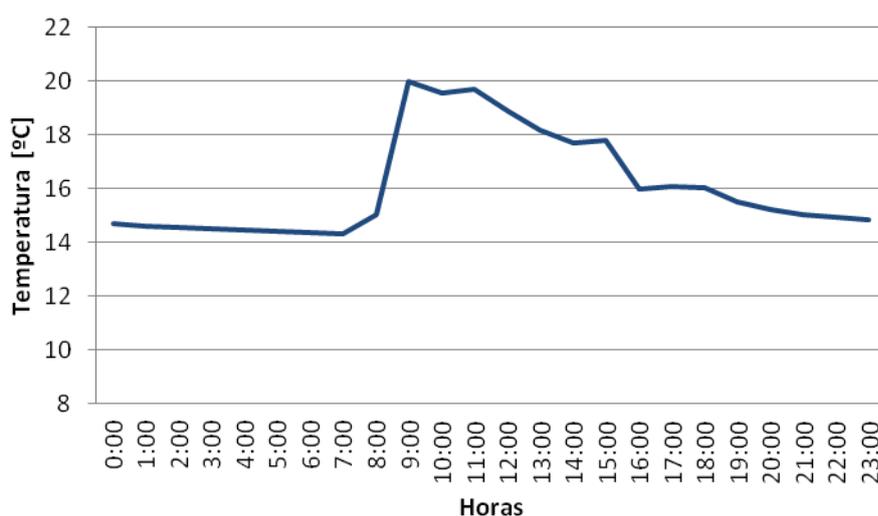


Fig.4.22 – Variação da temperatura na cozinha no dia 20 de fevereiro

No caso da cantina (Figura 4.21) é visível um ligeiro aumento da temperatura a partir das 8:00, hora de abertura do edifício, sendo que é entre as 11:30 e as 12:00 que ocorre um aumento significativo da temperatura, correspondendo à hora de abertura ao público. O valor máximo é registado entre as 13:00 e as 14:00 quando a ocupação do edifício é maior. Após o período de maior ocupação a temperatura começa a baixar até ao final do dia.

Por outro lado, na zona da cozinha (Figura 4.22) o aumento de temperatura é sentido a partir das 9:00 quando os equipamentos de confeção são ligados, registando um valor elevado até às 12:00, período em que as refeições são confeccionadas. Em seguida a temperatura começa a baixar até às 15:00, hora em que se nota uma descida acentuada da temperatura, correspondendo ao início da limpeza dos equipamentos.

#### 4.2.2.2. Humidade Relativa

Tal como no caso da temperatura, para caracterizar a humidade relativa do interior do edifício em estudo, a Figura 4.23 contém as curvas dos valores registados por todos os sensores instalados.

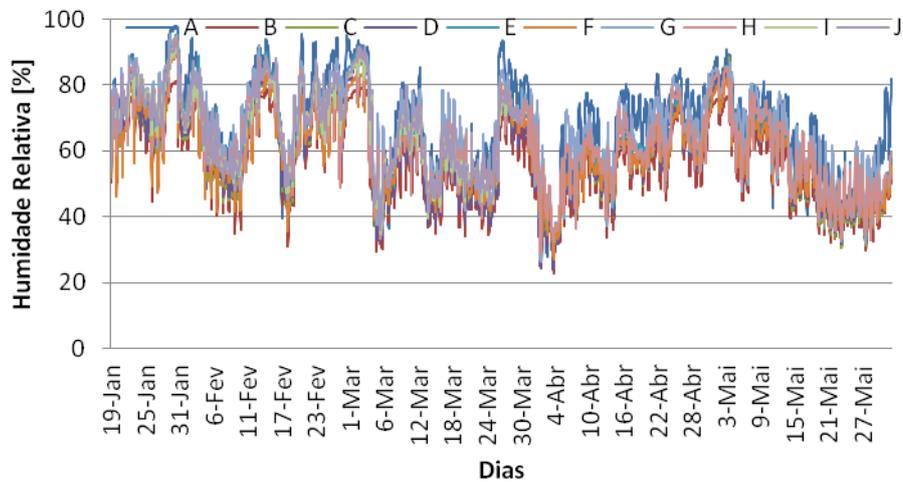


Fig.4.23 – Valores da humidade relativa medidos pelos sensores

A mancha formada pelas curvas dos sensores não apresenta grande dispersão. Mesmo o sensor A que está em contacto com o ar exterior apenas apresenta valores de humidade relativa ligeiramente superiores, não sendo tão notório como no caso da temperatura. É ainda visível na Figura 4.23 que os meses de janeiro e fevereiro são mais húmidos do que os restantes.

A Figura 4.24 representa a variação da humidade relativa medida pelo sensor A

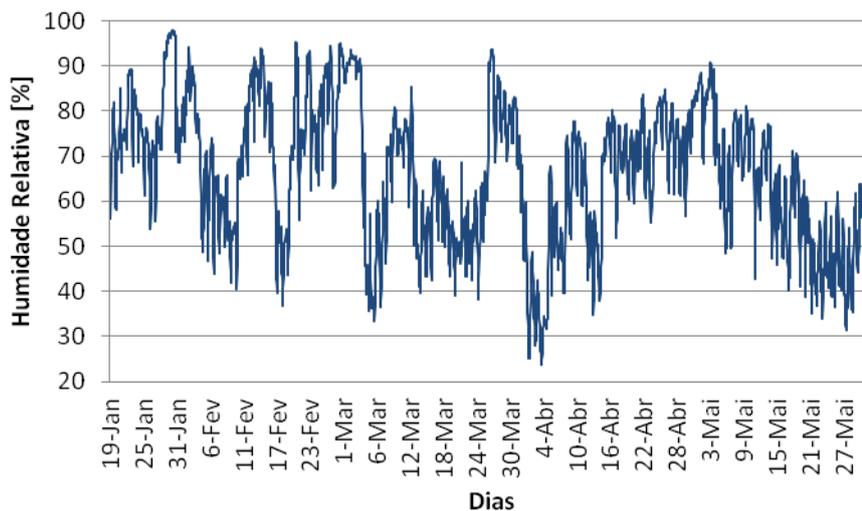


Fig.4.24 – Variação da humidade relativa registada pelo sensor A

Como se pode observar na Figura 4.24 a humidade relativa vai diminuindo ao longo do período de medição, sendo maio o mês menos húmido, em oposição os meses de janeiro e fevereiro, meses mais

húmidos, sendo que em abril é registado um período com elevada humidade relativa seguido de uma redução.

Na Figura 4.25 encontram-se as curvas dos valores medidos pelos sensores e a curva de humidade relativa média da zona da cantina.

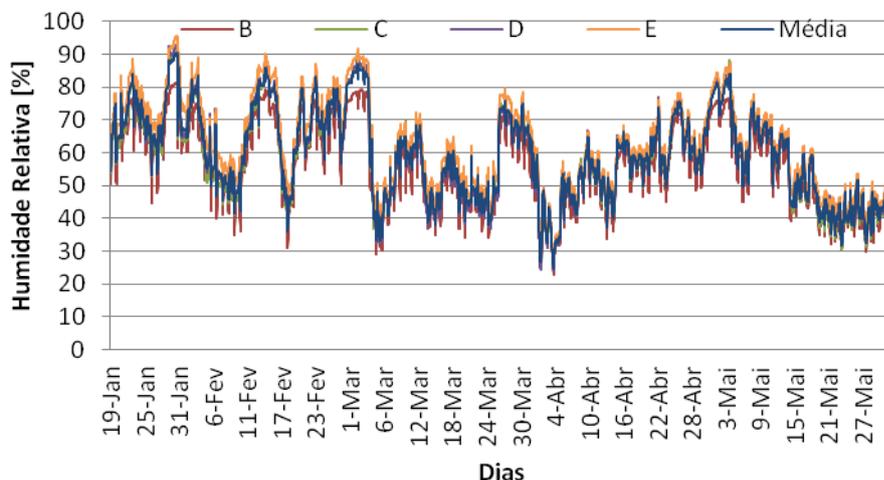


Fig.4.25 – Variação da humidade relativa na cantina

Na Figura 4.25 pode-se visualizar a mancha formada pelas respetivas curvas, na qual o sensor E é o que regista valores mais elevados em oposição ao sensor B que regista os valores mais baixos. O sensor B está próximo dos envidraçados, o que pode justificar o fato da humidade relativa ser menor. Por sua vez, o sensor E encontra-se alinhado com o C e D, não havendo motivo aparente para registar valores superiores. É também notória a redução da humidade relativa ao longo do período de medição, com a exceção de um aumento durante o mês de abril até ao início do mês de maio.

A humidade relativa sentida no bar é representada na Figura 4.26 correspondendo aos valores medidos pelo sensor F.

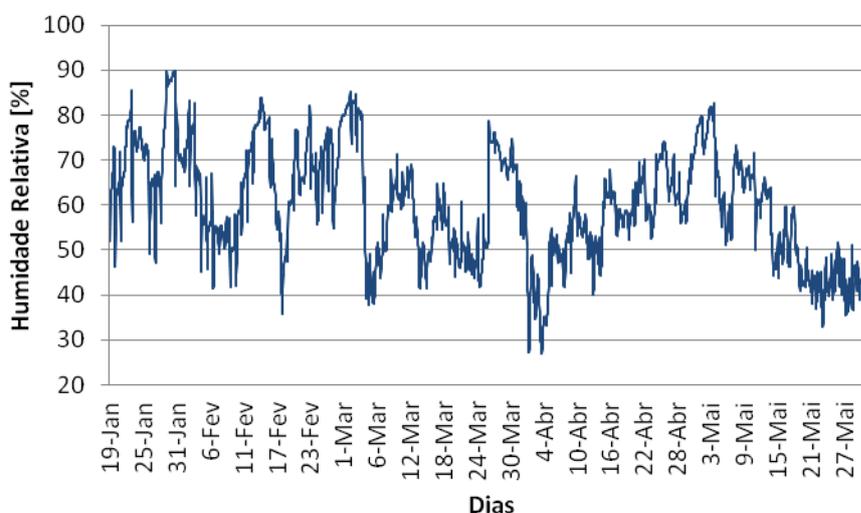


Fig.4.26 – Variação da humidade relativa no bar

O bar apresenta uma variação da humidade relativa muito semelhante à registada na cantina, diminuindo ao longo do período de medição. Entre abril e o início de maio ocorre um aumento da humidade relativa, voltando a diminuir a partir de dia 3 ou 4 de maio.

A humidade relativa média no grill e os valores medidos pelos respetivos sensores encontram-se na Figura 4.27.

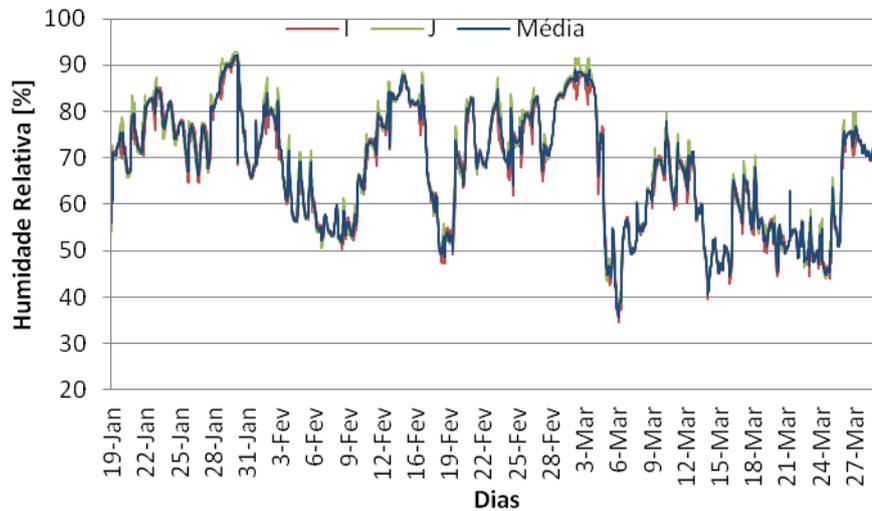


Fig.4.27 – Variação da humidade relativa no grill

Tal como na temperatura, apenas existem valores até dia 29 de março, mais uma vez não é possível comparar esta zona com as restantes devido à falta de dados. De acordo com os dados disponíveis é visível que até ao mês de março esta zona se comporta como as restantes, havendo diminuição da humidade relativa ao longo do período de medição.

A Figura 4.28 contém as curvas de valores de registados pelos sensores instalados na cozinha e a curva da humidade relativa média.

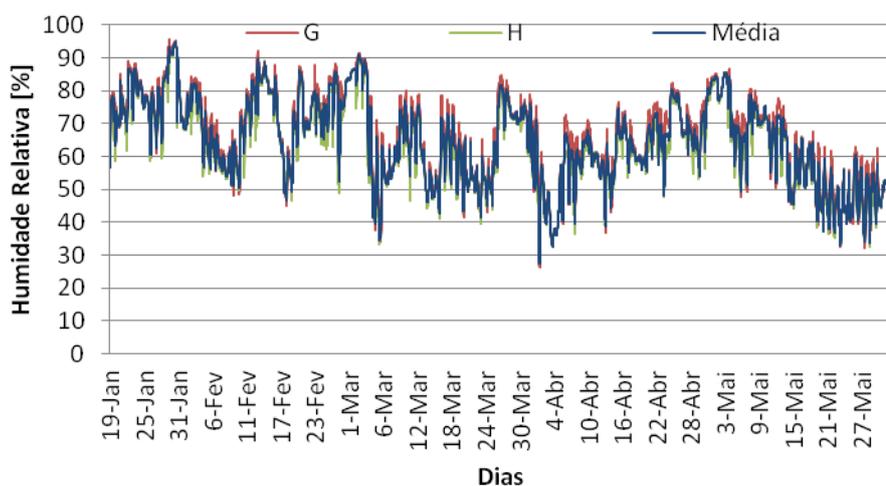


Fig.4.28 – Variação da humidade relativa na cozinha

Como se pode ver na Figura 4.28 o sensor G é o que regista valores de humidade relativa mais elevados, o que pode estar relacionado com o seu posicionamento. Este sensor encontra-se fixo numa parede revestida por azulejo na qual escorrem partículas de água nos períodos em que a quantidade de vapor de água é mais elevada. Em relação à variação da humidade relativa, é semelhante à das restantes zonas diminuindo ao longo do período de medição com a exceção entre o mês de abril e início de maio, em que ocorre um ligeiro aumento.

#### 4.2.2.3. Velocidade do ar

Foi usado um anemómetro (Figura 4.29) para medir a velocidade do ar que atravessa as grelhas de ventilação. Inicialmente foram registados apenas os valores nas grelhas de extração mecânica para comprovar se os valores de projeto correspondem aos valores reais. Como o sistema de extração mecânica é programado e não há conhecimento sobre os períodos de funcionamento, efetuaram-se as medições em três alturas distintas do dia: meio da manhã, durante o período de almoço, meio da tarde.



Fig.4.29 – Anemómetro usado para registar a velocidade do ar

No Quadro 4.4 encontram-se os valores da velocidade do ar nas grelhas de extração mecânica para as diferentes zonas nas três alturas do dia descritas. Como se pode observar, apenas na zona da cozinha são cumpridas as velocidades de projeto. No bar existe extração mecânica durante o período de almoço, porém a velocidade do ar medida é inferior ao valor de projeto, nesta zona no período de almoço é ainda ligado o ar condicionado. Nas restantes zonas o sistema de extração encontra-se desligado. Os exaustores instalados na cozinha não estão representados no Quadro 4.4, pois estes são acionados mediante um horário fixo descrito em §3.2, para os quais as velocidades do ar definidas em projeto são cumpridas.

Quadro 4.4 – Valores da velocidade do ar da extração mecânica

Altura do dia	Zona	v [m/s]	v [m/h]	A <sub>grelha</sub> [m <sup>2</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> /h]	V [m <sup>3</sup> ]	Rph [h <sup>-1</sup> ]
Meio da manhã	Cantina	0	0	1,95	0	1573	0
	Bar	0	0	1,35	0	387	0
	Grill	0	0	1,25	0	1140	0
	Cozinha	1,50	5278	0,20	950	850	1,1
Período de almoço	Cantina	0	0	1,95	0	1573	0
	Bar	0,25	900	1,35	1206	387	3,1
	Grill	0	0	1,25	0	1140	0
	Cozinha	1,50	5278	0,20	950	850	1,1
Meio da tarde	Cantina	0	0	1,95	0	1573	0
	Bar	0	0	1,35	0	387	0
	Grill	0	0	1,25	0	1140	0
	Cozinha	1,50	5278	0,20	950	850	1,1

Em seguida foi medida a velocidade do ar que atravessa as grelhas de admissão natural. Na Figura 4.30 encontram-se numerados os locais onde foram efetuadas as medições.

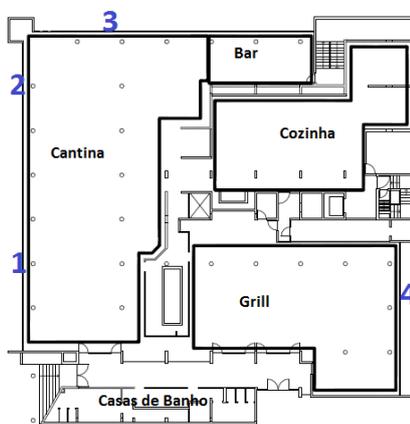


Fig.4.30 – Locais onde foi medida a velocidade do ar

Na zona do bar existem grelhas de admissão de ar, no entanto, estas encontram-se tapadas pelo que a velocidade do ar nessas grelhas é zero.

Foram efetuadas medições de 5 em 5 minutos durante uma hora com o objetivo de caracterizar a infiltração de ar no edifício. Os valores das medições estão representados na Figura 4.31. Foi também medida a velocidade do ar nas grelhas com exaustor desligado, exaustor na primeira velocidade e exaustor na segunda velocidade de modo a perceber se há alguma influência nas restantes zonas,

quando o exaustor é ligado, no entanto, não se verificou nenhuma alteração significativa pelo que a extração provocada pelos exaustores é devidamente compensada pela admissão de ar forçada, não alterando o funcionamento normal edifício.

