



## Otimização da climatização de uma unidade industrial

**PEDRO NUNO PINTO FERREIRA**

novembro de 2020

## **OTIMIZAÇÃO DA CLIMATIZAÇÃO DE UMA UNIDADE**

### **INDUSTRIAL**

Pedro Nuno Pinto Ferreira  
1150256

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# OTIMIZAÇÃO DA CLIMATIZAÇÃO DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL

Pedro Nuno Pinto Ferreira  
1150256

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Isabel Maria Garcia Sarmento Pereira.

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Especialista Isabel Maria Garcia Sarmiento Pereira  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Doutor José Luís Coelho Alexandre  
Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação contou com apoios e incentivos importantes, sem os quais não seria possível a realização da mesma.

Para começar, gostaria de agradecer à Monteiro Ribas e ao ISEP, por me terem dado a oportunidade desta experiência enriquecedora e de disponibilizar todas as condições necessárias à elaboração desta dissertação.

Um sincero agradecimento ao meu supervisor da Monteiro Ribas, Engenheiro Carlos Bento, pela sua preciosa orientação, disponibilidade e ajuda prestada na realização deste estudo.

Também gostaria de deixar uma palavra de apreço e agradecimento, à minha orientadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Engenheira Isabel Sarmiento, pelo seu apoio, orientação e pelo conhecimento transmitido.

Por último, quero agradecer aos meus pais, por todo o apoio que me deram ao longo da minha vida académica e pela aposta que fizeram na minha educação.



## **PALAVRAS CHAVE**

Unidades de Tratamento de Ar, DesignBuilder, Máquinas de Impressão, Pavilhão, Insuflação, Défice de ar, Subpressão, Ganhos Internos, Potência de Arrefecimento

## **RESUMO**

Decorrente de estudos realizados por diferentes entidades externas, foi identificada a necessidade de ter uma maior quantidade de ar tratado nos pavilhões fabris 2, 3 e 4 da Monteiro Ribas – Embalagens Flexíveis, de forma a minimizar desequilíbrios, potenciando a eficácia da extração de poluentes e, a admissão de tratado contribui para a melhoria das condições de conforto ao aumentar a capacidade de remoção da carga térmica resultante dos ganhos internos das diversas máquinas e equipamentos.

Primeiramente, através da análise do balanço de caudais de insuflação de ar pelas UTAN's e de extração de ar pelas máquinas de impressão, verificou-se a existência de um défice de ar no P3, de 14 573 m<sup>3</sup>/h, excedente de ar de 6 547 m<sup>3</sup>/h e 13 736 m<sup>3</sup>/h no P2 e P4, respetivamente.

Como o objetivo de reduzir os desequilíbrios observados e simultaneamente criar no P2 e no P3 uma ligeira subpressão que limite a migração do ar contaminado dessas naves fabris para as restantes divisões do edifício é proposto a instalação de uma UTA B adicional no P3, substituição da UTAN 1 por uma UTA A no P2 e na instalação de uma UTA C e remoção das UTAN 6 e 8 no P4, tendo estas novas unidades propostas como característica crucial para alcançar o objetivo estabelecido, a capacidade de recirculação de ar.

Contudo, embora a análise efetuada seja fundamental para obter informação sobre os níveis adequados de ventilação, considerou-se que esta seria bastante simplista ao contabilizar apenas as necessidades de ar das máquinas, ignorando outros parâmetros imprescindíveis para a criação de condições de conforto térmico minimamente aceitáveis, motivando a necessidade de recorrer a um software de simulação dinâmica para obter uma análise mais abrangente, sendo detalhados os diferentes níveis de preparação e definição da simulação no software DesignBuilder.

Considerando os possíveis efeitos da variação de temperatura do ar de um espaço no desempenho dos ocupantes e estabelecendo como limite máximo admissível uma temperatura operativa 30°C, para efeitos comparativos, foram definidas para simulação as temperaturas de 18°C e 20°C para o período de aquecimento e, as temperaturas de 26°C e 28°C para o período de arrefecimento.

Constatou-se, comparando os valores obtidos para as potências de aquecimento necessárias para os três espaços, com os ganhos internos associados a estes, que devido à sua grandeza, estes facilmente compensariam as necessidades de aquecimento, ao ponto de criar nesses espaços, em períodos de intensa atividade produtiva e condições

de temperatura exterior não inferiores as 12.6°C, uma necessidade de arrefecimento, reforçando a grande importância que o arrefecimento tem ao nível da climatização destas naves fabris.

Decorrente da análise subsequente das necessidades de arrefecimento, verificou-se que no P4, para ambas as temperaturas de ar simuladas são obtidas temperaturas operativas inferiores ao limite de 30°C, observando-se um excedente de potência de arrefecimento instalada de 17.3 kW para 26°C e 52.6 kW para 28°C relativamente à potência necessária, validando a solução proposta para esta nave fabril. No sentido contrário, no P2 e P3, apenas para temperaturas de ar interior de 26°C se obtém temperaturas operativas inferiores ao limite estabelecido de 30°C. Contudo, para esta temperatura observa-se um défice da potência de arrefecimento necessária de 26.6 kW para o P2 e 4.6 kW para o P3, quando comparada a potência de arrefecimento da solução proposta e a potência necessária resultante da simulação, sendo adicionalmente necessário, proceder à instalação de baterias de arrefecimento com uma maior potência de arrefecimento nas UTA's A e B.

Por último, é analisada uma proposta alternativa de otimização do sistema de climatização, nomeadamente, a admissão direta de ar para as máquinas de impressão do P3, com o objetivo de diminuir o nível de subpressão inicialmente verificado, concluindo-se através desta análise que, em termos de resultados e em termos económicos, esta solução não apresenta os mesmos benefícios, sendo claramente mais vantajoso a instalação da UTA adicional.

**KEYWORDS**

*Air Handling Unit, DesignBuilder, Printing Machines, Pavillion, Insufflation, Air Deficit, Underpressure, Internal Gains, Cooling Power*

**ABSTRACT**

*As a result of studies carried out by external entities, the need to have a greater amount of treated air was identified in the manufacturing pavilions 2, 3 and 4 of Monteiro Ribas - Embalagens Flexíveis, in order to minimize imbalances, which enhances the efficiency of pollutant extraction and, an admission of treated air improves comfort conditions by increasing the capacity to remove the thermal load due to the internal gains of the various machines and equipment.*

*Firstly, through the analysis of the flow balance of air insufflation by AHUs and of the air extraction by the printing machines, there was an air deficit in P3, of 14 573 m<sup>3</sup>/h, and an excess of 6 547 m<sup>3</sup>/h and 13 736 m<sup>3</sup>/h in P2 and P4, respectively.*

*With the objective of reducing the observed imbalances and simultaneously creating a slight underpressure in P2 and P3 that limits the migration of contaminated air from these spaces to the rest of the building, it is proposed the installation of an additional AHU B in P3, replacing AHU 1 by an AHU A in P2 and in the installation of an AHU C and removal of the AHUs 6 and 8 in P4, being the main feature of these new proposed units the capacity for air recirculation.*