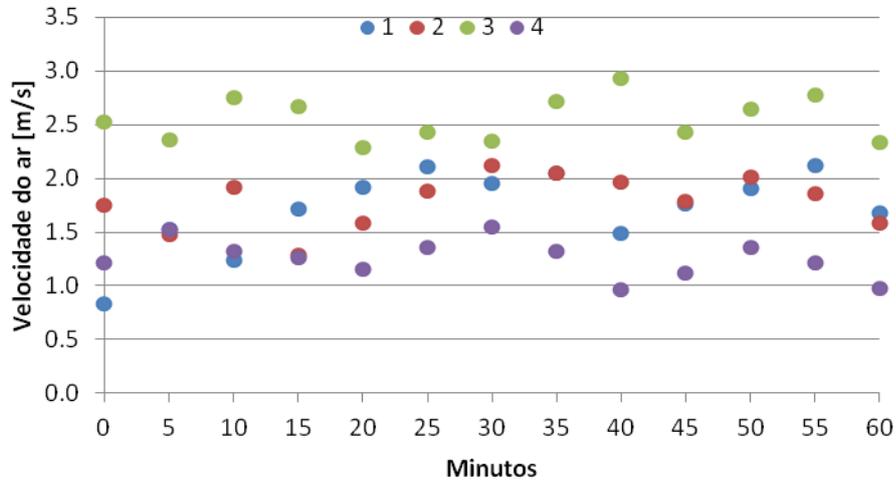


Fig.4.31 – Valores de velocidade do ar para a admissão natural

Como se pode visualizar na Figura 4.31, na zona do grill local (local 4) a velocidade do ar é ligeiramente inferior. Na zona da cantina, a velocidade do ar varia em função do lugar, sendo maior na grelha ao longo do alçado noroeste (local 2), ao longo do alçado sudoeste devido à sua extensão, optou-se por medir em dois locais sendo a velocidade do ar registada nas duas medições próximas.

O Quadro 4.5 contém os valores de renovação horária em função da velocidade média do ar nas duas zonas. No grill a velocidade média do ar é o valor médio dos dados registados no local 4, por sua vez na cantina a velocidade média do ar é a média aritmética dos valores registados nos três locais.

Quadro 4.5 – Valores da velocidade do ar de admissão natural

Zona	v [m/s]	v [m/h]	Agrelha [m <sup>2</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> /h]	V [m <sup>3</sup> ]	Rph [h <sup>-1</sup> ]
Cantina	2,02	7273	0,85	6182	1573	3,9
Grill	1,25	4525	0,31	1403	1140	1,2

Os valores medidos correspondem a um Rph elevado na zona da cantina, no entanto as grelhas de admissão localizadas ao longo da cantina são o local de entrada de ar para todo o edifício, sendo que apenas o grill tem admissão de ar, mas não existe barreira física entre as duas zonas pelo que é possível que o ar se desloque da cantina para o grill, dado ser menor a infiltração neste. Na zona do bar, estando as grelhas de admissão tapadas, é esperado que o ar chegue a esta zona proveniente da cantina. A cozinha, embora tenha um sistema próprio de extração e admissão mecânica, tal só acontece no período de confeção, nos restantes períodos do dia apenas existe extração mecânica pelo que o ar admitido nesta zona tem origem da cantina. Assim o Rph de 3.9 h<sup>-1</sup> seria elevado para a zona da cantina, apesar disso, trata-se da infiltração que assegura a renovação de ar de grande parte do edifício.

### 4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 4.3.1. VARIABILIDADE ENTRE SENSORES

Na apresentação dos dados, a visualização das curvas dos valores medidos pelos sensores indicava que os sensores dentro da mesma zona podiam, por vezes, registar valores ligeiramente diferentes, no entanto, era apenas uma análise visual. De modo a quantificar essa variabilidade calculou-se o valor médio e o desvio padrão dos dados medidos por cada sensor, usando gráficos do tipo *Box Plot*. Foram excluídos desta análise os sensores I e J que caracterizavam a zona do grill, uma vez que foram retirados antes de acabar o período de medição, pelo que não seria correto comparar os seus valores com os dos restantes sensores. A Figura 4.32 contém o valor médio e o desvio padrão da temperatura medida pelos sensores.

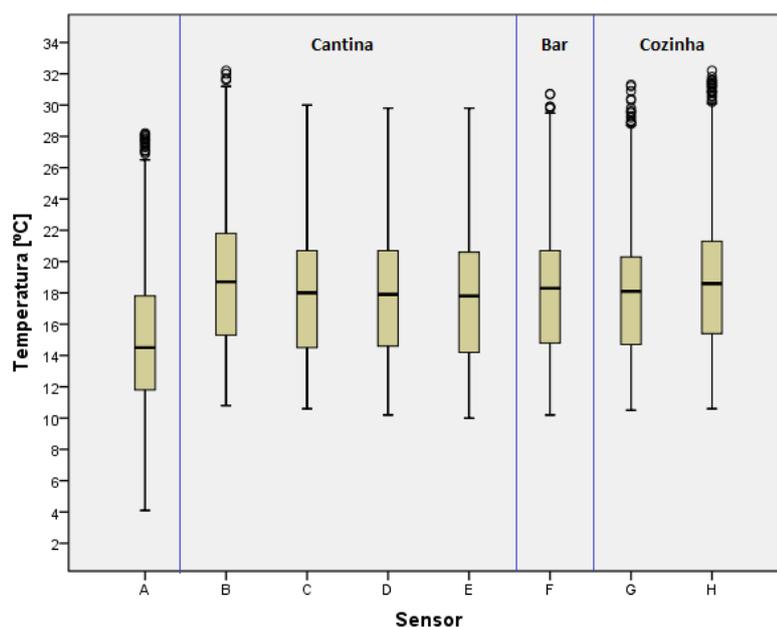


Fig.4.32 – Valores médios e desvio padrão da temperatura medida pelos sensores

O sensor A apresenta uma temperatura média cerca de 4°C inferior à registada nos restantes sensores e uma variação de temperaturas mais extensa. É visível na Figura 4.32 que nos restantes sensores a temperatura média e o desvio padrão são semelhantes, havendo apenas algumas diferenças pouco significativas. Na zona da cantina, de acordo com o observado na apresentação dos resultados, o sensor B regista valores ligeiramente superiores, dada a sua proximidade aos envidraçados onde a temperatura é superior, por sua vez os sensores C, D e E encontram-se alinhados e à mesma distância dos envidraçados, registando valores muito semelhantes. Na zona da cozinha é também perceptível o ligeiro aumento de temperatura registado pelo sensor H, sendo que este foi colado ao exaustor, onde durante a confeção são atingidas temperaturas mais elevadas. Os sensores F e G apresentam valores semelhantes aos medidos na zona da cantina.

A Figura 4.33 realça as diferenças entre as zonas usando a média dos sensores que fazem parte de cada uma.

Se as diferenças registadas entre cada sensor eram pouco significativas, entre zonas são quase inexistentes. É certo que os valores não são coincidentes, no entanto, as diferenças são desprezáveis como se pode observar na Figura 4.33.

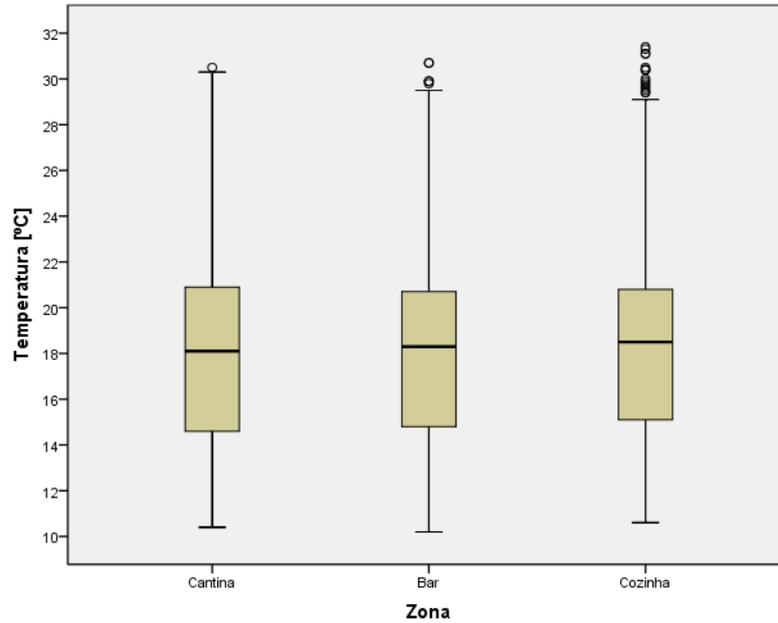


Fig.4.33 – Valores médios e desvio padrão da temperatura em cada zona

Na Figura 4.34 encontram-se os valores médios e desvio padrão dos valores de humidade relativa medidos pelos vários sensores.

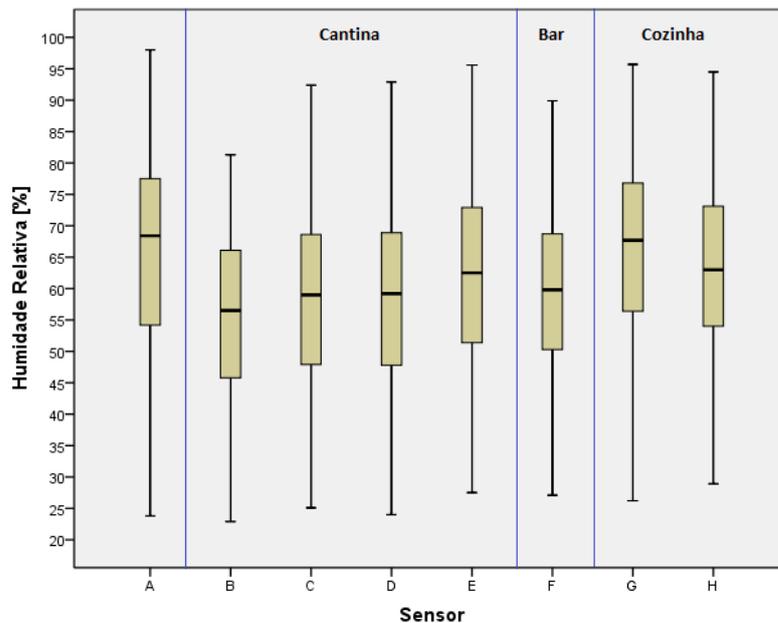


Fig.4.34 – Valores médios e desvio padrão da humidade relativa medida pelos sensores

No caso da humidade relativa observa-se na Figura 4.34 que há maior variação nos valores registados. O sensor A volta a destacar-se dos restantes, apresentando uma humidade relativa média mais elevada. Todos os sensores apresentam desvios elevados em relação ao valor médio, sendo o sensor B aquele que regista menor desvio e menor valor médio da humidade relativa, mais uma vez devido à sua localização. Nos restantes sensores instalados na cantina, os sensores C e D registam valores praticamente iguais. O sensor E apresenta um valor médio da humidade relativa ligeiramente superior, no entanto, as curvas de variação da humidade relativa representadas na Figura 4.25 já indicavam um ligeiro aumento nos valores registados por este sensor. Na cozinha, tal como era visível na apresentação de resultados é o sensor G que regista valores mais elevados devido à sua localização. O sensor F apresenta valores próximos dos registados pelos sensores C e D, por sua vez os valores do sensor H são semelhantes ao sensor E, mesmo estando em zonas diferentes.

Os valores médios e respetivos desvios da humidade relativa que caracterizam as diferentes zonas são representados na Figura 4.35

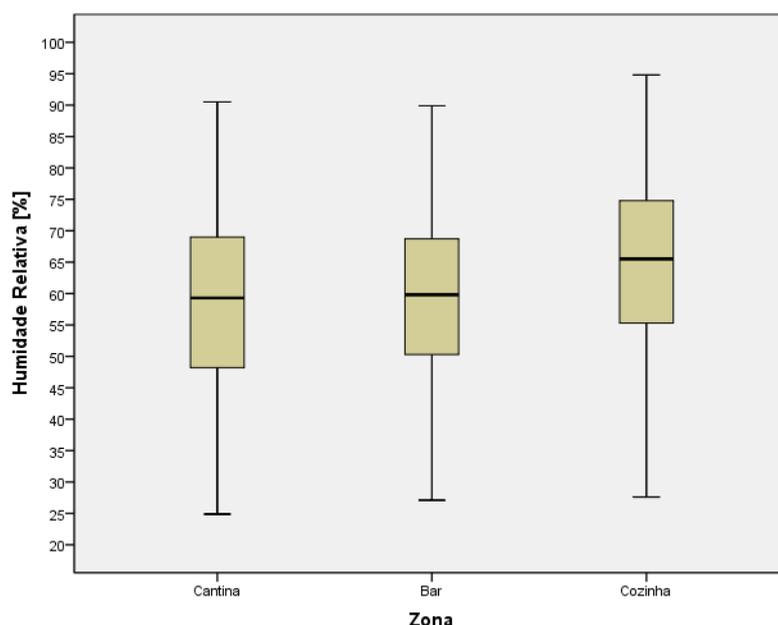


Fig.4.35 – Valores médios e desvio padrão da humidade relativa em cada zona

Na Figura 4.35 é visível que a humidade relativa média na zona da cantina e do bar é praticamente a mesma, havendo diferença para a zona da cozinha onde esta é maior, tal já era esperado dada a elevada quantidade de vapor produzida nesta zona. Esta diferença poderia ser maior caso a cozinha não tivesse um adequado sistema de renovação de ar.

Tanto para os valores de temperatura como de humidade relativa, o sensor A apresenta diferenças significativas em relação aos restantes, o que é normal dado que este regista valores do ar exterior, assim as Figuras 4.36 e 4.37 contêm as curvas do sensor A e do clima exterior sobrepostas para os valores de temperatura e humidade relativa.

A variação de temperatura registada pelo sensor A acompanha a variação medida pela estação meteorológica, sendo que as duas medições apenas diferem na amplitude dos valores medidos como se pode observar na Figura 4.36. Em relação à variação de humidade relativa, o cenário é semelhante (Figura 4.37). É normal que os dados registados por este sensor apresentem menor amplitude, para tal

contribui a sua localização, dentro do edifício, que funciona como proteção das condições exteriores mais extremas.

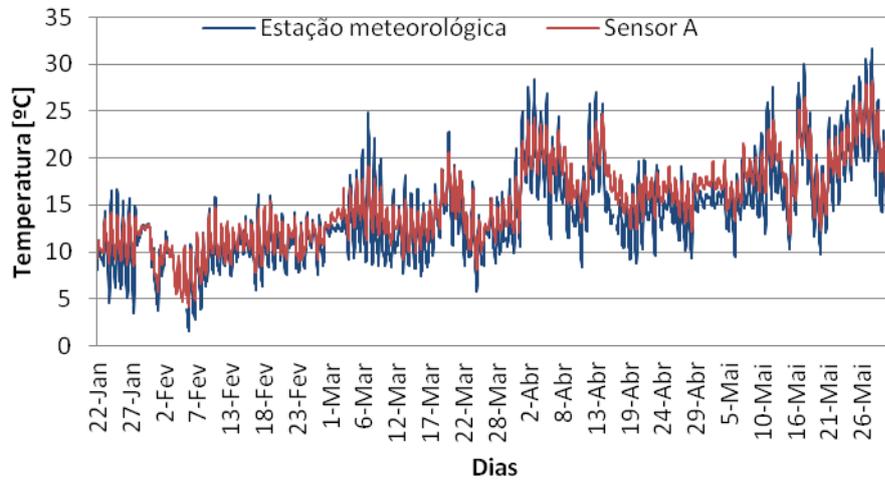


Fig.4.36 – Valores de temperatura medidos pela estação meteorológica e pelo sensor A

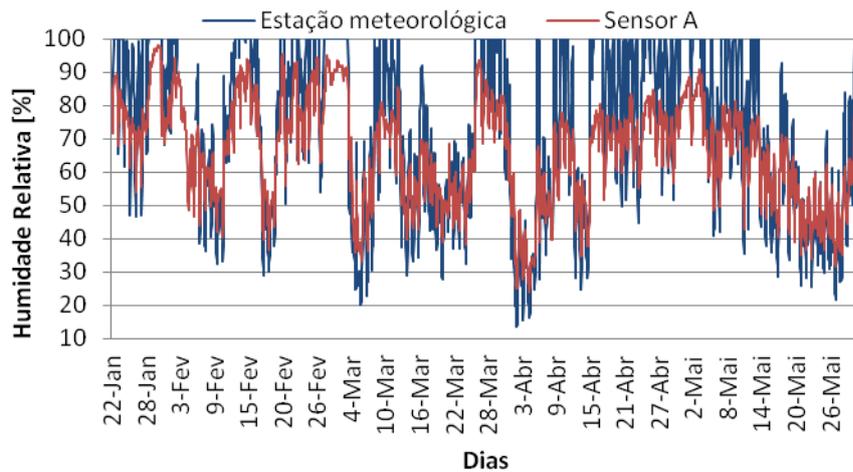


Fig.4.37 – Valores de humidade relativa medidos pela estação meteorológica e pelo sensor A

No Quadro 4.6 é feita uma síntese dos valores característicos de cada zona, onde foram calculados a pressão exterior ( $P_e$ ), pressão interior ( $P_i$ ), pressão de saturação exterior ( $P_{se}$ ) e pressão de saturação interior ( $P_{si}$ ) com base nos valores medidos de temperatura exterior ( $T_e$ ), temperatura interior ( $T_i$ ), humidade relativa exterior ( $H_{re}$ ) e humidade relativa interior ( $H_{ri}$ ).