*However, although the analysis carried out is fundamental to obtain information on adequate ventilation levels, it was considered that this would be quite simplistic when accounting only for the air requirements of the machines, ignoring other essential parameters for the creation of minimally acceptable conditions of thermal comfort, motivating the need to use dynamic simulation software to obtain a more comprehensive analysis, being detailed the different levels of preparation and definition of the simulation in the DesignBuilder software.*

*Considering the possible effects of the variation of air temperature in a space on the performance of the occupants, and establishing a maximum permissible limit of 30°C of operative temperature, for comparative purposes, temperatures of 18°C and 20°C for the heating period, and temperatures of 26°C and 28°C for the cooling period, were defined for the simulation.*

*It was found, comparing the values obtained for the heating powers required for the three spaces, with the internal gains associated with them, that due to their greatness, these would easily compensate for the heating needs, to the point of creating in these spaces, in periods of intense productive activity and outdoor temperature conditions not less than 12.6°C, a need for cooling, reinforcing the great importance that cooling has in terms of the air conditioning of these spaces.*

*As a result of the subsequent analysis of cooling needs, it was found that in P4, for both simulated air temperatures, operating temperatures below the 30°C limit are obtained, observing an surplus of installed cooling power of 17.3 kW for 26°C and 52.6 kW for 28°C in relation to the required power, validating the proposed solution for this space. Conversely, in P2 and P3, only for indoor air temperatures of 26°C, can operating temperatures below the established limit of 30°C be obtained. However, for this temperature there is a deficit of the necessary cooling power of 26.6 kW for P2 and 4.6 kW for P3, when comparing the cooling power of the proposed solution and the required power resulting from the simulation, being additionally necessary to proceed with the installation of cooling batteries with a greater cooling power in AHU A and B.*

*Lastly, an alternative proposal for the optimization of the HVAC system is analyzed, namely the direct intake of air for the P3 printing machines, with the objective of reducing the level of underpressure initially verified, being concluded through this analysis that in terms of results and in economic terms, this solution does not have the same benefits, and the installation of the additional AHU is clearly more advantageous.*

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

|      |   |
|------|---|
| MREF | Monteiro Ribas Embalagens Flexíveis       |
| MRI  | Monteiro Ribas Indústrias                 |
| P1   | Pavilhão 1                                |
| P2   | Pavilhão 2                                |
| P3   | Pavilhão 3                                |
| P4   | Pavilhão 4                                |
| P5   | Pavilhão 5                                |
| P6   | Pavilhão 6                                |
| P7   | Pavilhão 7                                |
| IF1  | Impressora de Flexografia 1               |
| IF2  | Impressora de Flexografia 2               |
| IF3  | Impressora de Flexografia 3               |
| IF4  | Impressora de Flexografia 4               |
| IR1  | Impressora de Rotogravura 1               |
| IR2  | Impressora de Rotogravura 2               |
| IR3  | Impressora de Rotogravura 3               |
| IR4  | Impressora de Rotogravura 4               |
| C2   | Complexadora 2                            |
| C3   | Complexadora 3                            |
| C4   | Complexadora 4                            |
| C5   | Complexadora 5                            |
| C6   | Complexadora 6                            |
| C7   | Complexadora 7                            |
| AVAC | Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado |
| VAC  | Volume de Ar Constante                    |
| VAV  | Volume de Ar Variável                     |
| VVT  | Volume e Temperatura Variável             |
| UTA  | Unidade de Tratamento de Ar               |
| UTAN | Unidade de Tratamento de Ar Novo          |
| UPAR | Unidade de Produção de Água Refrigerada   |
| COV  | Compostos Orgânicos Voláteis              |
| PTP  | Pontes Térmicas Planas                    |
| PTL  | Pontes Térmicas Lineares                  |

### Lista de Unidades

|                      |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| W                    | Watt                                 |
| kW                   | Quilowatt                            |
| kWh                  | Quilowatt hora                       |
| MW                   | Megawatt                             |
| m                    | Metro                                |
| m <sup>2</sup>       | Metro quadrado                       |
| m <sup>3</sup>       | Metro cúbico                         |
| m <sup>3</sup> /h    | Metro cúbico por hora                |
| W/m <sup>2</sup>     | Watt por metro quadrado              |
| Kg/m <sup>2</sup>    | Quilograma por metro quadrado        |
| Kg/m <sup>3</sup>    | Quilograma por metro cúbico          |
| °C                   | Grau Celsius                         |
| W/m <sup>2</sup> .°C | Watt por metro quadrado grau Celsius |
| m <sup>2</sup> .°C/W | Metro quadrado grau Celsius por watt |
| Clo                  | Índice de resistência do vestuário   |
| rph                  | Renovações de ar por hora            |
| rcph                 | Recirculações de ar por hora         |

### Lista de Símbolos

| Termo           | Designação   |
|-----------------|--|
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono   |
| T               | Temperatura do ar  |
| To              | Temperatura operativa  |
| U               | Coefficiente de transmissão térmica                          |
| R <sub>si</sub> | Resistência térmica superficial interior                     |
| R <sub>se</sub> | Resistência térmica superficial exterior                     |
| R <sub>j</sub>  | Resistência térmica do elemento j                            |
| I <sub>t</sub>  | Massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento |
| M <sub>si</sub> | Massa superficial útil                                       |
| S <sub>i</sub>  | Área útil interna  |
| A <sub>u</sub>  | Área útil do pavimento                                       |
| r <sub>i</sub>  | Fator de correção do revestimento superficial                |
| Pt <sub>r</sub> | Potência térmica a remover para determinada máquina          |
| Pe <sub>m</sub> | Potência elétrica máxima medida                              |
| Pt <sub>f</sub> | Potência térmica fornecida                                   |
| Pd <sub>c</sub> | Potência dissipada pela chaminé                              |
| Pd <sub>a</sub> | Potência dissipada por água arrefecida                       |
| F <sub>u</sub>  | Fator de utilização  |

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

| Termo | Designação                             |
|-------|--|
| VRV   | Volume de fluido frigorigéneo variável |
| SRU   | Sistema de recuperação solventes       |
| RTO   | Oxidador térmico regenerativo          |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1.1 - INSTALAÇÕES DAS EMPRESAS DO GRUPO MONTEIRO RIBAS  | 26 |
| FIGURA 1.2 - DIFERENTES ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA MREF   | 27 |
| FIGURA 1.3 - PLANTA ILUSTRATIVA DAS DIFERENTES DIVISÕES DA UNIDADE FABRIL  | 27 |
| FIGURA 2.1 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE COGERAÇÃO DE 2007 A 2019 EM GWH (COGEN, 2020)   | 38 |
| FIGURA 2.2 - EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA EM COGERAÇÃO DE 2007 A 2019 EM MW (COGEN, 2020)  | 39 |
| FIGURA 2.3 - ESQUEMA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO (SILVA & COSTA, 2017)  | 39 |
| FIGURA 2.4 - ESQUEMA GENÉRICO DE UMA UNIDADE DE TRIGERAÇÃO (PORTAL ENERGIA, S.D.)  | 40 |
| FIGURA 2.5 - EVOLUÇÃO DAS IMPORTAÇÕES DE ENERGIA PRIMÁRIA EVITADAS E DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> EVITADAS DE 2007 A 2019 (COGEN, 2020)   | 42 |
| FIGURA 2.6 - ESQUEMA TÍPICO DE UMA UNIDADE DE TRATAMENTO DE AR (JESUS & LAPA, 2016)  | 44 |
| FIGURA 2.7 - ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DE UMA UTA LINEAR (JESUS & LAPA, 2016)  | 45 |
| FIGURA 2.8 - ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DE UMA UTA DE 2 NÍVEIS (JESUS & LAPA, 2016)   | 45 |
| FIGURA 2.9 - RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DO AR DO ESPAÇO E O DESEMPENHO DOS OCUPANTES (CIBSE, 2006)  | 49 |
| FIGURA 2.10 - VALORES RECOMENDADOS DE TEMPERATURA OPERATIVA INTERIOR PARA EDIFÍCIOS NÃO CLIMATIZADOS, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA EXTERIOR (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006) | 50 |
| FIGURA 2.11 - HIERARQUIA DE DADOS NO DESIGNBUILDER   | 54 |
| FIGURA 2.12 - ESQUEMA DA JANELA DO PROGRAMA E A IDENTIFICAÇÃO DOS SEUS VÁRIOS ELEMENTOS CONSTITUINTES (DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD, 2019)   | 55 |
| FIGURA 2.13 - ILUSTRAÇÃO DA CONSTRUÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO  | 56 |
| FIGURA 2.14 - SEPARADOR ONDE SE INTRODUZEM OS DADOS RELATIVOS À ATIVIDADE DESENVOLVIDA NO ESPAÇO   | 57 |
| FIGURA 2.15 - DEFINIÇÃO DE ELEMENTO CONSTRUTIVO (ESQUERDA) E DOS MATERIAIS (DIREITA)   | 58 |
| FIGURA 2.16 - SEPARADOR ONDE SE INTRODUZEM OS DADOS RELATIVOS ÀS ABERTURAS   | 59 |
| FIGURA 2.17 - SEPARADOR ONDE SE INTRODUZEM OS DADOS RELATIVOS À ILUMINAÇÃO   | 59 |
| FIGURA 2.18 - SEPARADOR ONDE SE INTRODUZEM OS DADOS RELATIVOS À VENTILAÇÃO   | 61 |
| FIGURA 2.19 - REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO MÓDULO <i>HEATING DESIGN</i>  | 63 |
| FIGURA 2.20 - REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO MÓDULO <i>COOLING DESIGN</i>  | 64 |
| FIGURA 2.21 - REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO, COM UM INTERVALO DE TEMPO HORÁRIO, PARA A SEMANA CRÍTICA DE INVERNO   | 65 |
| FIGURA 2.22 - REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO, COM UM INTERVALO DE TEMPO MENSAL, PARA OS MESES COM TEMPERATURAS MAIS BAIXAS  | 66 |
| FIGURA 3.1 - EDIFÍCIO INDUSTRIAL DA MREF MODELADO NO SOFTWARE DESIGNBUILDER  | 70 |
| FIGURA 3.2 - VISTA DETALHADA DO P2 NO SOFTWARE DESIGNBUILDER   | 71 |
| FIGURA 3.3 - VISTA DETALHADA DO P3 NO SOFTWARE DESIGNBUILDER   | 71 |
| FIGURA 3.4 - VISTA DETALHADA DO P4 NO SOFTWARE DESIGNBUILDER   | 72 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 3.5 - MOTOR DE 4.4 MW DA UNIDADE DE TRIGERAÇÃO DA MRI   | 74  |
| FIGURA 3.6 - CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO DE CALOR INSTALADA NO SISTEMA DE TRIGERAÇÃO DA MRI                                | 75  |
| FIGURA 3.7 - TANQUE RESERVATÓRIO DE ÁGUA FRIA INSTALADO NA MRI   | 76  |
| FIGURA 3.8 - ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DO CHILLER DE 1.1 MW DA MRI   | 77  |
| FIGURA 3.9 - EXEMPLAR DE UMA UNIDADE EXTERIOR DE TRATAMENTO DE AR DA MREF  | 78  |
| FIGURA 3.10 - CONDUTAS E MANGAS TÊXTEIS DA INSTALAÇÃO  | 80  |
| FIGURA 3.11 - ESQUEMA DAS CONDIÇÕES ATUAIS DE INSUFLAÇÃO E EXTRAÇÃO DOS DIFERENTES ESPAÇOS EM ANÁLISE                  | 83  |
| FIGURA 3.12 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA UTA A  | 84  |
| FIGURA 3.13 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA UTA B  | 85  |
| FIGURA 3.14 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA UTA C  | 86  |
| FIGURA 3.15 - ESQUEMA DAS CONDIÇÕES PROPOSTAS DE INSUFLAÇÃO E EXTRAÇÃO DOS DIFERENTES ESPAÇOS EM ANÁLISE               | 87  |
| FIGURA 3.16 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DE BOLBO SECO (AZUL ESCURO) E BOLBO HÚMIDO (AZUL CLARO) AO LONGO DO ANO NO PORTO | 89  |
| FIGURA 3.17 - TAXAS TÍPICAS DE EMISSÃO DE CALOR POR PESSOAS EM DIFERENTES ESTADOS DE ATIVIDADE (CIBSE, 2006)           | 99  |
| FIGURA 3.18 - DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE TEMPERATURA OPERATIVA, SEGUNDO A NORMA EN 15251 (2006)                         | 105 |
| FIGURA 3.19 - ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DAS UTA'S A, B E C   | 123 |
| FIGURA 3.20 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA SOLUÇÃO DE CAPTAÇÃO DE AR EXTERIOR PARA A MÁQUINA DE IMPRESSÃO C6              | 125 |
| FIGURA 3.21 - DIAGRAMA PSICOMÉTRICO ASSOCIADO À SOLUÇÃO PROPOSTA   | 127 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 1.1 - ÁREA ÚTIL DOS DIFERENTES PAVILHÕES DA MREF  | 28  |
| TABELA 3.1 - DISTRIBUIÇÃO DAS MÁQUINAS DE IMPRESSÃO DE FILME E EMBALAGENS DE PLÁSTICO PELOS DIFERENTES PAVILHÕES     | 72  |
| TABELA 3.2 - AFETAÇÃO DAS UTA'S AOS DIVERSOS PAVILHÕES DA UNIDADE FABRIL   | 78  |
| TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS DAS UTAN'S  | 79  |
| TABELA 3.4 - BALANÇO DE CAUDAIS DE AR DO PAVILHÃO 2  | 81  |
| TABELA 3.5 - BALANÇO DE CAUDAIS DE AR DO PAVILHÃO 3  | 81  |
| TABELA 3.6 - BALANÇO DE CAUDAIS DE AR DO PAVILHÃO 4  | 82  |
| TABELA 3.7 - SÍNTESE DOS BALANÇOS DE CAUDAIS DE AR PARA OS ESPAÇOS ANALISADOS  | 83  |
| TABELA 3.8 - NOVO BALANÇO DE CAUDAIS DE AR DO PAVILHÃO 2   | 84  |
| TABELA 3.9 - NOVO BALANÇO DE CAUDAIS DE AR DO PAVILHÃO 3   | 85  |
| TABELA 3.10 - NOVO BALANÇO DE CAUDAIS DE AR DO PAVILHÃO 4  | 86  |
| TABELA 3.11 - SÍNTESE DOS BALANÇOS DE CAUDAIS DE AR RESULTANTES DAS ALTERAÇÕES PROPOSTAS PARA OS ESPAÇOS ANALISADOS  | 87  |
| TABELA 3.12 - DADOS CLIMÁTICOS REFERENTES À ZONA EM QUE ESTÁ INSERIDO O EDIFÍCIO EM ESTUDO                           | 88  |
| TABELA 3.13 - CONSTITUIÇÃO E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DAS PAREDES EXTERIORES                               | 91  |
| TABELA 3.14 - CONSTITUIÇÃO E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DAS PAREDES INTERIORES                               | 91  |
| TABELA 3.15 - CONSTITUIÇÃO E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DO PAVIMENTO   | 92  |
| TABELA 3.16 - CONSTITUIÇÃO E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA COBERTURA DE UMA ÁGUA                             | 93  |
| TABELA 3.17 - CONSTITUIÇÃO E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA COBERTURA DE DUAS MEIAS ÁGUAS COM CUMIEIRA        | 93  |
| TABELA 3.18 - CONSTITUIÇÃO E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA COBERTURA COM PLACAS DE POLICARBONATO TRANSLÚCIDO | 94  |
| TABELA 3.19 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA CORRIGIDOS   | 95  |
| TABELA 3.20 - CLASSES DE INÉRCIA TÉRMICA   | 95  |
| TABELA 3.21 - OS VALORES MÁXIMOS DE MSI EM FUNÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO DA ENVOLVENTE                                  | 97  |
| TABELA 3.22 - CLASSIFICAÇÃO DA INÉRCIA TÉRMICA PARA O P2, P3 E P4  | 97  |
| TABELA 3.23 - ÍNDICE DE OCUPAÇÃO POR TURNO DOS DIVERSOS ESPAÇOS DA MREF  | 98  |
| TABELA 3.24 - POTÊNCIA DE ILUMINAÇÃO PARA OS DIFERENTES PAVILHÕES  | 99  |
| TABELA 3.25 - CÁLCULO DA POTÊNCIA TÉRMICA A DISSIPAR DOS EQUIPAMENTOS DO P2  | 101 |
| TABELA 3.26 - CÁLCULO DA POTÊNCIA TÉRMICA A DISSIPAR DOS EQUIPAMENTOS DO P3  | 102 |
| TABELA 3.27 - CÁLCULO DA POTÊNCIA TÉRMICA A DISSIPAR DOS EQUIPAMENTOS DO P4  | 102 |
| TABELA 3.28 - POTÊNCIAS TÉRMICAS A DISSIPAR ESTIMADAS PARA O P6 E P7   | 103 |
| TABELA 3.29 - CONDIÇÕES INTERIORES PRETENDIDAS PARA AS ESTAÇÕES DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO                       | 105 |
| TABELA 3.30 - CAUDAIS DE AR DEFINIDOS PARA OS DIFERENTES PAVILHÕES   | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 3.31 - RESULTADOS DETALHADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PAVILHÃO 2, NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO   | 107 |
| TABELA 3.32 - RESULTADOS DETALHADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PAVILHÃO 3, NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO   | 109 |
| TABELA 3.33 - RESULTADOS DETALHADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PAVILHÃO 4, NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO   | 110 |
| TABELA 3.34 - CARGAS TÉRMICAS DE AQUECIMENTO PARA OS DIFERENTES PAVILHÕES DA MREF   | 111 |
| TABELA 3.35 - RESULTADOS DETALHADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PAVILHÃO 2 (14:00H DE 10 DE JULHO)  | 113 |
| TABELA 3.36 - RESULTADOS DETALHADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PAVILHÃO 3 (14:00H DE 10 DE JULHO)  | 114 |
| TABELA 3.37 - RESULTADOS DETALHADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PAVILHÃO 4 (14:00H DE 10 DE JULHO)  | 116 |
| TABELA 3.38 - TEMPERATURAS MÉDIAS RADIANTES E TEMPERATURAS OPERATIVAS, OBTIDAS PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS DE AR INTERIOR   | 118 |
| TABELA 3.39 - TEMPERATURAS MÉDIAS RADIANTES, TEMPERATURAS DO AR INTERIOR E POTÊNCIAS DE ARREFECIMENTO PARA A TEMPERATURA OPERATIVA DE 28°C  | 119 |
| TABELA 3.40 - NECESSIDADES ENERGÉTICAS ANUAIS DE ARREFECIMENTO, EM KWH  | 120 |
| TABELA 3.41 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS NECESSIDADES ENERGÉTICAS ANUAIS DE ARREFECIMENTO, EM KWH, PARA A TEMPERATURA OPERATIVA DE 28°C E PARA A TEMPERATURA DE AR INTERIOR DE 26°C | 120 |
| TABELA 3.42 - POTÊNCIA TOTAL DE ARREFECIMENTO PARA OS DIFERENTES PAVILHÕES DO EDIFÍCIO DA MREF  | 121 |
| TABELA 3.43 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS POTÊNCIAS DE ARREFECIMENTO DA SOLUÇÃO PROPOSTA E NECESSÁRIA PARA O P4, PARA AS TEMPERATURAS DO AR INTERIOR DE 26°C E 28°C                  | 122 |
| TABELA 3.44 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS POTÊNCIAS DE ARREFECIMENTO DA SOLUÇÃO PROPOSTA E NECESSÁRIA PARA O P2 E P3 PARA A TEMPERATURA DO AR INTERIOR DE 26°C                       | 122 |
| TABELA 3.45 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS POTÊNCIAS DE ARREFECIMENTO DA SOLUÇÃO PROPOSTA E NECESSÁRIA PARA O P2 E P3 PARA A TEMPERATURA DO AR INTERIOR DE 26°C                       | 124 |
| TABELA 3.46 - CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE DE TRATAMENTO DE AR PROPOSTA   | 125 |
| TABELA 3.47 - BALANÇO DE CAUDAIS DO P3, CONSIDERANDO A IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA  | 127 |
| TABELA 6.1- CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA P2   | 148 |
| TABELA 6.2 - CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA P3  | 149 |
| TABELA 6.3 - CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA P4  | 150 |

# ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....  | 25 |
| 1.1   | Âmbito da Dissertação .....                                       | 25 |
| 1.2   | Apresentação da Empresa e da Unidade Industrial .....             | 25 |
| 1.3   | Objetivos do Presente Estudo .....                                | 29 |
| 1.4   | Estrutura da Dissertação .....                                    | 29 |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 33 |
| 2.1   | Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC)..... | 33 |
| 2.1.1 | Caracterização dos sistemas de climatização .....                 | 34 |
| 2.1.2 | Equipamentos da Instalação de AVAC.....                           | 37 |
| 2.2   | Equipamentos Produtores de Energia Térmica .....                  | 37 |
| 2.2.1 | Cogeração / Trigeração .....                                      | 37 |
| 2.2.2 | Chillers .....  | 42 |
| 2.2.3 | Equipamentos de distribuição de energia .....                     | 43 |
| 2.3   | Conforto Térmico .....  | 46 |
| 2.3.1 | Parâmetros que influenciam o conforto térmico .....               | 46 |
| 2.3.2 | Ambiente térmico e stress térmico .....                           | 48 |
| 2.4   | Simulação Dinâmica .....  | 52 |
| 2.4.1 | DesignBuilder e EnergyPlus .....                                  | 53 |
| 2.4.2 | Resultados da simulação .....                                     | 61 |
| 3     | DESENVOLVIMENTO .....   | 69 |
| 3.1   | Caso em Estudo .....  | 69 |
| 3.1.1 | Descrição do edifício .....                                       | 69 |
| 3.1.2 | Unidade industrial da MREF .....                                  | 72 |
| 3.1.3 | Sistema de trigeração da Monteiro Ribas .....                     | 74 |
| 3.2   | Diagnóstico da Situação Atual.....                                | 77 |
| 3.2.1 | Unidades de Tratamento de Ar (UTA's) .....                        | 77 |
| 3.2.2 | Balanço dos caudais de ar .....                                   | 80 |
| 3.3   | Desenvolvimento da Simulação Dinâmica .....                       | 88 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.3.1 | Caracterização térmica do edifício .....   | 88  |
| 3.3.2 | Caracterização dos ganhos internos.....  | 97  |
| 3.3.3 | Caracterização do funcionamento do sistema AVAC .....                                | 104 |
| 3.4   | Apresentação e Discussão dos Resultados .....  | 107 |
| 3.4.1 | Potência de aquecimento.....   | 107 |
| 3.4.2 | Potência de arrefecimento.....   | 112 |
| 3.5   | Admissão Direta de Ar para as Máquinas de Impressão .....                            | 124 |
| 4     | CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....                                    | 131 |
| 4.1   | Conclusões .....   | 131 |
| 4.2   | Propostas de Trabalhos Futuros .....   | 134 |
| 5     | BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....                                      | 137 |
| 6     | ANEXOS.....  | 141 |
| 6.1   | Planta do Sistema de Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN)                        |     |
| 6.2   | Esquema da Instalação do Sistema de Triggers da MRI                                  |     |
| 6.3   | Datasheets dos Modelos das Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN)                  |     |
| 6.4   | Cálculo da Inércia Térmica   |     |
| 6.5   | Resultados da Simulação para a Estação de Aquecimento                                |     |
| 6.6   | Resultados da Simulação para a Estação de Arrefecimento                              |     |
| 6.7   | Necessidades Energéticas Anuais de Arrefecimento Simuladas para o P2, P3 e P4        |     |
| 6.8   | Datasheets dos Modelos das Unidades de Tratamento de Ar (UTA) da Proposta de Solução |     |