Quadro 4.6 – Valores característicos de cada zona durante o período de medição

Mês	Zona		Te (°C)	Hre (%)	Pe (Pa)	Ti (°C)	Hri (%)	Pi (Pa)	Pse (Pa)	Psi (Pa)
Jan	Cantina	P10	5,4	57	508	12,0	64	894	897	1401
		Méd	9,8	82	996	13,4	73	1120	1210	1545
		P90	14,0	100	1599	15,7	88	1566	1599	1785
	Bar	P10	5,4	57	508	12,1	61	854	897	1410
		Méd	9,8	82	996	13,7	72	1124	1210	1571
		P90	14,0	100	1599	16,1	87	1600	1599	1830
	Cozinha	P10	5,4	32	508	12,5	69	1001	897	1448
		Méd	9,8	82	996	13,9	79	1249	1210	1587
		P90	14,0	100	1599	16,2	91	1677	1599	1840
	Grill	P10	5,4	32	508	11,8	69	961	897	1384
		Méd	9,8	82	996	13,2	78	1182	1210	1520
		P90	14,0	100	1599	15,2	89	1540	1599	1728
Fev	Cantina	P10	6,9	45	449	11,6	48	657	996	1369
		Méd	9,9	78	958	13,6	65	1012	1225	1562
		P90	12,8	100	1485	15,9	80	1446	1485	1815
	Bar	P10	6,9	45	449	11,7	50	691	996	1373
		Méd	9,9	78	958	13,9	64	1018	1225	1595
		P90	12,8	100	1485	17,2	78	1533	1485	1967
	Cozinha	P10	6,9	45	449	12,2	56	788	996	1419
		Méd	9,9	78	958	14,1	70	1129	1225	1616
		P90	12,8	100	1485	16,3	83	1545	1485	1862
	Grill	P10	6,9	45	449	11,5	54	731	996	1360
		Méd	9,9	78	958	13,5	69	1065	1225	1550
		P90	12,8	100	1485	15,7	82	1473	1485	1786
Mar	Cantina	P10	9,1	38	438	15,4	42	738	1157	1748
		Méd	12,8	69	1025	17,2	57	1126	1483	1961
		P90	17,4	100	1991	19,7	81	1866	1991	2297
	Bar	P10	9,1	38	438	15,3	45	788	1157	1745
		Méd	12,8	69	1025	16,9	59	1145	1483	1928

		P90	17,4	100	1991	18,9	79	1724	1991	2186
	Cozinha	P10	9,1	38	438	15,7	49	872	1157	1789
		Méd	12,8	69	1025	17,4	64	1270	1483	1992
		P90	17,4	100	1991	19,7	83	1914	1991	2302
	Grill	P10	9,1	38	438	15,2	47	814	1157	1734
		Méd	12,8	69	1025	16,8	61	1175	1483	1911
		P90	17,4	100	1991	18,8	84	1824	1991	2179
Abr	Cantina	P10	11,5	32	442	18,4	40	846	1362	2117
		Méd	16,0	71	1299	20,4	55	1315	1821	2406
		P90	21,7	100	2603	22,5	67	1836	2603	2734
	Bar	P10	11,5	32	442	18,5	42	897	1362	2140
		Méd	16,0	71	1299	20,3	56	1327	1821	2389
		P90	21,7	100	2603	22,2	67	1809	2603	2688
	Cozinha	P10	11,5	32	442	18,7	45	972	1362	2164
		Méd	16,0	71	1299	20,5	61	1460	1821	2412
		P90	21,7	100	2603	22,6	72	1994	2603	2755
	Grill	P10	-	-	-	-	-	-	-	-
		Méd	-	-	-	-	-	-	-	-
		P90	-	-	-	-	-	-	-	-
Mai	Cantina	P10	13,7	37	573	18,5	40	846	1568	3131
		Méd	18,4	67	1433	22,6	55	1501	2124	2750
		P90	25,0	100	3168	26,7	75	2626	2603	3500
	Bar	P10	13,7	37	573	18,7	41	887	1568	2167
		Méd	18,4	67	1433	22,6	55	1508	2124	2740
		P90	25,0	100	3168	26,5	73	2541	2603	3461
	Cozinha	P10	13,7	37	573	18,9	43	936	1568	2188
		Méd	18,4	67	1433	22,6	59	1632	2124	2749
		P90	25,0	100	3168	26,8	79	2779	2603	3521
	Grill	P10	-	-	-	-	-	-	-	-
		Méd	-	-	-	-	-	-	-	-
		P90	-	-	-	-	-	-	-	-

No Quadro 4.6, além dos dados estatísticos do clima exterior e interior, encontram-se também os valores da pressão de saturação interior e exterior. Apenas no clima exterior a pressão exterior iguala a pressão de saturação. No caso da pressão interior esta é sempre menor do que a pressão de saturação, sendo o valor máximo registado em maio na cozinha, onde os valores da pressão são mais elevados. Em alguns casos a pressão exterior é superior à pressão interior, devido à elevada humidade relativa exterior.

#### 4.3.2. CORRELAÇÃO ENTRE ZONAS

Sendo conhecida a variação entre cada sensor, dentro e fora da respetiva zona, e estabelecida a temperatura média e humidade relativa média de cada zona, é possível relacionar as várias zonas usando a correlação linear, onde a cantina será usada como zona de comparação, ou seja, todas as comparações serão entre uma das zonas do edifício e a cantina para os valores de temperatura e humidade relativa. A zona do grill volta a ser incorporada nesta análise, porém na comparação entre o grill e a cantina apenas serão usados os dados até dia 29 de março.

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 representam a correlação linear para a temperatura no bar, grill e cozinha respetivamente.

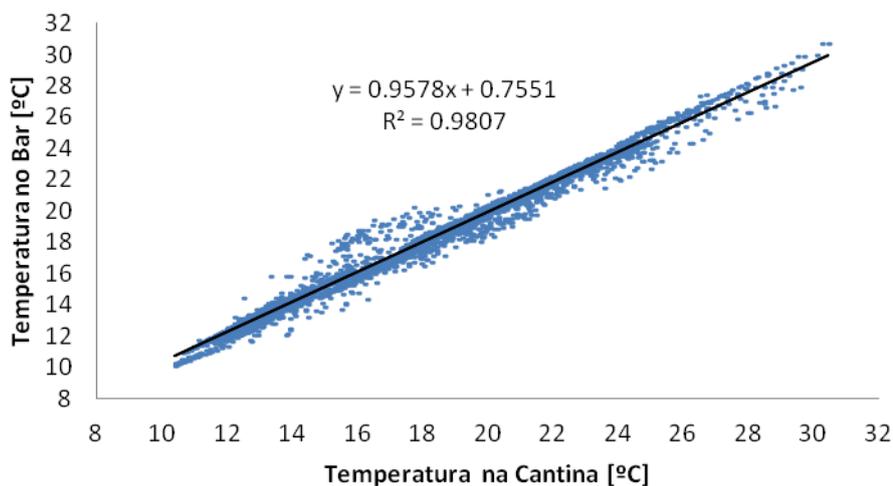


Fig.4.38 – Correlação linear entre o bar e a cantina para os valores de temperatura

Nas três situações verifica-se a existência de uma correlação forte, na qual o  $R^2$  superior a 0,9. Na Figura 4.38 observa-se que entre o bar e a cantina a correlação é aproximadamente 1, originando uma dispersão dos pontos mínima em relação à reta. O bar apresenta uma temperatura superior, no entanto, esse valor não chega a 1°C, dado a ausência de barreira física entre as duas zonas. As temperaturas ligeiramente superiores no bar podem advir da reduzida área desta zona e da proximidade aos envidraçados em comparação com a elevada área da cantina. Em termos de atividade as zonas são semelhantes.

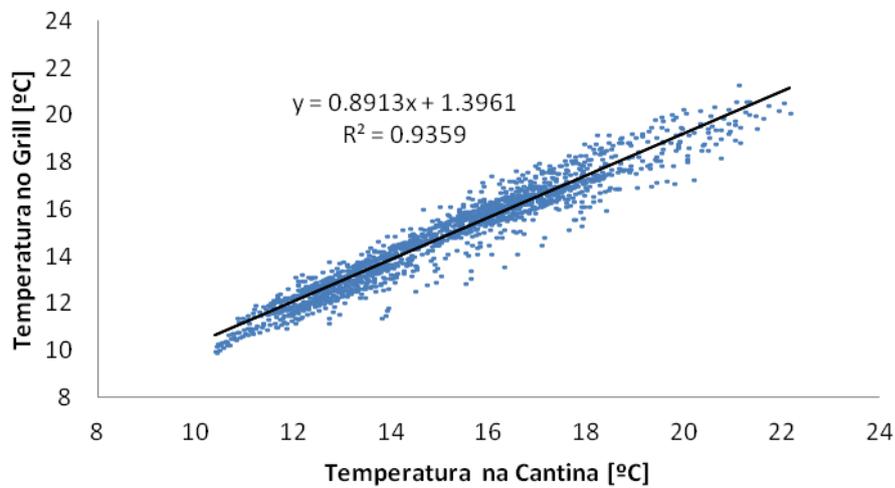


Fig.4.39 – Correlação linear entre o grill e a cantina para os valores de temperatura

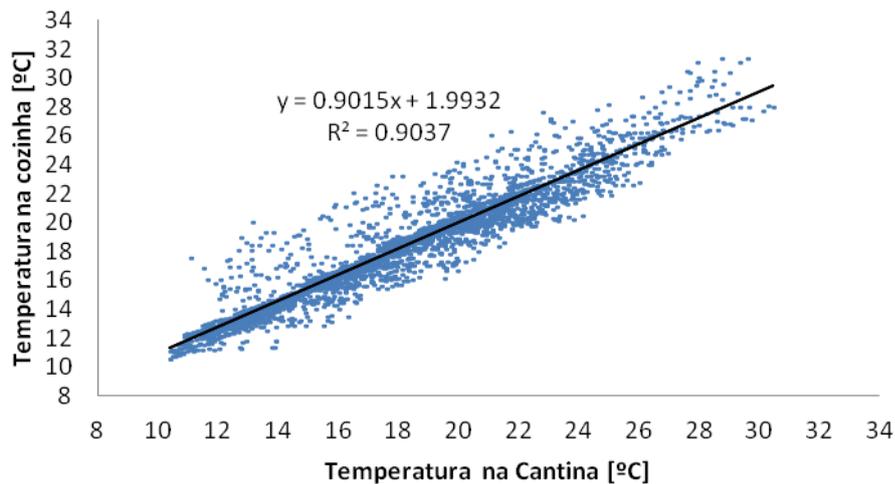


Fig.4.40 – Correlação linear entre a cozinha e a cantina para os valores de temperatura

Entre o grill e a cantina aumentam as diferenças traduzindo-se numa redução do  $R^2$  como se pode visualizar na Figura 4.39. A variação de temperaturas entre estas zonas é de aproximadamente  $1,5^\circ\text{C}$ , o que pode estar relacionado com a contribuição do local destinado à confeção de grelhados instalado no grill para o aumento da temperatura. Estas zonas apresentam também orientações diferentes, o que contribui para o aumento de diferenças entre as temperaturas sentidas

O valor mais baixo de  $R^2$  é registado entre a cozinha e a cantina, o que é aceitável dada a diferença de atividades no interior de cada zona. A Figura 4.40 mostra um aumento da dispersão dos valores em relação a reta, que se traduz numa diferença de cerca de  $2^\circ\text{C}$  entre as zonas. Assim, é normal que na cozinha sejam registadas temperaturas superiores devido à confeção de todas as refeições servidas no interior do edifício em estudo.

De modo a comparar os valores de humidade relativa entre as várias zonas, as Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 apresentam a correlação linear na zona do bar, grill e cozinha respetivamente.

Embora haja uma ligeira diminuição nos  $R^2$ , as correlações entre as várias zonas mantêm-se fortes, sendo que no caso do grill o valor manteve-se praticamente o mesmo do que no caso da temperatura.

Na Figura 4.41 é visível uma tendência linear, com uma ligeira dispersão, que se traduz numa diferença de humidade relativa entre o bar e a cantina de quase 7%, não sendo um valor muito significativo devido à variação deste parâmetro ao longo do período de medição.

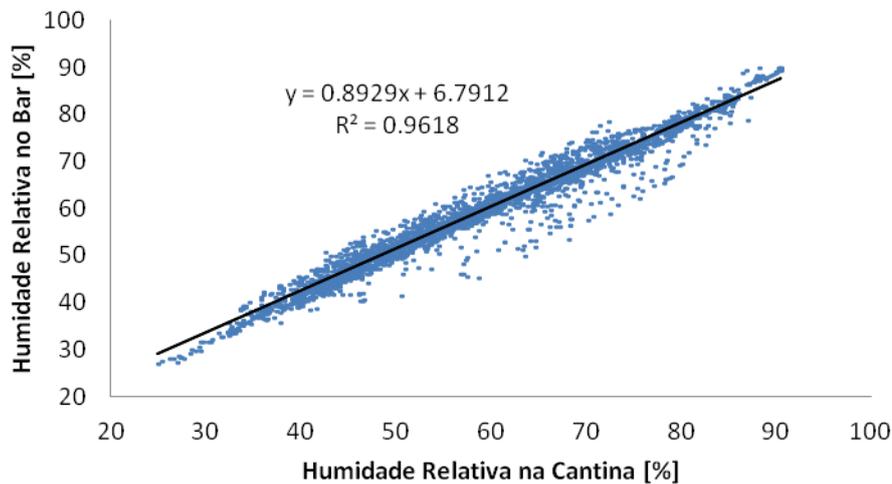


Fig.4.41 – Correlação linear entre o bar e a cantina para os valores de humidade relativa

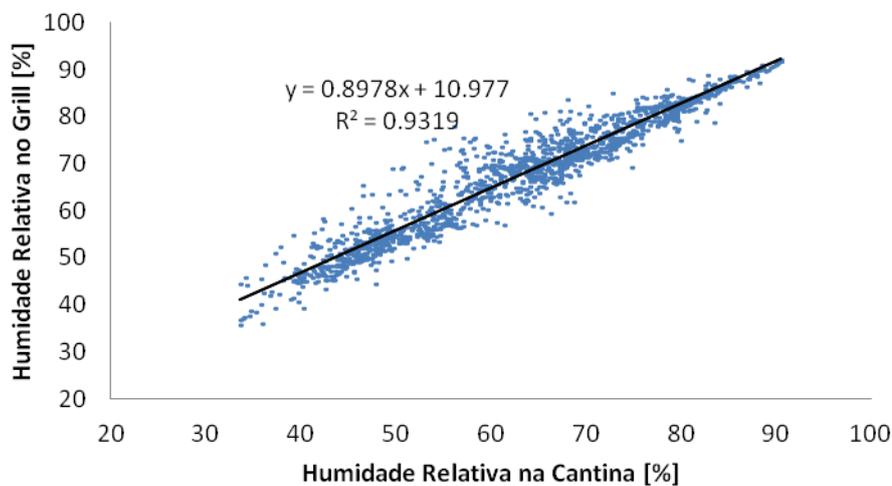


Fig.4.42 – Correlação linear entre o grill e a cantina para os valores de humidade relativa

Entre o grill e a cantina a dispersão aumenta, existindo alguns pontos com ligeiro afastamento em relação à reta como mostra a Figura 4.42. A diferença de humidade relativa entre estas zonas é próxima dos 11%, no entanto, tal como para a temperatura, esta diferença pode estar relacionada com o local de confeção de grelhados onde é normal que haja maior produção de vapor.

Mais uma vez, é entre a cozinha e a cantina que se verifica o menor valor de  $R^2$ , sendo neste caso ligeiramente inferior a 0,9. Na Figura 4.43 pode-se visualizar que a dispersão de valores é mais

significativa, aumentando a largura da mancha que engloba a reta de correlação linear, no entanto, a diferença de humidade relativa entre estas zonas é aproximadamente a mesma do que a verificada entre a cantina e o grill. Apesar dos valores das diferenças serem próximos não seria correto compará-los dado que para o grill apenas foram usados valores até dia 29 de março. É normal que a humidade relativa seja maior na cozinha do que na cantina devido à elevada produção de vapor.

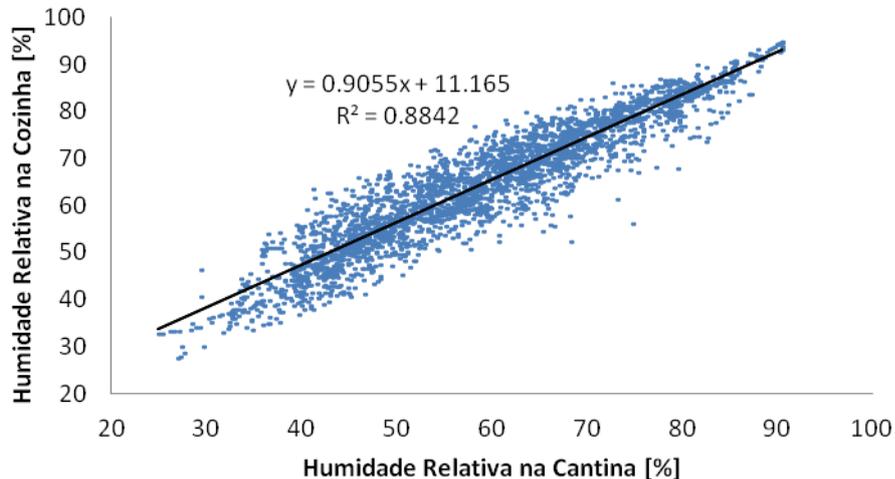


Fig.4.43 – Correlação linear entre a cozinha e a cantina para os valores de humidade relativa

As diferenças de temperatura e de humidade relativa são mais perceptíveis entre a cozinha e as restantes zonas, dado ser uma zona com atividade diferente. O grill, pela sua orientação e pelo facto de incluir mais do que um tipo de atividade apresenta algumas diferenças, não sendo estas muito acentuadas. Já o bar e a cantina são ambientes muito semelhantes, dada a sua proximidade física. Embora se verifiquem algumas alterações de zona para zona, o ambiente interior do edifício não apresenta oscilações muito significativas.

#### 4.3.3. MODELOS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

As análises feitas até ao momento foram essencialmente relativas às variações entre medições e entre as diversas zonas, no entanto, a melhor forma de perceber a importância de tais variações é avaliar o grau de satisfação dos ocupantes. Para tal foram usados dois modelos de avaliação do conforto térmico mencionados em § 2.1: o modelo gráfico proposto pela norma ASHRAE 55 e o modelo de conforto adaptativo sugerido pela norma ISO 15251, sendo seguidas todas as limitações e indicações presentes nas respetivas normas. Em ambos os modelos a temperatura operativa usada será a temperatura média de cada zona, sendo possível que perto dos envidraçados as temperaturas não sejam coincidentes.

Segundo o modelo gráfico proposto pela ASHRAE 55, a zona de conforto situa-se aproximadamente entre os 20°C e os 28,5°C, estando dividida entre Inverno e Verão. Nas Figuras 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47 encontra-se a aplicação do modelo para as zonas da cantina, bar, grill e cozinha, respetivamente.

Em todas as zonas é visível que uma parte considerável dos registos se situa fora da zona de conforto, nomeadamente na parte inferior do limite mínimo da zona de conforto, 20°C, sendo que em alguns casos foram registadas temperaturas 10°C inferiores a esse limite. Por sua vez, a humidade absoluta não apresenta valores muito elevados, estando na maioria dos casos dentro dos limites da zona de

conforto. De modo a avaliar mais detalhadamente o conforto em cada zona, será feita uma análise mensal, pois durante o período de medição existem meses em que as zonas apresentam níveis adequados de conforto e outros em que os dados registados não são aceitáveis do ponto de vista térmico.

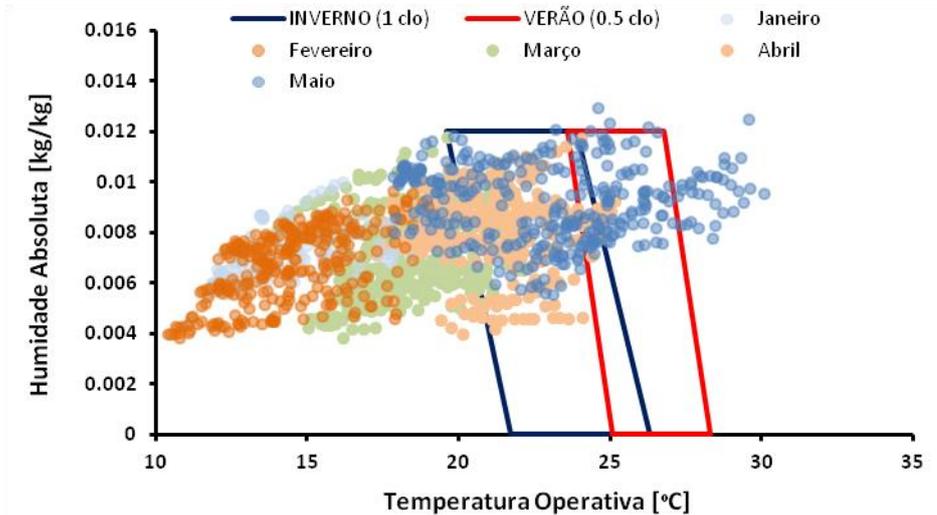


Fig.4.44 – Avaliação do conforto térmico na cantina usando o modelo gráfico da ASHRAE 55

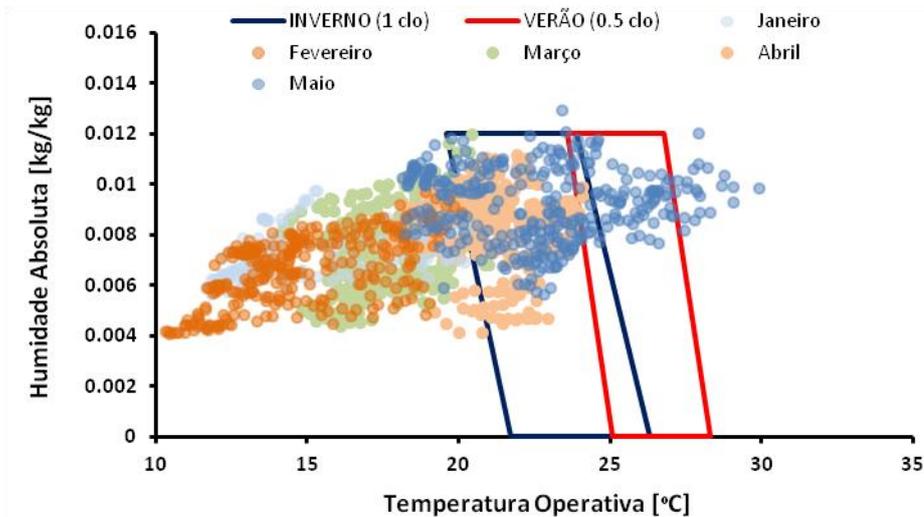


Fig.4.45 – Avaliação do conforto térmico no bar usando o modelo gráfico da ASHRAE 55

Na zona da cantina, como se pode observar na Figura 4.44 durante os meses de janeiro e fevereiro todos os valores encontram-se fora da zona de conforto. No mês de março a maioria dos registos encontra-se ainda fora da zona de conforto, todavia a temperatura é um pouco superior do que nos meses anteriores, permitindo que alguns registos se situem na zona de conforto. Em abril e maio verifica-se uma subida das temperaturas originando o aparecimento de uma mancha de registos dentro da zona de conforto, no entanto, em maio o aumento da temperatura origina momentos em que ocorre sobreaquecimento.

Como se pode visualizar na Figura 4.45 o comportamento no bar é muito semelhante ao da cantina, existindo um período considerável com temperaturas baixas, seguidas de uma mancha dentro da zona de conforto e algumas temperaturas elevadas provocando sobreaquecimento.

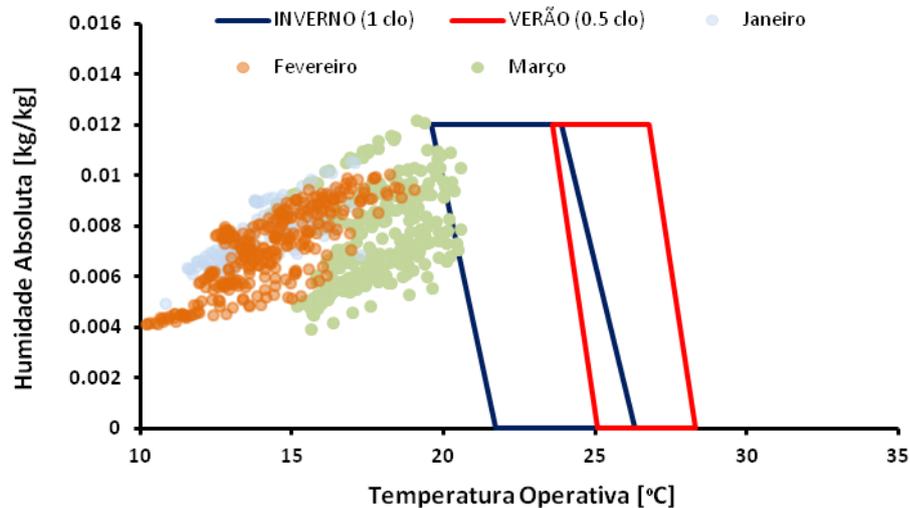


Fig.4.46 – Avaliação do conforto térmico no grill usando o modelo gráfico da ASHRAE 55

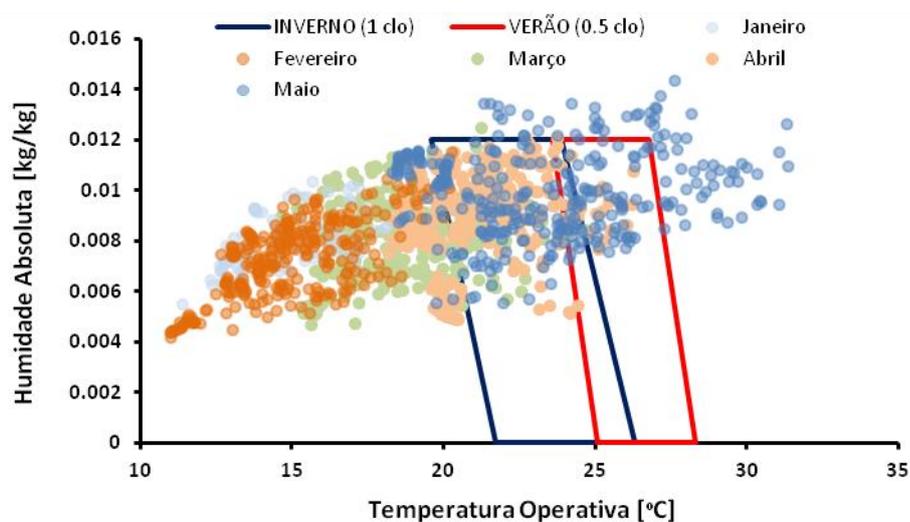


Fig.4.47 – Avaliação do conforto térmico na cozinha usando o modelo gráfico da ASHRAE 55

A análise do grill é novamente comprometida pela falta de dados, a Figura 4.46 mostra que praticamente todos os valores estão fora da zona de conforto com algumas exceções no mês de março. Nos meses em que há resultados esta zona apresenta comportamento semelhante ao do bar e cantina.

Na Figura 4.47 é visível um aumento da umidade absoluta na cozinha verificando-se alguns valores acima do limite superior. A temperatura também é mais elevada, traduzindo-se num sobreaquecimento mais acentuado nesta zona, no entanto, tal como nas restantes zonas, é registada uma preponderância de temperaturas baixas fora da zona de conforto para os meses de janeiro, fevereiro e grande parte de março.

Usando o modelo de conforto térmico adaptativo sugerido pela norma ISO 15251, os resultados não são muito diferentes, as Figuras 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51 contêm os resultados da cantina, bar, grill e cozinha respetivamente.

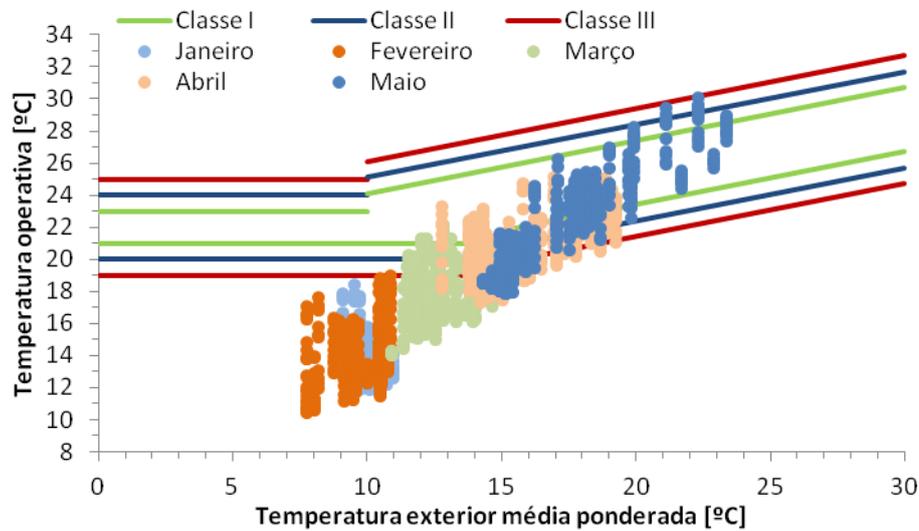


Fig.4.48 – Avaliação do conforto térmico adaptativo na cantina usando o modelo da ISO 15251

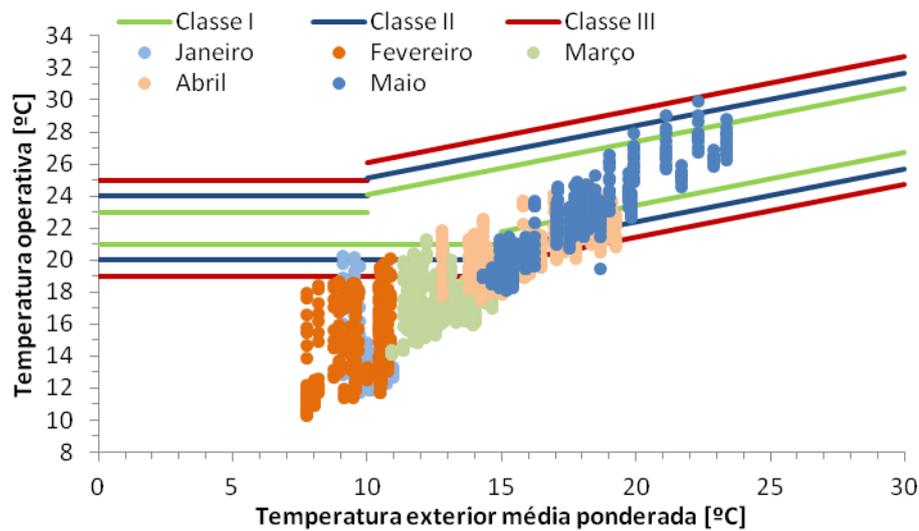


Fig.4.49 – Avaliação do conforto térmico adaptativo no bar usando o modelo da ISO 15251

A Figura 4.48 mostra que na cantina, para os meses de janeiro e fevereiro, em que a temperatura exterior é baixa, os registos encontram-se fora das classes de exigência, o que significa que a percentagem de utilizadores satisfeitos é inferior a 85%. O aumento da temperatura exterior ao longo do período de medição vai permitir um aumento do número de utilizadores satisfeitos, sendo que grande parte dos valores registados durante o mês de maio encontram-se dentro da classe I. Durante os meses de março e abril, a percentagem vai aumentando, se por um lado em março ainda se registam alguns valores fora das classes exigências, em abril o conforto aumenta chegando a ser atingidas percentagens de satisfação de 94%.

O bar apresenta novamente resultados muito próximos dos registados na cantina, existindo ligeiras variações sem grande significado, como se observa na Figura 4.49.

No caso do grill, é exposto na Figura 4.50 que em janeiro e fevereiro, tal como acontece na cantina, os valores medidos se encontram quase na totalidade fora das classes de exigência de conforto térmico. No mês de março a situação melhora ligeiramente, onde alguns dos valores registados encontram-se dentro da classe II e III. O grill tem um comportamento semelhante ao verificado na cantina e no bar, no entanto, apenas temos dados até ao final de março o que limita a análise desta zona.

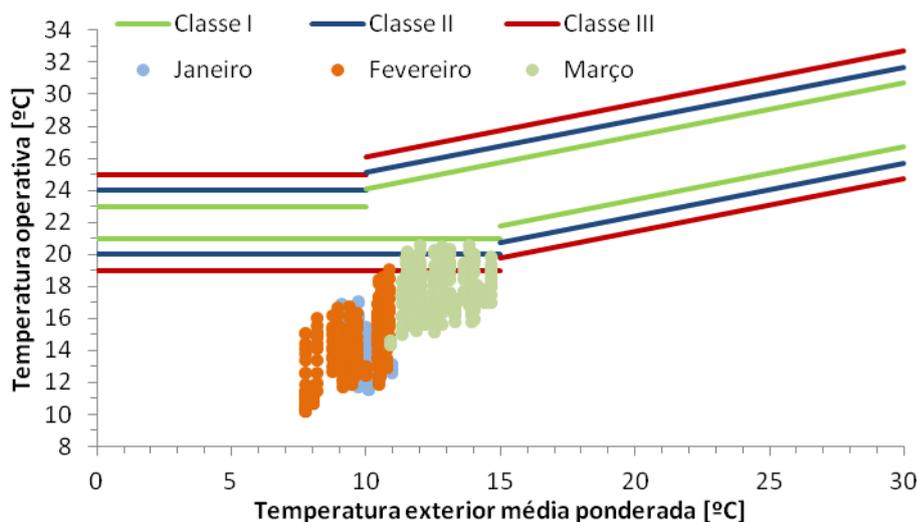


Fig.4.50 – Avaliação do conforto térmico adaptativo no grill usando o modelo da ISO 15251

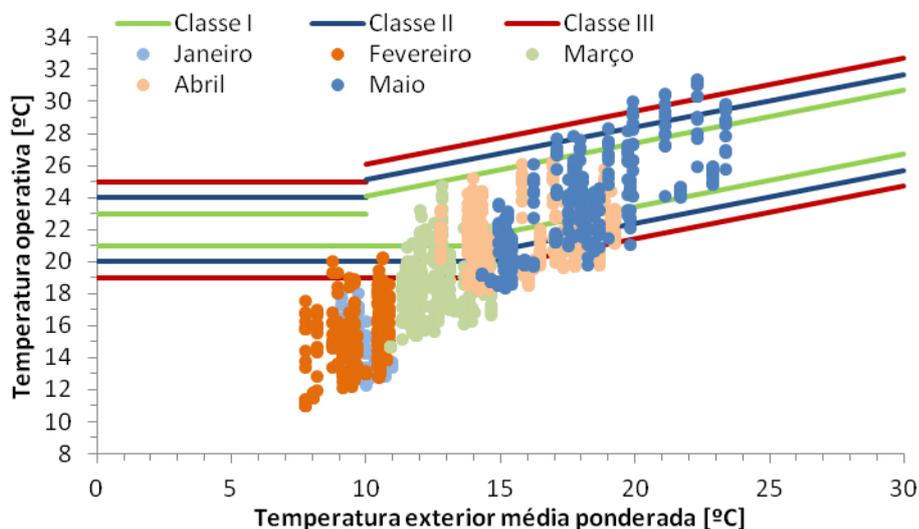


Fig.4.51 – Avaliação do conforto térmico adaptativo na cozinha usando o modelo da ISO 15251

Como já foi referido anteriormente, a cozinha é a zona onde são registadas temperaturas mais elevadas, sendo visível na Figura 4.51. Esta zona embora seja apenas ocupada pelos funcionários é o local onde se verificam valores de conforto térmico mais satisfatórios durante todo o período de medição. Contudo, tal como nas restantes zonas, na cozinha também se verifica o aumento do conforto com o aumento da temperatura exterior, sendo registados valores insatisfatórios durante o mês de janeiro e

fevereiro. Em março são visíveis melhorias em comparação com as restantes zonas. Apenas em maio o aumento da temperatura exterior proporciona o aparecimento de registos acima do limite superior das classes de exigência.

Em geral o conforto térmico do edifício está fortemente condicionado pela variação da temperatura exterior, sendo visível a sua variação ao longo do período de medição. De acordo com os modelos anteriores, os meses de janeiro e fevereiro e grande parte de março são desconfortáveis para os utilizadores, visto que o edifício não é capaz de garantir um ambiente interior agradável de forma passiva quando as condições exteriores são desfavoráveis. Durante estes três meses na cantina 78% das temperaturas registadas são inferiores a 18°C, nas restantes zonas a situação é semelhante com uma percentagem de 74% no bar, 75% na cozinha e 84% no grill. Apenas em alguns períodos do mês de março e durante os meses de abril e maio o edifício apresenta valores aceitáveis, sendo nestes meses a temperatura exterior agradável, no entanto, alguns registos do mês de maio alertam para a possibilidade de sobreaquecimento quando as temperaturas exteriores atingem valores elevados. Assim, qualquer que seja a zona do edifício, o conforto térmico apenas é obtido quando os valores da temperatura exterior são favoráveis.

Os valores de humidade relativa registados no edifício, principalmente na cantina, encontram-se dentro dos limites aceitáveis, pelo que não é o parâmetro responsável pela existência de períodos de desconforto.

Os períodos de desconforto são diretamente relacionados com a temperatura exterior, nomeadamente com as baixas temperaturas registadas no período monitorizado.

# 5

## SIMULAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

### 5.1. MODELAÇÃO

De modo a facilitar o processo de introdução dos dados necessários para a simulação foi usado o programa DesignBuilder, tal como descrito em §2.2.1, sendo a simulação feita pelo EnergyPlus.

Na modelação do edifício houve a preocupação de reproduzir o melhor possível o edifício real, atribuindo mais relevo aos fatores que influenciam as simulações, em vez de outros que não apresentam significado para a realização do presente trabalho, tais como: aspetos estéticos e estruturais. Para modelar o edifício recorreu-se a informação proveniente das seguintes fontes: projeto do edifício; normas e medições in-situ.