# INTRODUÇÃO

- 1.1 Âmbito da Dissertação
- 1.2 Apresentação da Empresa e da Unidade Industrial
- 1.3 Objetivos do Presente Estudo
- 1.4 Estrutura da Dissertação



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Âmbito da Dissertação

No âmbito da unidade curricular de Dissertação/Projeto/Estágio, lecionada no segundo ano do Mestrado de Engenharia Mecânica - Energia do Instituto Superior de Engenharia do Porto, com vista à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica foi realizado um estudo sobre a otimização da climatização da unidade industrial da Monteiro Ribas-Embalagens Flexíveis.

Decorrente de estudos realizados por diferentes entidades externas, nos quais foram analisadas as condições interiores de ar na unidade fabril, foi identificada a necessidade de ter uma maior quantidade de ar tratado, de forma a minimizar desequilíbrios, potenciando a eficácia da extração de poluentes e, a admissão de ar tratado contribui para a melhoria das condições de conforto ao aumentar a capacidade de remoção da carga térmica resultante dos ganhos internos das diversas máquinas e equipamentos.

## 1.2 Apresentação da Empresa e da Unidade Industrial

A Monteiro Ribas constitui um grupo empresarial sediado no Porto, que opera em diversos sectores, especificamente embalagens flexíveis, borracha, couros artificiais e produção de energia, sendo a sua atividade fortemente direcionada para o mercado de exportação.

O grupo foi fundado em 1937, tendo como principal objetivo a produção de curtumes, sendo líder deste sector de mercado desde os seus primórdios.

No início da década de 60, iniciou-se uma política de diversificação, começando-se a fabricar artigos de borracha para as indústrias de calçado, automóvel e ferroviária, e produção de couros artificiais destinados à indústria têxtil. Na mesma década, foi criado um sector com o objetivo de produzir embalagens flexíveis, para a indústria alimentar.

Em 1992, ocorre a instalação da primeira central de cogeração a fuelóleo, com o objetivo de se obterem poupanças significativas no custo da energia para a empresa. Em 2011, essa central é substituída por uma central de cogeração alimentada a gás natural, sendo adicionalmente instalada, em 2018, uma segunda central de cogeração para autoconsumo, reduzido ainda mais os custos da energia.

Atualmente, a Monteiro Ribas está dividida em três empresas cuja gestão operacional se desenvolve independentemente:

- Monteiro Ribas-Embalagens Flexíveis;

- Monteiro Ribas-Revestimentos SA;
- Monteiro Ribas-Indústrias SA.

Na figura 1.1 é possível visualizar as instalações destas empresas.



Figura 1.1 - Instalações das empresas do grupo Monteiro Ribas

A Monteiro, Ribas seguindo uma necessidade de crescimento e expansão, começou a comercializar para mercados externos, sobretudo países europeus, atingindo atualmente valores de exportação de mais de 70% do total da sua produção.

A Monteiro Ribas-Embalagens Flexíveis (MREF) dedica-se à conceção e desenvolvimento de embalagens flexíveis, tendo como principal mercado as empresas do setor alimentar. Possui atualmente cerca de 270 trabalhadores, que se dividem por 3 turnos, e tem um período de laboração de 6 dias por semana.

Este estudo incidirá sobre esta unidade produtiva, pelo que convém fazer uma introdução mais detalhada sobre o seu funcionamento.

O processo produtivo da MREF (figura 1.2), está dividido em 5 etapas:

- Receção;
- Impressão e/ou Complexagem;
- Corte;
- Saqueiras;
- Expedição.