#### 5.1.1. GEOMETRIA

Com base nos dados descritos em §3.1.2, nomeadamente, plantas e alçados foi possível modelar a parte geométrica do edifício. Para tal foi usada a função do DesignBuilder que permite importar plantas em formato DXF. Inicialmente importou-se a planta do piso 0 sobre a qual foi desenhado um bloco que representa o piso inferior respeitando as cotas dos alçados e cortes. De seguida repetiu-se o processo introduzindo-se a planta do piso 1 sobre o bloco criado e voltando a desenhar um novo bloco que corresponde ao piso em que se encontram as zonas analisadas. Estando ambos os pisos inseridos é necessário colocar os restantes elementos geométricos tais como: aberturas (vidros e portas) e elementos de sombreamento. As Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 correspondem às vistas dos alçados e ao modelo em 3D.

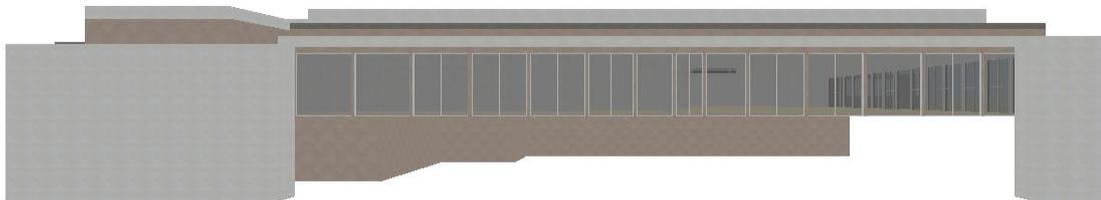


Fig.5.1 – Alçado noroeste

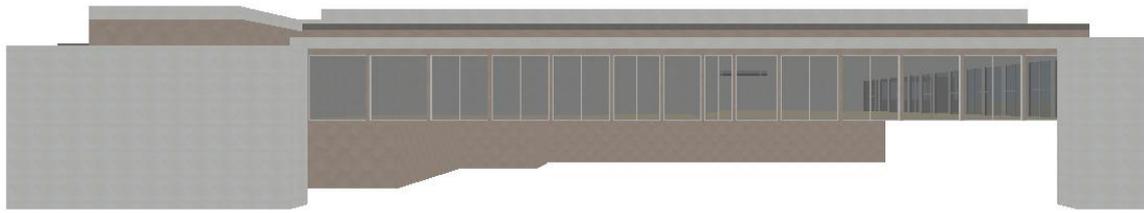


Fig.5.2 – Alçado nordeste



Fig.5.3 – Alçado sueste

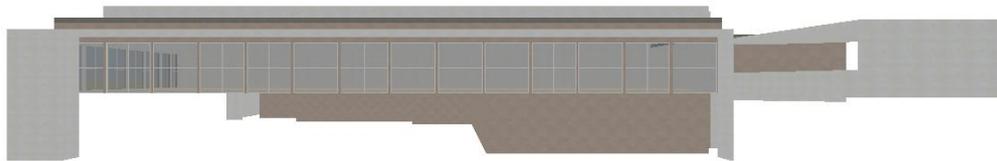


Fig.5.4 – Alçado sudoeste

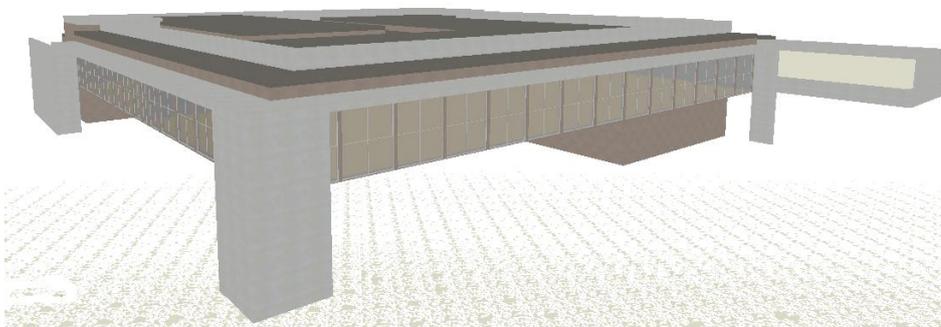


Fig.5.5 – Modelo 3D do edifício em estudo

No caso do piso 0 o programa assume automaticamente que o pavimento se encontra em contacto com o solo. Para os restantes elementos que estejam em contacto com o solo mas que se encontrem a uma cota diferente é necessário adicionar um bloco do tipo *ground* em contacto com estes para que sejam alteradas as condições de fronteira.

Posteriormente dividiram-se os pisos em diferentes zonas, com diferentes características. Mais uma vez apenas é apresentado o piso 1, uma vez que é neste que se encontram as zonas analisadas. A Figura 5.6 apresenta a divisão do piso 1 por zonas.

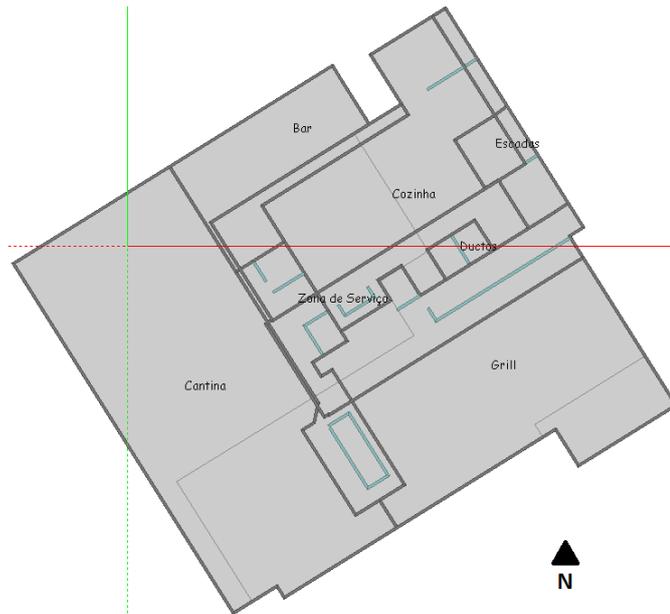


Fig.5.6 – Divisão do piso 1 por zonas

A modelação do edifício não é totalmente fiel à geometria real, uma vez que existem alguns pormenores geométricos que foram simplificados de modo a não comprometer os resultados da simulação. Sendo que para a simulação o dado geométrico mais relevante é o volume útil, tentou aproximar-se ao máximo do volume útil real sendo necessário sacrificar alguns pormenores estéticos sem relevância para a simulação.

#### 5.1.2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

O DesignBuilder possui na sua base de dados vários tipos de elementos construtivos bem como as suas respetivas propriedades. No entanto alguns dos elementos construtivos do edifício em estudo não fazem parte dessa base de dados. Contudo, é possível criar novos elementos com os materiais e a espessura desejada. O Quadro 5.1 contém os elementos construtivos usados na modelação do edifício bem como as suas propriedades.

Os elementos construtivos presentes no Quadro 5.1 apenas dizem respeito à zona opaca, pois são caracterizados pelas mesmas propriedades. Os vãos envidraçados apresentarem características diferentes, sendo definidos pelos seguintes parâmetros, retirados da base de dados do DesignBuilder:

- Fator solar de 0,80;
- Transmissão luminosa de 0,88;
- Caixilharia de alumínio;
- $U = 5,4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;

Quadro 5.1 – Elementos construtivos e suas propriedades

Elemento	Material	e [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/Kg.K]	$\lambda$ [W/m.°C]	U [W/m <sup>2</sup> .°C]
Parede exterior	Acabamento exterior	0,015	1800	1000	1,00	0,567
	Isolamento térmico	0,05	140	840	0,04	
	Bloco perfurado	0,20	1700	800	0,84	
	Reboco	0,01	1900	850	0,80	
Parede interior	Reboco	0,015	1900	850	0,80	0,918
	Tijolo Vazado	0,11	1000	840	0,30	
	Reboco	0,015	1900	850	0,80	
Pavimento térreo	Isolamento térreo	0,02	10	1400	0,04	1,115
	Betão	0,10	2000	1000	1,13	
	Betonilha	0,07	1200	840	0,41	
Laje	Betão	0,30	2100	840	1,40	1,925
	Acabamento	0,006	1200	1400	0,17	
Cobertura	Tela betuminosa	0,01	1050	1000	0,17	0,547
	Isolamento térmico	0,04	35	1400	0,034	
	Barreira para-vapor	0,003	130	2300	2,3	
	Camada de forma	0,1	1200	1000	0,38	
	Betão	0,25	2100	840	1,40	

### 5.1.3. GANHOS INTERNOS

Estando introduzida a parte física do edifício, é necessário fornecer ao programa informações relativas à sua utilização. Na criação da geometria e introdução dos elementos construtivos existiam dados de projeto que permitiam efetuar a modelação com base em parâmetros objetivos. Para quantificar a utilização do edifício recorreu-se a outros métodos de modo a aproximar ao máximo os ganhos internos introduzidos no programa com os ganhos reais. A quantificação dos ganhos internos resulta da produção de calor despendida nas atividades que se realizam no interior do edifício. Os parâmetros que mais contribuem para a produção de calor são: a ocupação, os equipamentos e a iluminação.

#### 5.1.3.1. Ocupação

A produção de calor por ocupação está relacionada com metabolismo, variando em função da atividade que uma pessoa desempenha. O DesignBuilder contém na sua base de dados valores de metabolismo diferentes para cada tipo de atividade. Optou-se pela opção *eating/drinking* que corresponde a uma produção de calor de 110 W/pessoa. Assim com base na ocupação definida em §3.3, o programa automaticamente calcula os ganhos internos referentes a este parâmetro. A ocupação

é introduzida no programa sob a forma de densidade, ou seja, o número de pessoas por metro quadrado. O Quadro 5.2 contém os valores de ocupação das zonas em análise.

Quadro 5.2 – Ocupação das diferentes zonas

Zona	Densidade [nº.pessoas/m <sup>2</sup> ]	Área [m <sup>2</sup> ]	Número de pessoas	Ganhos [W]
Cantina	0,25	456	114	12540
Bar	0,20	112	23	2530
Grill	0,20	357	72	7920
Cozinha	0,10	233	24	2640

No entanto a ocupação do edifício não é constante durante o período em que este se encontra em funcionamento. Foi necessário definir um perfil com variação da taxa de ocupação, sendo o perfil usado apresentado na Figura 5.7.

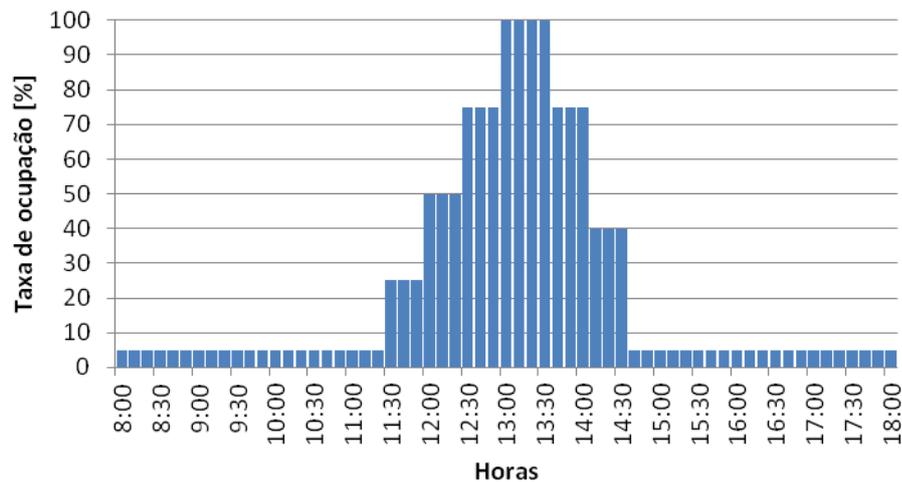


Fig.5.7 – Perfil de ocupação do edifício

Como se pode visualizar na Figura 5.7, a taxa de ocupação varia consideravelmente ao longo do dia, sendo que a ocupação começa a crescer a partir da hora de abertura ao público e atinge o valor máximo entre as 13:00 e as 13:40, período em que há maior afluência, sendo que neste período existem muitas pessoas na fila de espera para serem atendidos. Antes e depois do período de abertura ao público o número de ocupantes baixa, ficando apenas os funcionários no interior do edifício, correspondendo a uma ocupação constante. Este perfil tenta traduzir o cenário real, no entanto, não é possível traçar com exatidão a variação da ocupação, dado que não existem dois dias com a mesma variação. Nos restantes períodos do dia que não são representados na Figura a ocupação é zero, bem como aos fins de semana, férias e feriados.

A Figura 5.7 abrange as zonas que são alvo de análise exceto a cozinha. Como foi referido anteriormente esta zona apenas é ocupada pelos funcionários, sendo a sua ocupação aproximadamente constante durante o funcionamento do edifício.

### 5.1.3.2. Equipamentos

Os equipamentos transformam parte da sua energia consumida em calor. Num edifício de restauração os principais equipamentos encontram-se na zona da cozinha, sendo utilizados na confeção das refeições. Visto que se trata de um edifício que serve um número considerável de estudantes é esperado que haja um grande ganho de calor resultante do funcionamento dos seus equipamentos.

No entanto, estes ganhos de calor apenas afetam a cozinha, uma vez que é lá que os equipamentos estão instalados. Não haveria interesse em que se estendessem às restantes zonas do edifício, dado que iriam provocar um sobreaquecimento do local, o que seria indesejável do ponto de vista do conforto térmico. A propagação destes ganhos estaria também ligada a uma propagação de odores. É necessário uma adequada renovação de ar devidamente calculada nesta zona, para manter um ambiente saudável na zona da cozinha e impedir a transmissão para as restantes zonas.

Para a modelação é necessário adotar um valor que traduza o funcionamento dos equipamentos em ganhos de calor. Sendo que não existe um valor de projeto que possa ser usado, o valor foi obtido por tentativas tendo como referência os ganhos reais na zona da cozinha, mais propriamente por ajuste aos dados medidos *in-situ* pelos sensores colocados nessa zona. A Figura 5.8 mostra o campo de introdução destes dados no programa de simulação.

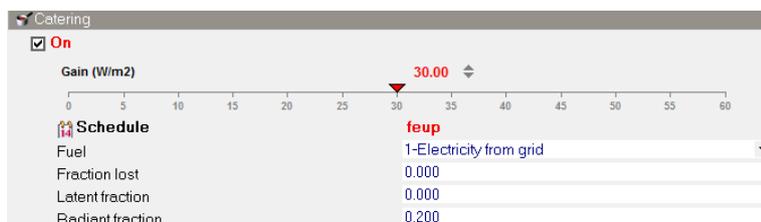


Fig.5.8 – Introdução dos ganhos de calor resultantes dos equipamentos

Como se pode observar na Figura 5.8 foi adotado um valor de  $30 \text{ W/m}^2$  para os ganhos devido aos equipamentos. Na Figura 5.8 também se pode visualizar que foi necessário definir um horário de funcionamento para os equipamentos. Dado que se tratam de equipamentos de confeção estes operam apenas nos dias em que o edifício se encontra aberto ao público. É possível estimar o período de funcionamento dos equipamentos em função da variação da temperatura na cozinha. Assim, como se pode ver na Figura 4.22 a temperatura sobe a partir das 9:00 baixando por volta das 15:00, sendo este o horário adotado para o funcionamento dos equipamentos de confeção.

### 5.1.3.3. Iluminação

A iluminação tem como principal função assegurar a visibilidade, no entanto um dos efeitos secundário é a produção de calor. Não existindo um valor de projeto para quantificar a potência de iluminação é necessário adotar um valor que caracterize este parâmetro. Na norma ASHRAE 90.1 encontram-se vários valores de ganhos com a iluminação para diferentes tipos de atividade. A norma sugere um ganho de  $15 \text{ W/m}^2$  para cantina/bar/zonas de refeição e um ganho de  $13 \text{ W/m}^2$  para zonas de preparação de comida, como é o caso da zona da cozinha [17].

Embora nas restantes zonas o valor recomendado seja de  $15 \text{ W/m}^2$  foi adotado um valor inferior, dado a elevada área de envidraçados que compõe o edifício. Adotou-se um valor de  $9 \text{ W/m}^2$  para quantificar os ganhos internos por iluminação.

A introdução deste parâmetro é feita no *Lighting Template* sendo apenas introduzido o valor dos respetivos ganhos. Na Figura 5.9 está presente o campo de introdução deste parâmetro relativo ao edifício completo.

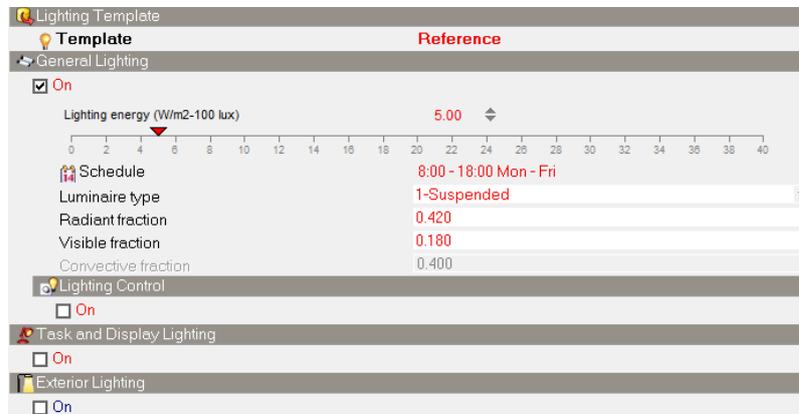


Fig.5.9 – Introdução da iluminação

Como se pode observar na Figura 5.9 é necessário introduzir um horário de funcionamento para a iluminação. Neste caso é igual ao horário de funcionamento do edifício. Assim a iluminação tem um valor constante durante o período entre as 8:00 e as 18:00. Nos períodos em que o edifício se encontra fechado não existe iluminação, tal acontece aos fins-de-semana, nos períodos de férias e nos feriados.

#### 5.1.4. VENTILAÇÃO

É necessário definir qual o tipo de ventilação bem como o número de renovações de ar por hora. A admissão natural de ar será introduzida no DesignBuilder através da opção *airtightness* que permite adicionar um horário de funcionamento. A renovação de ar varia em função da zona, sendo que cada zona tem um regime próprio de ventilação. Os valores e regimes foram adotados em função dos valores de projeto, das medições da velocidade do ar e por tentativas de modo a ajustar a temperatura na simulação à temperatura real.