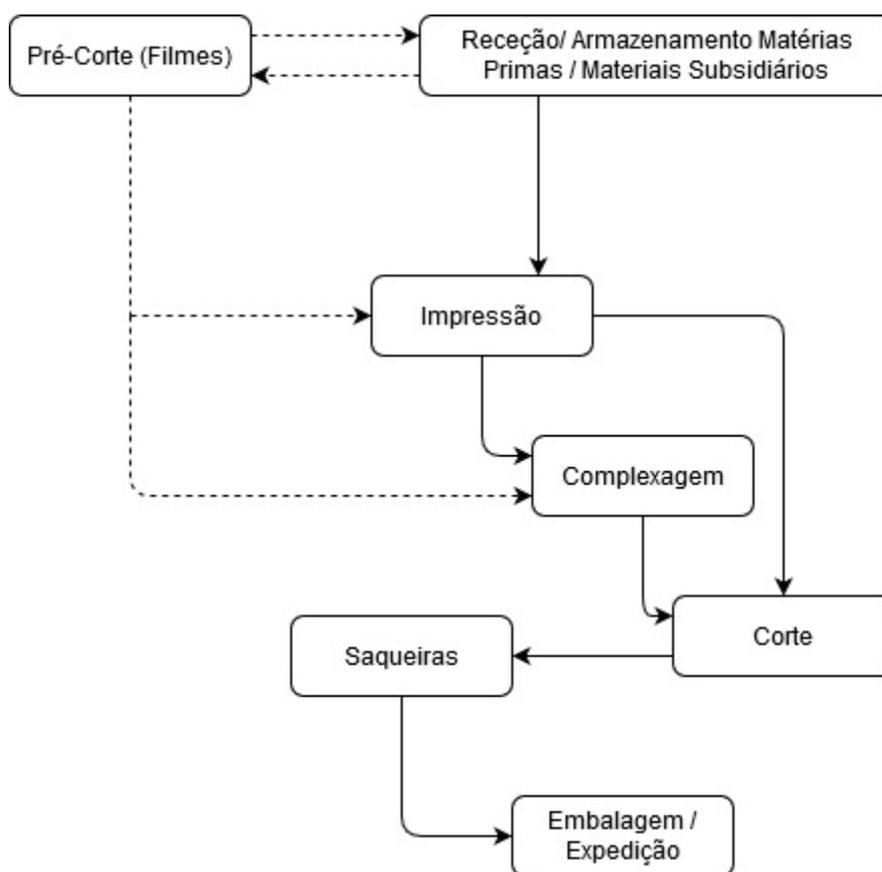


Figura 1.2 - Diferentes etapas do processo produtivo da MREF

Esta unidade divide-se em sete pavilhões, sendo uma planta ilustrativa desta divisão apresentada na figura 1.3.



Figura 1.3 - Planta ilustrativa das diferentes divisões da unidade fabril

O pavilhão 1 (P1) destina-se à armazenagem de matéria prima, nomeadamente, filmes de polietileno e de outros polímeros, tintas de impressão e solventes, estando também inserido no seu espaço um laboratório para controlo e análise da qualidade do produto.

O pavilhão 2 (P2), 3 (P3) e 4 (P4) concentram as diversas máquinas de impressão por rotogravura e flexografia e de processos de complexagem (junção de filmes).

A impressão por rotogravura é uma impressão direta no filme plástico das imagens gravadas em baixo relevo num cilindro metálico. A impressão por flexografia é uma impressão direta no filme plástico das imagens gravadas em alto relevo num cliché de material flexível, que por sua vez é colocado num cilindro metálico.

O pavilhão 5 (P5) funciona como área destinada à expedição do produto final, não sendo climatizada, pelo que não será relevante para este estudo.

No pavilhão 6 (P6) estão inseridas as saqueiras, as quais permitem conferir aos filmes anteriormente produzidos a forma de saco.

Por último, no pavilhão 7 (P7) é efetuado o corte das margens das bobinas de filme resultantes da impressão e/ ou complexagem.

A área útil e o pé direito dos diferentes pavilhões podem ser consultados na tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Área útil dos diferentes pavilhões da MREF

| <b>Espaço</b> | <b>Área útil (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Pé direito (m)</b> |
|---------------|----------------------------------|-----------------------|
| P1            | 2 606                            | 6                     |
| P2            | 1 555                            | 6                     |
| P3            | 1 377                            | 6                     |
| P4            | 2 173                            | 6                     |
| P5            | 594                              | 6                     |
| P6            | 1 122                            | 6                     |
| P7            | 732                              | 6                     |

### 1.3 Objetivos do Presente Estudo

O presente estudo pretende analisar e dar resposta a algumas questões pertinentes para a empresa, tendo como principais objetivos:

- Diagnóstico da situação atual relativamente à necessidade de ar tratado, realizando o balanço de caudais de ar para os diferentes espaços e, analisando a possível necessidade adicional de ventilação;
- Avaliação dos ganhos térmicos internos e correspondentes necessidades de aquecimento e arrefecimento dos diferentes espaços em análise, com vista a obtenção de condições ajustadas à realidade industrial da MREF;
- Analisar o possível impacto da captação direta de ar exterior para o processo de secagem das máquinas de impressão na melhoria das condições de ventilação.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos principais, estando a organização desta elaborada da seguinte forma.

No capítulo 1 apresenta-se o enquadramento desta dissertação, na qual é feita uma breve descrição da empresa e dos diferentes espaços que serão sujeitos a análise, assim como os objetivos propostos para este estudo.

No capítulo 2, são apresentados os sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) mais utilizados, fazendo-se simultaneamente um enquadramento com os sistemas primários e secundários de climatização instalados na unidade industrial em estudo. Adicionalmente, é feita uma breve abordagem ao conceito de conforto térmico em ambientes térmicos quentes, e é realizada uma análise detalhada do software de simulação DesignBuilder, sendo descritas as principais potencialidades do programa, seguindo-se uma explicação de como é efetuada a introdução dos dados e como é feita a interpretação dos resultados obtidos.

No capítulo 3, apresentam-se os resultados obtidos neste estudo, descrevendo-se detalhadamente o desenvolvimento do trabalho que leva à obtenção desses resultados, tendo em conta as seguintes etapas: diagnóstico da situação atual, realizando o balanço de caudais de ar, desenvolvimento da simulação dinâmica e análise das necessidades de arrefecimento e aquecimento, e análise do impacto da captação direta de ar exterior para a secagem das máquinas.

No capítulo 4 são feitas as considerações finais da presente tese, sendo, complementarmente, apresentadas propostas para trabalhos futuros.

Por último, no capítulo 5 são apresentadas as referências bibliográficas e outras fontes de informação utilizadas para a realização desta tese, e no capítulo 6, podem ser consultados os diferentes anexos com informação pertinente para este estudo.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC)
- 2.2 Equipamentos Produtores de Energia Térmica
- 2.3 Conforto Térmico
- 2.4 Simulação Dinâmica



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo compreende o enquadramento científico do estudo realizado, sendo abordados os seguintes temas: sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, os equipamentos produtores de energia térmica, o conforto térmico e as diferentes funcionalidades e parâmetros de desenvolvimento da simulação dinâmica do DesignBuilder.

### 2.1 Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC)

A melhoria da qualidade de ar interior obriga ao tratamento de ar exterior, o que não pode ser conseguido recorrendo à ventilação natural. Muitos edifícios recorrem a sistemas de ventilação mecânica, associados a sistemas de climatização, que efetuam o tratamento do ar novo a introduzir no espaço, de forma a garantir a qualidade do ar interior pretendida.

Os sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), têm como principal objetivo proporcionar condições de conforto e qualidade de ambiente interior, tendo associado a si várias funções, tais como arrefecimento, aquecimento, humedificação e desumidificação, renovação de ar e filtragem. Têm igualmente a capacidade de minimizar o efeito de possíveis infiltrações de ar e manter a relação de pressão entre diferentes espaços.

Os sistemas de AVAC poderão ter um elevado peso nos custos energéticos das empresas, responsável tipicamente entre 30 e 40% do consumo elétrico dos edifícios de comércio e serviços. O nível de consumo dos sistemas AVAC depende essencialmente de 4 fatores (EDP, 2019):

- Características do edifício (por exemplo, orientação e isolamento), que influenciam como as condições ambientais afetam o ambiente interior.
- Nível das condições do ar interior necessárias, pois quanto maiores exigências maiores os consumos de energia
- Calor gerado internamente, por exemplo pelas pessoas, iluminação e equipamentos.
- Desenho, eficiência, operação e manutenção do sistema AVAC, pois afeta a energia necessária para alcançar as condições desejadas.

Não se pretende neste capítulo enumerar e descrever todos os sistemas de climatização existentes, mas sim dar uma perspetiva global dos sistemas mais importantes e utilizados em grandes edifícios industriais com elevadas necessidades em ventilação e arrefecimento, e enquadrá-los segundo as suas possíveis classificações. Os sistemas de

climatização apresentados em seguida, são os sistemas mais utilizados em Portugal, estando incluídos nestes, os sistemas de AVAC analisados na presente tese.

### 2.1.1 Caracterização dos sistemas de climatização

Os sistemas de climatização podem ser agrupados segundo as seguintes características (Roriz, 2007):

- área servida pelo sistema;
- tipo de fluido térmico utilizado;
- riscos para a segurança dos ocupantes.

#### 2.1.1.1 Classificação dos sistemas em função da área climatizada

Tendo em conta a área servida pelo sistema de climatização e o local onde é produzida a energia térmica, os sistemas podem ser divididos em dois tipos, individuais e centralizados.

O sistema individual consiste num aparelho ou conjunto de aparelhos, servindo apenas um espaço que se encontra englobado numa zona a climatizar no edifício (Roriz, 2007).

O sistema centralizado serve a totalidade ou uma grande parte do edifício e o circuito primário, zona técnica onde é produzida a energia térmica que alimenta o sistema, encontra-se num local separado e específico para o tipo de equipamentos que constituem o circuito. A energia térmica produzida no circuito primário é posteriormente distribuída pelo sistema secundário, o qual poderá ser constituído por diversas redes de tubagens, que encaminham essa energia para os equipamentos de climatização.

Esta divisão clássica em dois grupos apresenta alguns problemas. A possibilidade de diferentes conceções para o sistema de climatização é elevada e se na maioria dos casos é possível incluir a instalação num destes dois grupos, nalguns casos a decisão de incluir a instalação num grupo é subjetiva (Roriz, 2007).

Deve ser considerado um grupo adicional, o dos sistemas modulares. Estão neste caso os sistemas de Volume de Fluido Frigorígeno Variável (VRV) em que existe apenas um circuito, o do fluido frigorígeno (primário), que vai até aos locais a climatizar. Não podem ser diretamente classificados como sistemas centralizados, mas é incorreto classificá-los como sistemas unitários. Um sistema modular é um sistema que serve um conjunto de zonas num edifício e que pode ser facilmente ampliado (Roriz, 2007).

Adicionalmente, por vezes é utilizada a classificação de sistema semi-centralizado, o qual pode estar afeto apenas a uma zona específica ou a vários espaços distintos do edifício, combinando as características dos sistemas individuais e centralizados.

### 2.1.1.2 Classificação dos sistemas em função do fluido térmico

Os sistemas podem igualmente ser classificados quanto ao fluido térmico utilizado, sendo geralmente considerado três tipos de sistemas:

- “tudo-ar”;
- “tudo-água”;
- “ar-água”.

Estas designações são aplicadas geralmente aos sistemas centralizados. Para os sistemas não centralizados, pode-se definir segundo (Roriz, 2007) um grupo que engloba a maioria destes sistemas, designado “tudo-refrigerante”. Neste tipo de sistema, em vez de água ou ar, circula em todo sistema um fluido frigorigéneo, sendo conseqüentemente necessário um rigoroso cumprimento de regras de segurança e proteção ambiental, de forma a prevenir possíveis ruturas da tubagem do circuito de distribuição e possíveis conseqüências graves para a saúde das pessoas. Estão incluídos neste grupo os sistemas slipt, multi-split, VRV e aparelhos de janela.

Considerando a atividade e instalações da unidade industrial em análise e as elevadas necessidades de ventilação, este estudo irá centrar-se mais nos sistemas “tudo-ar”, pelo que os sistemas “tudo-água”, “ar-água” e “tudo refrigerante” apresentados anteriormente não serão analisados em grande detalhe na presente tese.

#### 2.1.1.2.1 Sistemas “tudo ar”

Nos sistemas “tudo-ar”, a energia térmica é levada ao local a climatizar por ar (previamente arrefecido ou aquecido numa Unidade de tratamento de Ar – UTA). (Roriz, 2007). Os sistemas “tudo ar” são utilizados em espaços diferentes que se enquadram numa zona a climatizar, e que possuem tipologias de uso e ganhos internos muito semelhantes, resultando em níveis semelhantes de carga térmica entre os diferentes espaços.

Existem duas tipologias base para estes sistemas:

- Sistemas de conduta simples, nos quais o ar a insuflar é transportado na sua totalidade para os diferentes espaços, através de uma única conduta principal;
- Sistemas de dupla conduta são constituídos por uma conduta para ar quente e outra para ar frio, e uma caixa de mistura na qual se misturam os caudais de ar das duas condutas, podendo a temperatura do ar insuflado ser controlada através da devida regulação dos caudais de ar quente e ar frio.

Os sistemas de conduta simples mais utilizados são os de Volume de Ar Constante (VAC) e os de Volume de Ar Variável (VAV).

Nos sistemas VAC o caudal de ar a insuflar é constante, sendo este previamente tratado numa UTA e posteriormente distribuído em condições constantes por condutas para os espaços a climatizar. Este tipo de sistema pode ser uma solução para a climatização de zonas com comportamentos térmicos distintos, se forem instaladas UTA’s para cada

zona com condições diferentes, permitindo o controlo da temperatura e humidade por zona climatizada.

Relativamente aos sistemas VAV, estes permitem o controlo do nível de caudal de ar insuflado, com uma temperatura de insuflação constante, sendo a variação de caudal efetuada nas unidades terminais de distribuição, possibilitando dar resposta às cargas térmicas de cada espaço. A grande vantagem deste sistema comparativamente ao VAC é a flexibilidade que apresenta, permitindo adequar os níveis de insuflação às necessidades do espaço, traduzindo-se em consumos de energia menores para períodos de menor necessidade de climatização. A incapacidade de regulação da temperatura limita bastante este tipo de sistema para situações em que a carga térmica a remover é reduzida, resultando numa deficiente insuflação.