Na Figura 5.10 está representado o regime de renovação de ar na cantina-

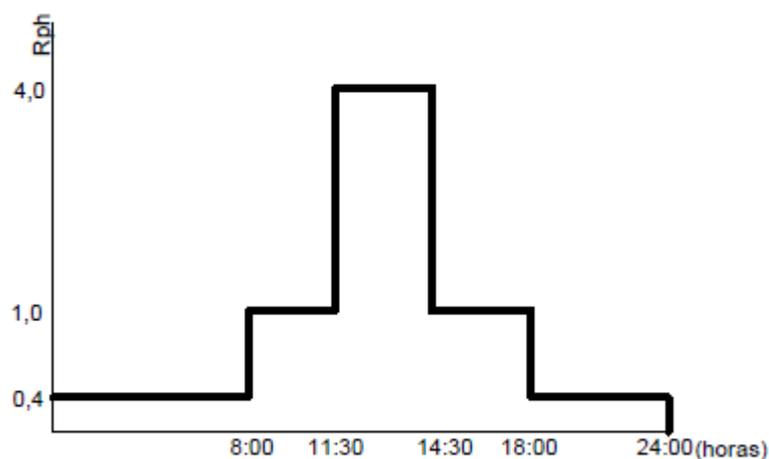


Fig.5.10 – Regime de renovação de ar na zona da cantina

Como se pode visualizar na Figura 5.10, na cantina a renovação de ar trata-se de um regime variado com um valor mínimo quando o edifício se encontra encerrado, nos fins de semana e nas férias de  $0,4 \text{ h}^{-1}$ . Quando o edifício entra em funcionamento este valor sobe devido a abertura de algumas portas, atingido o valor máximo no horário de abertura ao público devido à permanente abertura das portas exteriores. Apenas durante o período de abertura ao público é alcançado o Rph próximo do obtido nas medições, no entanto, o valor medido corresponde à infiltração do edifício todo pelo que o Rph mínimo na zona da cantina tem que ser um valor inferior.

No grill o cenário é semelhante ao da cantina, a variação das renovações é a mesma mudando apenas os valores de Rph (Figura 5.11). O valor mínimo é mais elevado, mas o valor máximo é mais baixo do que na zona da cantina. No grill o valor mínimo é próximo do Rph medido, o aumento de Rph ao longo do dia depende da abertura das portas exteriores.

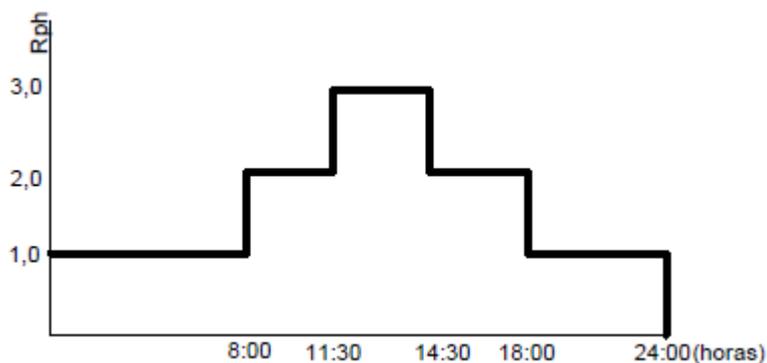


Fig.5.11 – Regime de renovação de ar na zona do grill

A zona do bar é a que apresenta menor valor de renovação do ar, uma vez que as suas grelhas de admissão natural se encontram tapadas. No entanto, no período em que o edifício se encontra aberto ao público o valor de Rph aumenta como se pode ver na Figura 5.12, devido à abertura das portas exteriores na zona da cantina. Esta zona por vezes dispõe de climatização mecânica dificultando a aproximação entre a simulação e a realidade. Adotou-se um valor de  $0,5 \text{ h}^{-1}$  para o período em que entram em funcionamento os dois *Multi Split*.



Fig.5.12 – Regime de renovação de ar na zona do bar

Na cozinha também existe um valor de renovação mínimo do ar, no entanto, nesta zona a ventilação no período de confeção de alimentos assume particular importância por aumentar o valor de Rph, sendo um aumento faseado. As fases correspondem as duas velocidades de extração e admissão forçada de ar. A Figura 5.13 contém o regime de renovação de ar nesta zona.

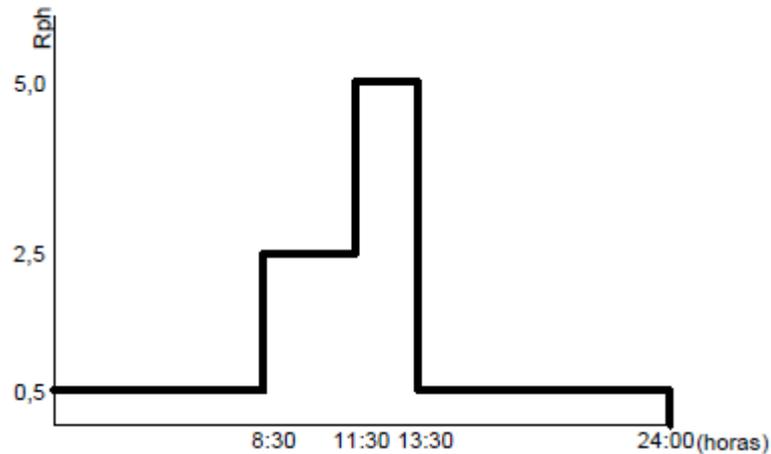


Fig.5.13 – Regime de renovação de ar na zona da cozinha

Na Figura 5.13 é visível o aumento de Rph que ocorre nesta zona quando são acionadas as duas velocidades de admissão e extração mecânica, aumentando cerca de 10 vezes entre o valor mínimo e a extração máxima.

## 5.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados da simulação são apresentados juntamente com as variações de cada zona, de modo a observar a proximidade ou afastamento entre a simulação e os valores reais medidos *in-situ*. Para validar o modelo de simulação será usado o parâmetro de comparação NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*). O RMSE (*Root Mean Square Error*) é frequentemente usado para estimar a diferença entre os valores previsto por um modelo e os valores observados, sendo calculado pela equação (5.1) [18].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (5.1.)$$

Onde:

$X_{obs,i}$  - Valores observados;

$X_{model,i}$  - Valores previstos pelo modelo;

$n$  - Numero de valores.

O NRMSE é muitas vezes preferido por ser adimensional e facilitar a análise de resultados, é calculado pela equação (5.2), variando entre 0 e 1, em que quanto mais próximo de 0 for o resultado menor é a diferença entre os valores previstos pelo modelos e os valores observados [18].

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{X_{obs}}} \quad (5.2.)$$

Onde:

$\overline{X_{obs}}$  - Média dos valores observados.

Embora no capítulo anterior tenha sido analisada a humidade relativa e a temperatura, apenas foi realizada a simulada térmica, devido aos dados disponíveis. Com já foi referido anteriormente a estação meteorológica por vezes apresentou falhas e para colmatar esses valores em falta foram usados os dados do clima exterior de 2002. No entanto, embora as curvas de simulação sejam contínuas apenas serão analisados os períodos nos quais o clima exterior é o registado pela estação da FEUP. Os períodos em que se recorreram aos dados de 2002 são:

- Entre as 3:00 do dia 7 de janeiro e as 9:30 do dia 22 de janeiro;
- Entre as 19:00 do dia 2 de fevereiro e as 1:00 do dia 6 de fevereiro;
- Dia 12 de fevereiro entre as 4:00 e as 11:00;
- Dia 29 de março entre as 18:00 e as 23:00;
- Dia 16 de abril entre as 11:00 e as 23:00;

Os dados dos intervalos de tempo presentes na lista anterior não foram considerados no cálculo do NRMSE. Embora os dados dos sensores tenham sido tratados a partir do dia 19 de janeiro a simulação térmica foi feita a partir das 10:00 do dia 22 de janeiro até às 23:00 do dia 31 de maio.

As curvas dos valores registados pelos sensores e dos valores resultantes da simulação estão representadas nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 para as zonas da cantina, bar, grill e cozinha, respetivamente.

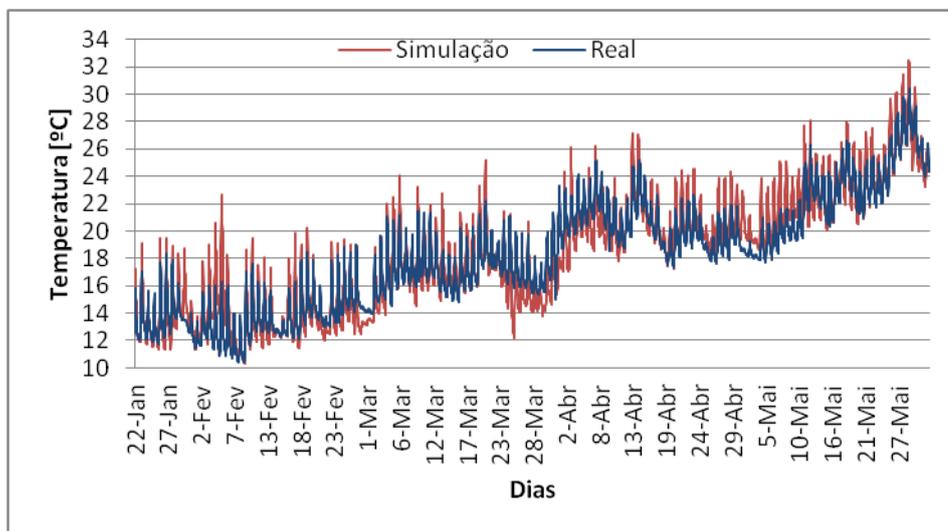


Fig.5.14 – Variação da temperatura real e simulada na cantina

É visível que a curva real e a simulada seguem a mesma variação, porém existem algumas diferenças. Por mais próximos da realidade que sejam os dados introduzidos no DesignBuilder, será sempre uma simulação, em que não é possível que as curvas coincidam. A simulação parte de uma formulação

matemática em que as variações ao longo do período analisado depende dos dados introduzidos, por outro lado, a curva real corresponde às temperaturas registadas pelos sensores, onde não existem dias com medições iguais e os dados sofrem alterações em função do que ocorrer ao longo dos dias, não dependem de nenhuma formulação matemática. A posição dos sensores também contribui para o afastamento das curvas, pois foram colocados a uma altura superior à altura humana média. Assim os valores registados podem por vezes não retratar na perfeição a ocupação real do edifício. Outro aspeto é o erro que os equipamentos podem apresentar na medição, contribuindo mesmo que minoritariamente para o aumento das diferenças entre as duas curvas.

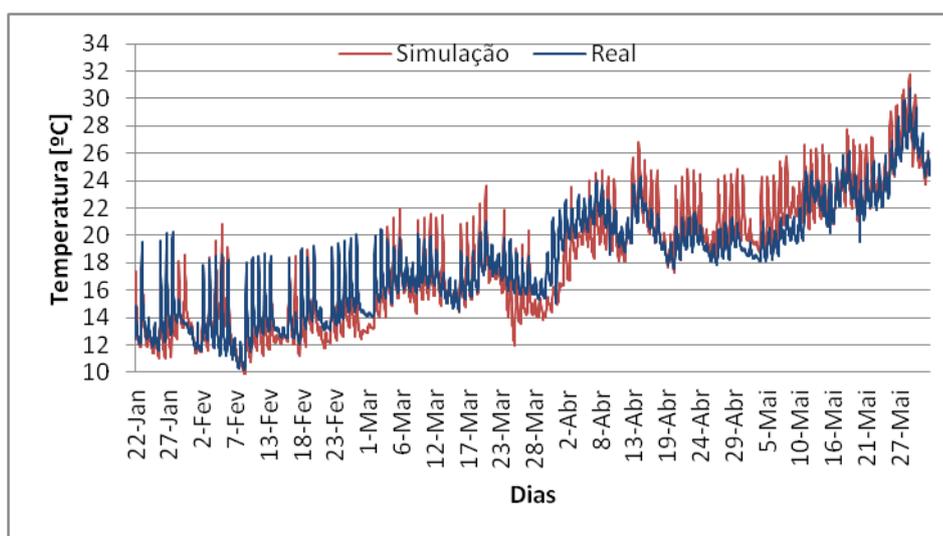


Fig.5.15 – Variação da temperatura real e simulada no bar

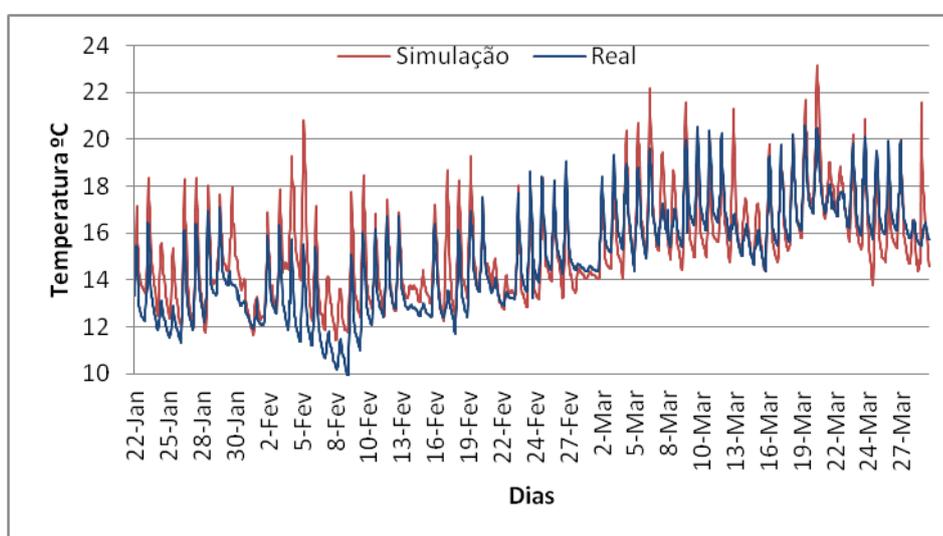


Fig.5.16 – Variação da temperatura real e simulada no grill

Em todas as zonas existem diferenças entre as curvas, sendo maior numa do que noutra. Assim na cantina (Figura 4.14) e no grill (Figura 5.16) o NMRSE é de 0,07, no bar e na cozinha é ligeiramente superior sendo 0,08 no bar (Figura 5.15) e 0,09 na cozinha (Figura 5.17). Em qualquer uma das zonas

o NRMSE obtido é um valor baixo, pelo que são aceitáveis as curvas com os valores da simulação térmica para caracterizar a temperatura no interior do edifício.

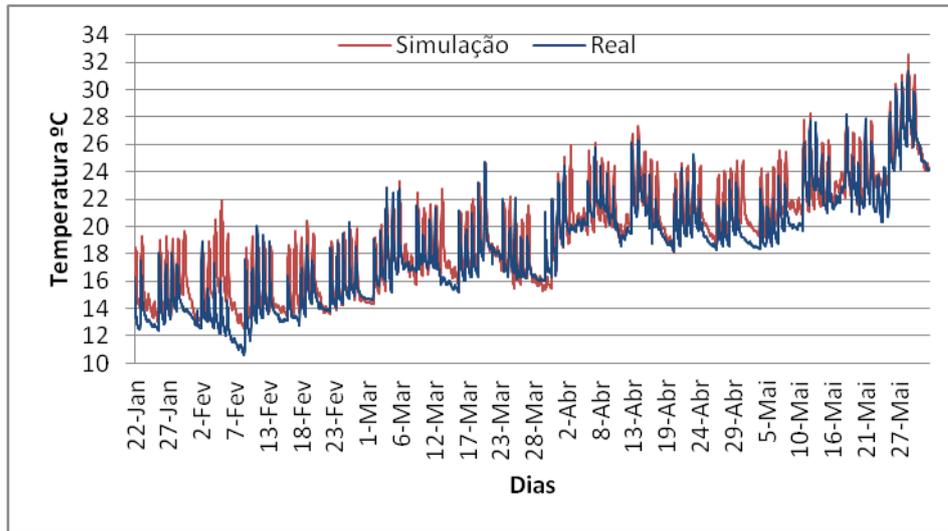


Fig.5.17 – Variação da temperatura real e simulada na cozinha

No caso da cozinha, o facto de os ganhos resultantes do funcionamento dos equipamentos não serem conhecidos com exatidão, sendo necessário recorrer a várias tentativas para ajustar a simulação à realidade, contribui para o aumento do NRMSE.

Nas restantes zonas, embora os valores obtidos *in-situ* e os lugares disponíveis permitam estimar a ocupação e a variação da taxa de ocupação, não é possível definir um perfil da variação da ocupação exato, pois este varia de dia para dia.

# 6

## ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO

### 6.1. DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO

Um dos objetivos desta dissertação passa por propor alternativas de intervenção que contribuam para o aumento do conforto higrotérmico, incidindo na melhoria da temperatura interior. De modo a analisar o conjunto de alterações provocadas pelas propostas de intervenção serão realizadas simulações térmicas anuais, uma vez que uma proposta pode ser benéfica num período e prejudicial noutro. No presente capítulo apenas será referenciada a zona da cantina, uma vez que se trata da zona mais relevante para a realização do presente trabalho.

As alternativas de intervenção correspondem a alterações efetuadas na respetiva zona, passando por modificações na renovação do ar e nos ganhos solares. A situação real da cantina corresponde à simulação base, descrita em §5.1, sendo apenas diferente o ficheiro climático usado. Para realizar as simulações anuais foi usado o ficheiro TMY do Porto de 2002 (ficheiro disponível na biblioteca do DesignBuilder), uma vez que apenas existem dados registados pela estação meteorológica da FEUP até ao dia 31 de maio.

Em cada alternativa de intervenção foram mantidos os dados da simulação base alterando apenas um determinado parâmetro. As alternativas de intervenção são:

- **Alternativa A:** adotar os caudais de ventilação de projeto;
- **Alternativa B:** reduzir o fator solar;
- **Alternativa C:** aplicar proteção solar exterior;

Na alternativa A optou-se por usar os valores de renovação do ar presentes no projeto de ventilação, ou seja, a renovação de ar em vez de ser provocada pela infiltração natural é condicionada pela extração mecânica. Como foi referido em §3.2 o sistema de extração mecânica origina um  $R_{ph}$  de  $3,2 \text{ h}^{-1}$  na cantina. O horário de funcionamento do sistema de extração é igual ao funcionamento do edifício, ou seja, de segunda-feira a sexta-feira das 8:00 até às 18:00.

A alternativa B, mantém os valores de renovação do ar da simulação base, alterando apenas os ganhos solares. Para tal foram colocadas películas nos envidraçados com o objetivo de baixar o fator solar. Recorreu-se a catálogos comerciais de películas a fim de usar uma solução real. Foi usada uma película com um fator solar de 0,34 e uma percentagem de luz visível transmitida de 21 %. No DesignBuilder alteraram-se as propriedades dos envidraçados usando os valores presentes no catálogo [19].

Tal como na alternativa B também na alternativa C foram alterados os ganhos solares mantendo a renovação de ar da simulação base, no entanto, em vez de películas foram colocados estores pelo

exterior dos envidraçados. Outra diferença entre as duas alternativas é que enquanto as películas encontram-se aplicadas durante todo o período de simulação, os estores são regulados em função da radiação solar. Assim os estores apenas protegem os envidraçados quando a potência da radiação solar é superior a  $80\text{W/m}^2$  (valor obtido após uma análise de sensibilidade, abaixo do qual não é significativa a redução dos ganhos solares). De modo a evitar que os estores sejam utilizados durante o período de aquecimento, onde há interesse em que ocorram ganhos solares, em simultâneo com esta programação foi também definido um perfil de funcionamento no qual os estores apenas são utilizados entre os meses de abril e setembro.

Durante o mês de agosto não foi considerada atividade na cantina pelo que este mês não fará parte da análise. É também previsível que no fim de julho e início de setembro a atividade possa ser inferior devido ao menor fluxo de utentes.

## 6.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A simulação de cada uma das alternativas de intervenção é representada juntamente com a simulação base para uma melhor perceção das alterações provocadas por cada uma. As simulações foram realizadas em regime livre e de forma condicionada.

### 6.2.1. SIMULAÇÃO EM REGIME LIVRE

Na simulação em regime livre não existem restrições para a variação da temperatura, variando em função dos ganhos internos e solares, das condições exteriores e da respetiva renovação de ar.

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 contêm a curva composta pelos valores da simulação base juntamente com a curva formada pelos valores das alternativas A, B e C, respetivamente.

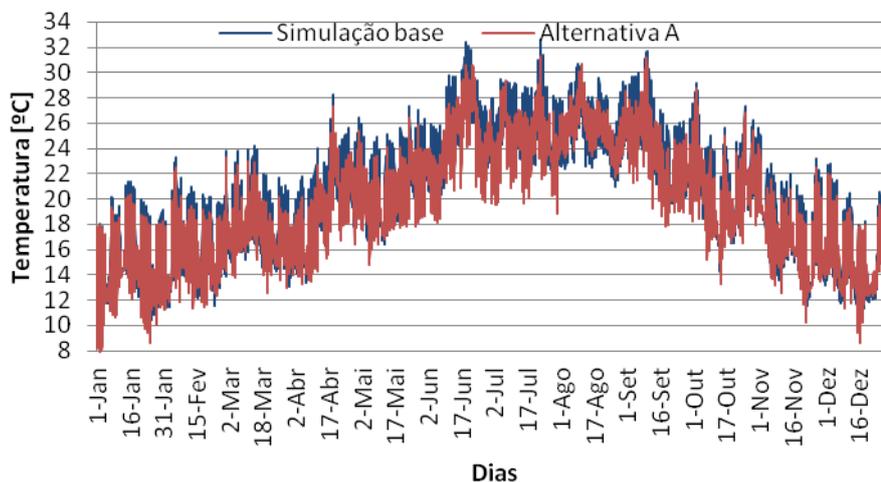


Fig.6.1 – Variação em regime livre da temperatura na simulação base e na alternativa A

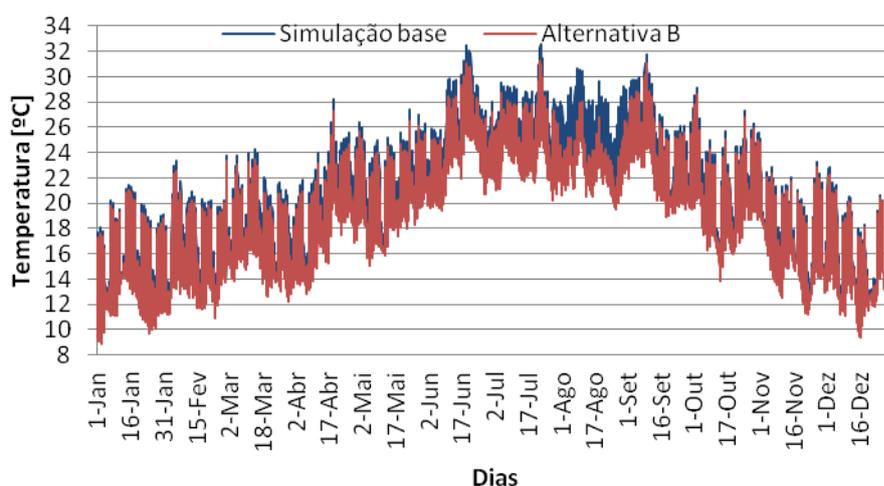


Fig.6.2 – Variação em regime livre da temperatura na simulação base e na alternativa B

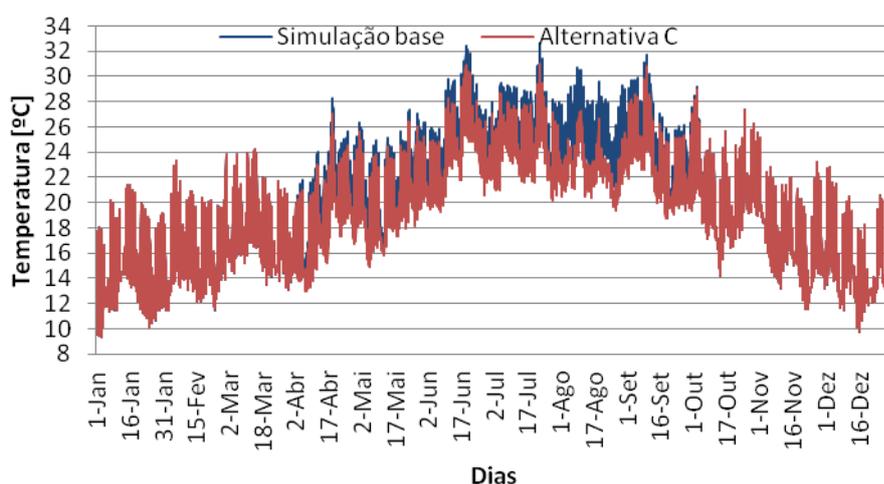


Fig.6.3 – Variação em regime livre da temperatura na simulação base e na alternativa C

A temperatura registada é menor nas simulações das alternativas do que na simulação base, existindo algumas diferenças entre as três alternativas. A Figura 6.1 referente à alternativa A mostra que a temperatura é menor durante todo o ano, sendo uma diminuição aproximadamente constante, ou seja, não existe uma diferença acentuada de mês para mês.

Por sua vez na alternativa B, representada na Figura 6.2, é visível que a temperatura, embora seja menor durante todo o ano, existem alguns meses em que essa diferença é mais acentuada, sendo superior a 1°C, nomeadamente entre os meses de junho e setembro. Durante o mês de agosto é registada a maior diminuição, no entanto, como nesse mês não existe atividade na cantina não será comparado aos restantes.

A alternativa C devido ao horário de funcionamento dos estores apenas apresenta diminuição entre os meses de abril e setembro, como se pode observar na Figura 6.3. Durante esses meses a redução é semelhante à verificada na alternativa B, onde mais uma vez o mês de agosto será posto de parte.

De modo a quantificar as diferenças entre as alternativas de intervenção recorreu-se a uma análise estatística usando o gráfico *Box Plot*. Na Figura 6.4 encontra-se o valor médio e o respetivo desvio dos valores da simulação base e das três alternativas de intervenção. Nesta análise apenas foram usados valores dentro do horário de funcionamento da cantina.

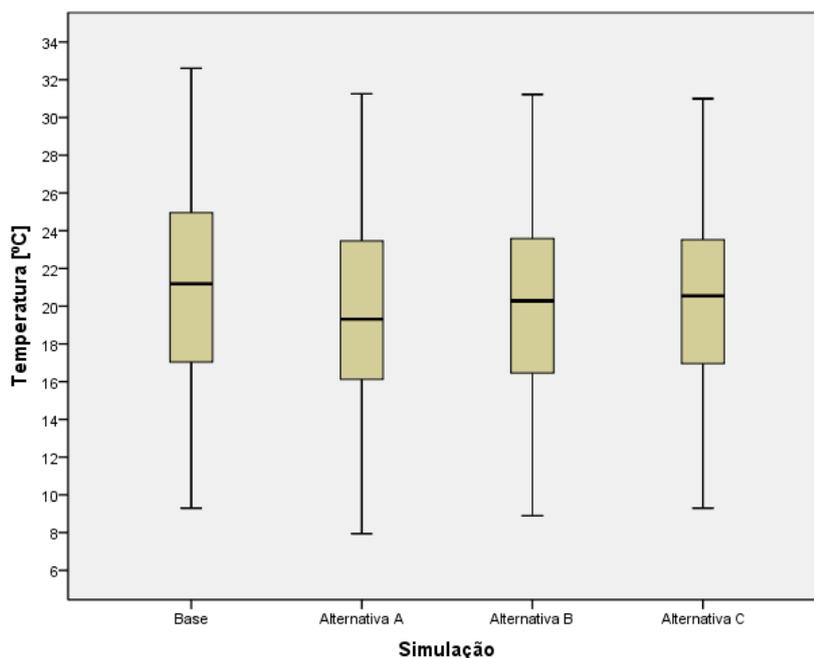


Fig.6.4 – Diferenças entre a simulação base e as três alternativas de intervenção

Tal como era esperado, é visível que a temperatura é maior na simulação base e menor na alternativa A. Contudo os valores não são muito diferentes, nomeadamente entre a alternativa B e C. Para melhor perceber a variação entre os valores de cada simulação, o Quadro 6.1 contém alguns dados estatísticos que completam a Figura 6.4.

Quadro 6.1 – Valores estatísticos da temperatura de cada simulação

Simulação	Mín.	1º Quartil	Méd.	3º Quartil	Máx.
Base	9,3	17,0	21,0	25,0	32,6
Alternativa A	7,9	16,1	19,8	23,5	31,3
Alternativa B	8,9	16,5	20,1	23,6	31,2
Alternativa C	9,3	17,0	20,3	23,5	31,0

Como se pode observar a simulação base é a que apresenta maior temperatura. Na alternativa A são registados os valores mais baixos de temperatura, no entanto, o valor máximo é maior do que nas alternativas B e C. A alternativa C apresenta valores mais satisfatórios, pois a temperatura mínima e do primeiro quartil é igual à da simulação base e a temperatura máxima é menor do que nas restantes simulações.

## 6.2.2. SIMULAÇÃO CONDICIONADA

Na simulação condicionada a variação da temperatura sofre restrições de modo a melhorar as condições no interior da cantina. O aquecimento e arrefecimento mecânico permitem condicionar a variação da temperatura, definindo valores limites para assinalar o início do funcionamento da climatização mecânica. Deste modo quando a temperatura interior for inferior a 18°C entra em funcionamento o aquecimento mecânico e quando for superior a 25°C entra em funcionamento o arrefecimento mecânico. A climatização mecânica apenas é utilizada durante o período de funcionamento do edifício, sendo possível que fora desse período haja variações de temperatura que ultrapassem os limites impostos. O arrefecimento apenas funciona entre os meses de abril e outubro e o aquecimento entre outubro e maio, sendo que nos meses de abril, maio e outubro existem períodos onde é necessário aquecer e arrefecer.

Nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 encontram-se as curvas de variação condicionada da simulação base com as alternativas A, B e C, respetivamente.

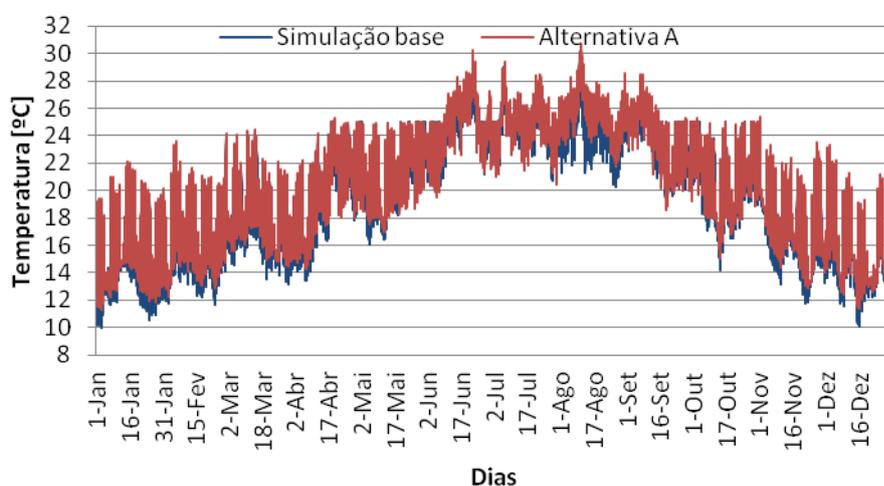


Fig.6.5 – Variação condicionada da temperatura na simulação base e na alternativa A

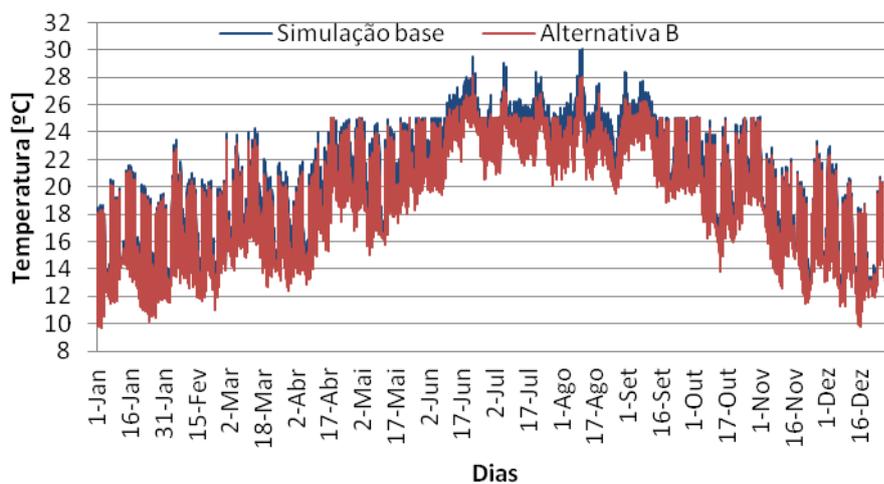


Fig.6.6 – Variação condicionada da temperatura na simulação base e na alternativa B

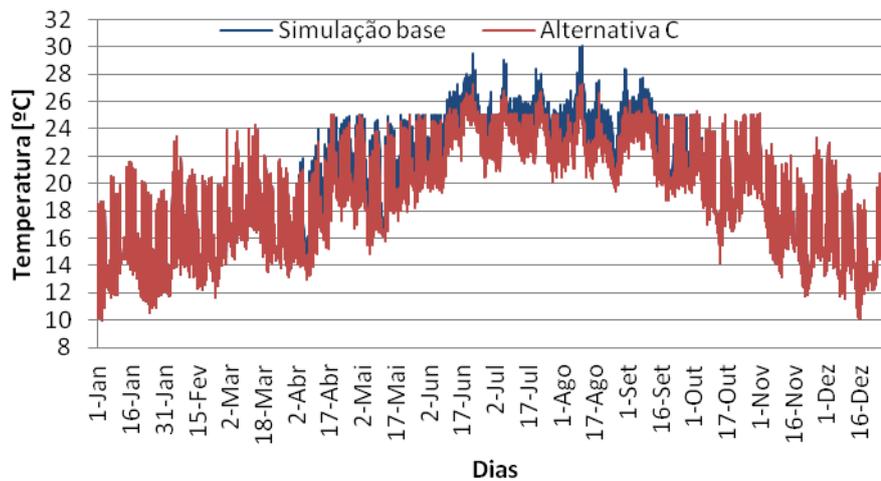


Fig.6.7 – Variação condicionada da temperatura na simulação base e na alternativa C

Na variação condicionada da temperatura na alternativa A, como se pode observar na Figura 6.5, além de existir uma diminuição dos valores acima dos 25°C em relação à variação em regime livre, ocorre também um aumento da temperatura, sendo a temperatura na alternativa A superior aos valores da simulação base durante todo o ano.

Quanto à alternativa B (Figura 6.6) e C (Figura 6.7) o aspeto das curvas mantém-se em relação ao do regime livre com a exceção da redução dos valores acima de 25°C.

É notória a existência de registos fora do intervalo de climatização da cantina, resultantes dos períodos em que o edifício se encontra encerrado. Esses registos ocorrem principalmente nos meses mais frios onde fora do horário de funcionamento são registadas temperaturas de 10°C.

Recorrendo à climatização mecânica no interior da cantina são registadas temperaturas aceitáveis tanto para a situação base como para qualquer uma das alternativas, no entanto, para manter a temperatura interior dentro desse intervalo a energia de aquecimento e arrefecimento difere em função da solução adotada. As Figuras 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 contêm os valores da energia de aquecimento e arrefecimento necessária para a simulação base e para as alternativas A, B e C, respetivamente.

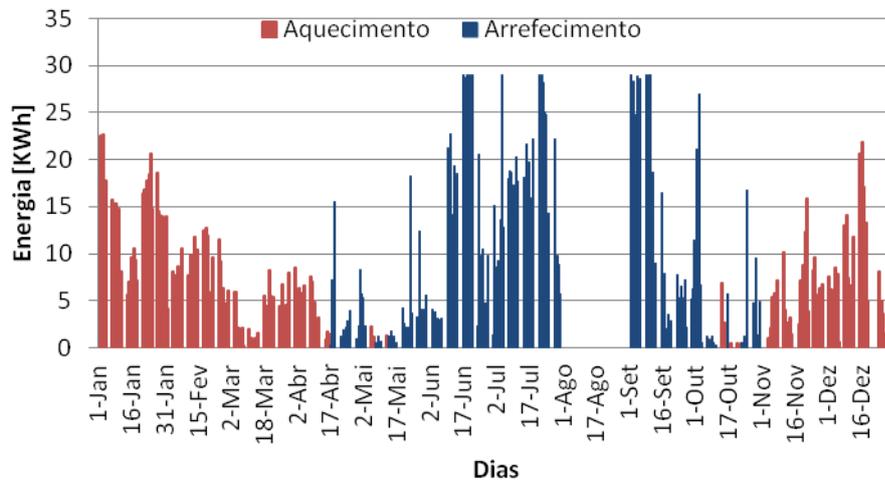


Fig.6.8 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na simulação base

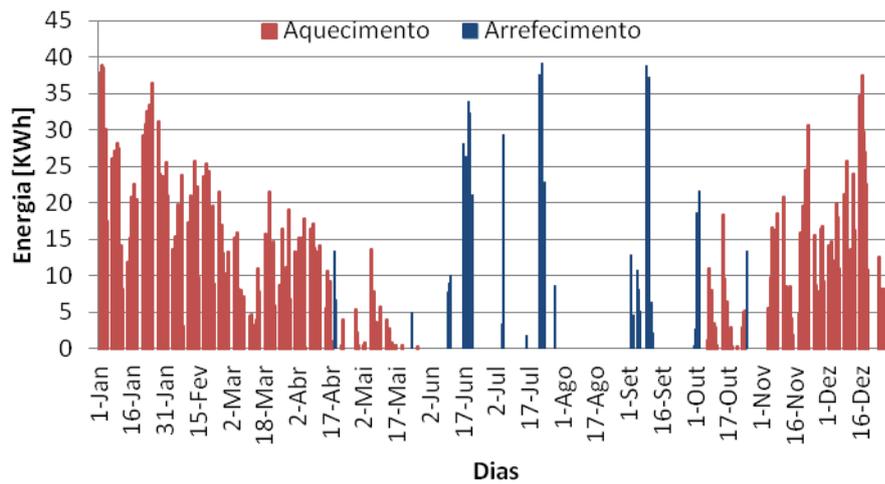


Fig.6.9 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na alternativa A

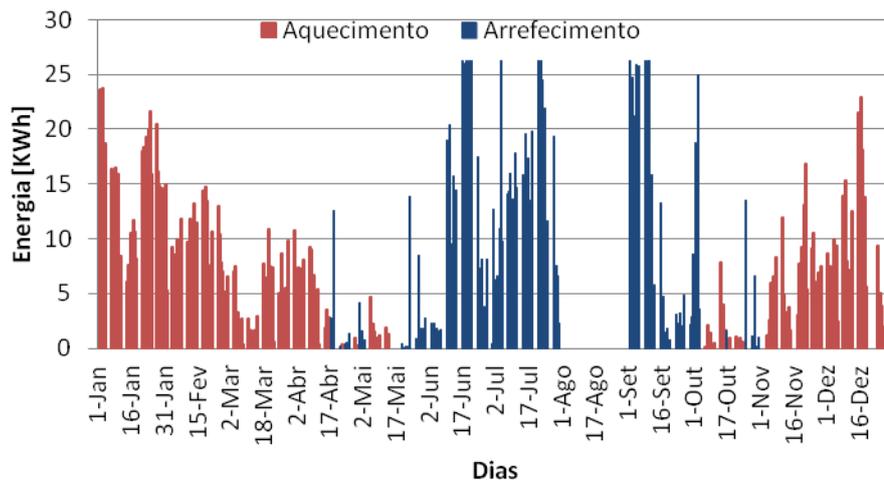


Fig.6.10 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na alternativa B

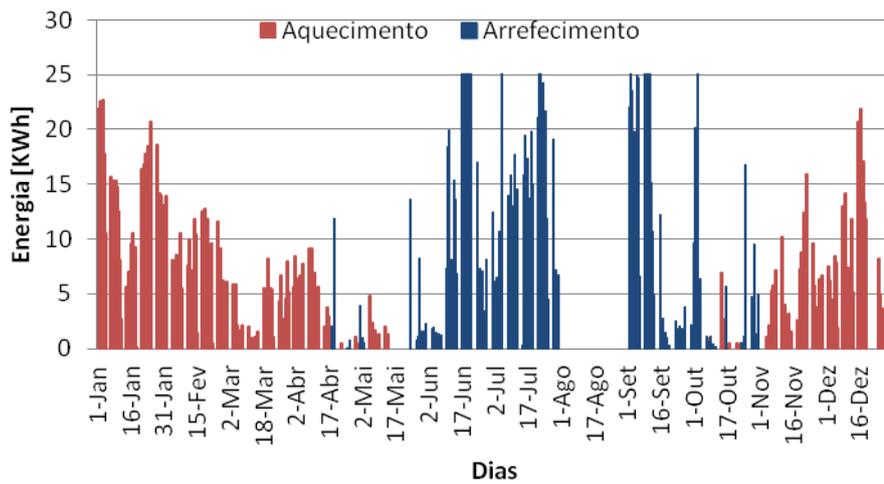


Fig.6.11 – Energia de aquecimento e arrefecimento necessária na alternativa C

No Quadro 6.2 encontra-se o valor de energia de aquecimento, arrefecimento e total para cada uma das soluções.

Quadro 6.2 – Energia de climatização necessária para cada solução

Simulação	Energia [kWh]		
	Aquecimento	Arrefecimento	Total
Base	3191	5344	8535
Alternativa A	7959	1824	9783
Alternativa B	3987	3704	7691
Alternativa C	3244	3489	6733

O Quadro 6.2 resume o consumo de energia para as diferentes soluções. A alternativa B apresenta o menor valor de energia de arrefecimento, mas é a que necessita de mais energia para aquecimento, traduzindo-se na solução com um maior consumo de energia. A simulação base é a que menos energia necessita para aquecimento, no entanto, para arrefecimento é a que usa mais energia o que faz com que seja a segunda solução com maior consumo. As alternativas B e C apresentam valores de energia para aquecimento e arrefecimento próximos, sendo a alternativa C a que menos energia necessita para manter a temperatura interior aceitável.

Partindo da alternativa C, na qual foram obtidos os melhores resultados, decidiu-se efetuar uma nova simulação alterando o tipo de vidro, sendo colocados vidros duplos em todo o edifício. A alternativa C juntamente com a colocação de vidros duplos necessita de 3765 kWh/ano para arrefecimento e 2782 kWh/ano para aquecimento o que resulta num consumo total de 6547 kWh/ano. A colocação de vidros duplos apenas se traduz numa redução de consumo de energia de 186 kWh/ano, pelo que seria necessário efetuar uma análise técnico-económica para avaliar a viabilidade desta alteração.

### 6.3. ANÁLISE CRÍTICA

Na simulação efetuada no capítulo anterior devido à extensão limitada do período de simulação apenas era possível caracterizar corretamente os períodos frios, a temperatura aumentava ao longo do tempo mas, há exceção de alguns registos no mês de maio não se verificavam situações de sobreaquecimento. Contudo, na simulação anual é possível observar que nos meses de Verão a subida da temperatura provoca sobreaquecimento no interior da cantina. No entanto, ao longo do ano são as temperaturas baixas que mais contribuem para a redução do conforto higrotérmico.

As alternativas de intervenção descritas apresentam resultados diferentes, pelo que nem todas traduzem melhorias em relação à situação real.

A alternativa A contribui para o agravamento do conforto higrotérmico, uma vez que cria condições que provocam diminuição da temperatura interior ao longo do ano. O valor de  $R_{ph}$  definido em projeto de  $3,2 \text{ h}^{-1}$  é inferior ao valor máximo de admissão natural, no entanto, apenas é inferior durante o período de abertura ao público. Durante o restante horário de funcionamento do edifício, a ventilação mecânica é superior à admissão natural o que origina uma renovação de ar mais elevada. Quanto maior for a renovação de ar maior é a diminuição da temperatura interior, sendo um aspeto positivo nos meses quentes mas negativo nos meses frios. É uma alternativa sem interesse, uma vez que os períodos mais desconfortáveis são os meses frios e esta alternativa provoca uma diminuição de cerca de  $1^\circ\text{C}$  nestes períodos.

Por sua vez, a alternativa B é mais interessante do que a alternativa A, dado que a diminuição da temperatura provocada pela redução do fator solar é maior nos períodos quentes, onde há maior incidência solar, do que nos períodos frios. No entanto, embora seja menor, cerca de  $0,5^\circ\text{C}$  em relação à situação real, a diminuição da temperatura nos períodos frios continua a ser um aspeto negativo pois agrava o conforto higrotérmico no interior da cantina.

A alternativa C apresenta melhorias em relação à situação atual, uma vez que os estores apenas funcionam nos períodos quentes provocando uma diminuição da temperatura nestes períodos aproximadamente de  $1,5^\circ\text{C}$ . Mesmo não tendo aspetos negativos em relação à situação real e contribuindo para a redução do sobreaquecimento nos períodos quentes, esta alternativa não permite melhorar as situações desfavoráveis que ocorrem nos períodos frios devido às temperaturas baixas. Sendo que para contrariar os períodos de desconforto seria necessário recorrer a sistemas de aquecimento e arrefecimento.

As simulações condicionadas são indicadores da energia necessária em cada solução para manter uma temperatura interior controlada, permitindo avaliar a adequabilidade das soluções, ou seja, uma alternativa em que seja necessário aumentar a energia consumida não é interessante. A alternativa A embora permita uma redução da energia de arrefecimento de 3520 kWh/ano, provoca um aumento da energia de aquecimento de 4768 kWh/ano, o que em termos globais traduz-se num aumento do consumo de energia de 1248 kWh/ano, ou seja, um agravamento da situação atual.

A alternativa B devido à redução de temperatura nos períodos frios provoca um aumento da energia de aquecimento de 796 kWh/ano e uma redução mais acentuada nos meses quentes em que permite reduzir a energia de arrefecimento 1640 kWh/ano, o que representa uma redução de 844 kWh/ano no consumo de energia total.

No caso da alternativa C o aumento da energia de aquecimento é quase desprezável tendo um valor de 53 kWh/ano. Na teoria este valor deveria ser zero uma vez que os estores apenas são acionados nos meses quentes, no entanto, a redução do valor da potência solar que condiciona o funcionamento dos estores iria provocar um aumento da energia necessária para arrefecimento. Esta alternativa permite ainda uma redução de energia de arrefecimento superior à alternativa B, uma vez que o fator solar com a aplicação dos estores é menor do que no caso da aplicação de películas no vidro, traduzindo-se numa redução de 1855 kWh/ano. A alternativa C permite reduzir a energia anual em 1802 kWh/ano.

A alteração de vidro simples por vidro duplo na alternativa C apenas permite uma diminuição no consumo de energia de 186 kWh/ano.

# 7

## CONCLUSÕES

### 7.1. CONCLUSÕES GERAIS

A realização do presente trabalho permitiu atingir os objetivos principais, bem como dar resposta aos objetivos parciais definidos no capítulo 1.

A aquisição de competências na modelação e simulação de modelos usando o DesignBuilder permitiu ao autor do presente trabalho desenvolver competências no manuseamento do *software*, que foram postas em prática na criação do modelo do caso de estudo.

Os dados registados pela estação meteorológica da FEUP permitiram a criação de um ficheiro de dados climáticos aplicável à simulação e validação da modelação da cantina no período estudado. O ficheiro TMY com os dados climáticos do Porto pôde ser utilizado na simulação do comportamento anual típico do edifício.

A análise dos elementos de projeto permitiu obter as seguintes conclusões:

- O projeto de ventilação indicava que no grill não existiam grelhas de admissão natural de ar, no entanto, por observação visual desta zona conclui-se que existem grelhas de admissão semelhantes às instaladas na cantina e no bar;
- As velocidades do ar previstas para as grelhas de extração mecânica não correspondem aos valores medidos *in-situ*, com a exceção da cozinha;
- No bar, a velocidade do ar que atravessa as grelhas de extração mecânica é 0,25 m/s durante o período de abertura ao público e zero nos restantes períodos do dia, sendo que em projeto foi definida uma velocidade do ar de 0,60 m/s;
- Na cantina e no grill o sistema de extração mecânica está desligado durante todo o dia, pois a velocidade do ar que atravessa as grelhas de ventilação é nula.

Para avaliar o conforto higrotérmico na cantina muito contribuiu a análise dos valores medidos pelos sensores usados para monitorizar a temperatura e humidade relativa no interior do edifício, que permitiu obter as seguintes conclusões:

- A temperatura não sofre grande variação entre as medições dos sensores instalados, com a exceção do sensor A, localizado sobre a grelha de admissão;
- No que diz respeito à humidade relativa, a variação entre as medições dos sensores é mais acentuada, sendo o sensor A o que regista um valor médio mais elevado;
- A temperatura registada pelo sensor A é cerca de 4°C menor do que a registada pelos restantes sensores e a humidade relativa média é aproximadamente 70%;

- Na cantina, o sensor B é o que regista temperaturas mais elevadas e menor humidade relativa, uma vez que se encontra próximo dos envidraçados;
- Na cozinha, o sensor colado no exaustor, local de confeção, é o que regista temperaturas mais elevadas. Por sua vez, o sensor G é o que regista maior humidade relativa com valores próximos dos medidos pelo sensor A;
- A cantina e o bar apresentam um clima interior semelhante, sendo a diferença de temperaturas entre as duas zonas inferior a 1°C;
- Por sua vez no grill a temperatura é quase 1,5°C mais elevada do que na cantina;
- A cozinha é a zona em que as diferenças são mais notórias devido a diferença de atividades, traduzindo-se num aumento de 2°C na temperatura e de 11% na humidade relativa em relação à cantina;
- O método gráfico proposto pela ASHRAE 55 permite concluir que a humidade absoluta no edifício encontra-se dentro dos limites da zona de conforto, com exceção de alguns registos na cozinha que se encontram fora dos limites;
- Tanto o modelo gráfico proposto pela ASHRAE 55 como o modelo de conforto adaptativo sugerido pela EN 15251 mostram que a cantina apresenta desconforto para os seus utilizadores durante os meses frios, nomeadamente entre janeiro e março, onde 78% das temperaturas registadas encontram-se abaixo dos 18°C;
- Durante os meses de abril e maio a cantina apresenta um conforto higrotérmico aceitável,

O valor de NRMSE igual a 0,07 obtido na comparação da temperatura na simulação com a temperatura medida *in-situ* na cantina permite validar o modelo usado na simulação térmica.

A simulação anual das alternativas de intervenção permitiu obter as seguintes conclusões:

- A simulação anual indica que nos meses quentes, nomeadamente entre junho e setembro, são registadas temperaturas superiores a 30°C provocando sobreaquecimento no interior da cantina;
- Tal como se verifica entre janeiro e março, também nos meses de novembro e dezembro a maior parte das temperaturas registadas é inferior a 18°C;
- A alternativa A, adoção dos caudais máximos de ventilação de projeto, não apresenta melhorias em relação à situação atual, provocando uma diminuição da temperatura de 1°C durante todo o ano;
- A alternativa B, redução do fator solar dos vidros, proporciona uma diminuição de temperatura mais acentuada nos meses quentes, superior a 1°C, porém nos meses frios a temperatura é cerca de 0,5°C menor do que na situação atual;
- A alternativa C, aplicação de proteção solar exterior, é a que apresenta melhores resultados, traduzindo-se numa diminuição de temperatura de cerca de 1,5°C apenas nos meses quentes, desde que o sistema seja ativado corretamente;
- As alternativas de intervenção propostas apenas apresentam melhorias na redução do sobreaquecimento. Em relação às temperaturas baixas não são apresentadas medidas dado que só a utilização de sistemas de aquecimento poderá conduzir a situações de conforto;
- A simulação condicionada permitiu quantificar a energia necessária para manter a temperatura interior dentro dos limites aceitáveis, verificando-se que na alternativa A era necessário um aumento de 1248 kWh/ano no consumo de energia em relação à situação atual;
- As alternativas B e C permitem reduzir o consumo de energia, sendo na alternativa C que a redução é mais acentuada com um valor de 1802 kWh/ano.

- A substituição dos vidros simples por vidros duplos apenas permite uma redução do consumo de energia de 186 kWh/ano.

## **7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Na sequência do presente trabalho seria interessante realizar uma análise técnico-económica, visto que além do desempenho das alternativas é necessário analisar os custos dos equipamentos e da forma de obtenção da energia, estimando os custos operacionais atuais e no futuro.

Aproveitando os sensores que foram instalados no interior do edifício seria interessante prolongar o período de medição de modo a monitorizar o clima anual no interior da cantina, podendo posteriormente ser comparado com os valores obtidos nas simulações anuais.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sulaiman ,H., Olsina, F. *Comfort reliability evaluation of building designs by stochastic hygrothermal simulation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40: 171-184, ELSEVIER.
- [2] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. *Ansi/Ashrae Standard 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE, Atlanta, USA, 2004.
- [3] Almeida, R., Freitas, V.P. *Avaliação da Qualidade do Ambiente Interior: Conforto Térmico e Qualidade do Ar Interior*. FEUP, Porto, 2009.
- [4] International Organization for Standardization. *ISO 7730 - 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, Genève, Switzerland, 2005.
- [5] Almeida, R.M.S.F. *Avaliação do Desempenho Higrotérmico do Parque Escolar Reabilitado*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2011.
- [6] Comité Européen de Normalisation. *EN 15251 - Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings-Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics*. CEN, Brussels, Belgium, 2007.
- [7] EnergyPlus™. Getting Started with EnergyPlus. *In EnergyPlus Documentation*, 1-6, 2013.
- [8] Gonçalves, D. *Validação de métodos de cálculo por comparação com medições "in situ" - condições fronteira*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010.
- [9] DesignBuilderSoftware, *DesignBuilder SBEM Training Manual*. 2014
- [10] DesignBuilderSoftware, *DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation*. 2008-2011.
- [11] EnergyPlus™. Engineering Reference. *In EnergyPlus Documentation*, 6-10, 2013.
- [12] <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/estacao.php?lang=pt>. março de 2015.
- [13] <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/galeria.php?lang=pt>. março de 2015.
- [14] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_sources.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm). março de 2015.
- [15] [http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/Misc/Dewpoint\\_Calculation\\_Humidity\\_Sensor\\_E.pdf](http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/Misc/Dewpoint_Calculation_Humidity_Sensor_E.pdf). junho de 2015.
- [16] Rodrigues, A.M., Canha da Piedade, A., Braga, A.M. *Térmica de Edifícios*, Edições Orion, Amadora, 2009.
- [17] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. *Ansi/Ashrae Standard 90.1-2007. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. ASHRAE, Atlanta, USA, 2007.
- [18] <https://www.kaggle.com/wiki/RootMeanSquaredError>. junho de 2015.
- [19] <http://sotermica.pt/arquitectura/proteccao-solar/>. junho de 2015.