Convém referir que, para que este sistema seja usado eficientemente, necessita que seja paralelamente instalada uma unidade de Gestão Técnica Centralizada (GTC) que controle os diferentes sensores de temperatura, humidade e pressão colocados nas condutas dos diferentes espaços, de forma ao sistema responder adequadamente a cada situação, traduzindo-se num nível de investimento inicial mais elevado.

Dentro dos sistemas VAV existem ainda os Sistemas de Volume e Temperatura Variável (VVT). Estes, à medida que a carga térmica a dissipar se reduz, permitem a variação de caudal até um limite mínimo a partir do qual a temperatura de insuflação começa a ser reduzida (Roriz, 2007).

Os sistemas VVT são uma opção bastante adequada para casos em que se pretende um grande controlo da temperatura interior do espaço. Uma vez que o nível de rigor e controlo do sistema é mais complexo, comparativamente aos sistemas VAV, a unidade GTC terá de ser igualmente mais complexa, podendo verificar-se a necessidade de um investimento inicial maior face ao dos sistemas VAV.

### 2.1.1.3 Classificação dos sistemas em função do nível de segurança

Os sistemas podem ainda ser classificados em função do nível de segurança. Esta classificação é função da forma como a tubagem em que circula o fluido frigorífero (secundário) contacta com as zonas ocupadas. É aplicada essencialmente para sistemas utilizando fluidos frigoríferos halogenados (Roriz, 2007).

Segundo a norma NP EN 387, o sistema e grau de segurança a utilizar deve considerar a classe de segurança do fluido frigorífero e o tipo de atividade desenvolvida no espaço a climatizar.

Estes sistemas podem ser divididos em (Roriz, 2007):

- Sistemas diretos abertos, normalmente designados em refrigeração por sistemas de perda total, não são utilizados em climatização;
- Sistemas diretos fechados, nos quais a tubagem do fluido frigorífero contacta com zonas onde pode ocorrer a ocupação, correspondendo a estes sistemas os sistemas “tudo refrigerante” mencionados anteriormente;

- Nos sistemas indiretos o fluido primário é um fluido frigorígeno halogenado (exceto se a unidade de produção de frio for de absorção) e o fluido secundário é o ar ou a água. Estes sistemas correspondem aos sistemas “tudo-ar”, “tudo-água” e “ar-água”.

### 2.1.2 Equipamentos da Instalação de AVAC

Genericamente, os equipamentos das instalações AVAC dividem-se nos seguintes sistemas:

- Sistema primário, constituído por todos os equipamentos geradores de energia térmica, calor ou frio, obtendo-se água ou ar a uma temperatura adequada para aquecimento ou arrefecimento;
- Sistema secundário constituído pelos equipamentos de distribuição da energia produzida no sistema primário, englobando as unidades terminais, como por exemplo os ventiloconveciores, e também as UTA's.

Os principais componentes dos sistemas primários são:

- Bomba de calor;
- Caldeira;
- Unidade de produção de água refrigerada (UPAR);
- Sistema de cogeração.

Considerando a unidade industrial em estudo na presente tese, a qual possui duas centrais de cogeração para produção de energia elétrica e calor, auxiliada paralelamente por chillers de absorção, a presente análise incidirá em maior detalhe nestes componentes.

## 2.2 Equipamentos Produtores de Energia Térmica

### 2.2.1 Cogeração / Trigeração

Com o crescente aumento das necessidades energéticas por parte dos diversos processos industriais e com a imposição de limites cada vez mais rigorosos de índices de poluição, de forma a garantir um nível de impacto ambiental menos significativo, tem havido um incentivo por parte de entidades governamentais e regulamentares, à implementação de soluções que garantam um consumo de combustíveis fósseis mais eficiente e menos poluente.

Nesse quadro surge a cogeração, uma forma de produção descentralizada de eletricidade, em alternativa às grandes centrais e às redes de distribuição tradicionais, sendo em finais de 2010 segundo a Galp Energia, responsável pela produção de cerca de 12% de todo o consumo de eletricidade no país e por 34% da produção em regime especial (Silva & Costa, 2017).

Na figura 2.1 é apresentada a evolução da produção de energia elétrica através de Cogeração de 2007 a 2019.

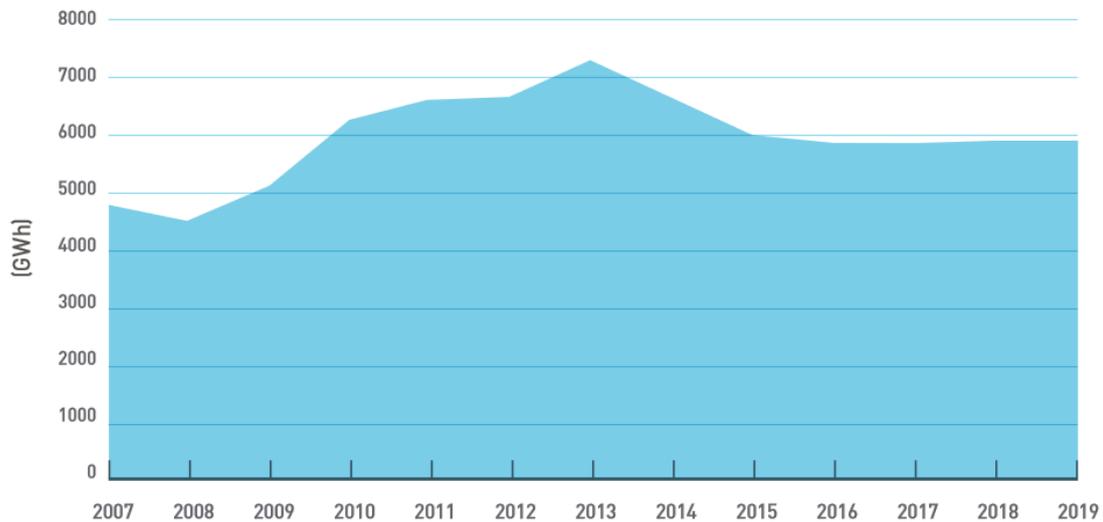


Figura 2.1 - Evolução da produção de energia elétrica através de Cogeração de 2007 a 2019 em GWh (COGEN, 2020)

A cogeração através do consumo de uma fonte de energia primária, os combustíveis fósseis, mais concretamente o gás natural no caso em estudo, a geração de dois tipos de energia, nomeadamente, energia elétrica e térmica (vapor, água quente).

Esta surge como uma tecnologia interessante ao garantir economias de energia e competitividade acrescida às empresas evitando ou atenuando a utilização de equipamentos próprios de produção de calor e aquisição de energia elétrica à rede (Silva & Costa, 2017).

As centrais convencionais convertem em eletricidade apenas cerca de um terço da energia do combustível que consomem, o resto é perdido na forma de calor. Tal desperdício acarreta efeitos adversos para o meio ambiente tornando-se imperativa a necessidade do aumento de eficiência no processo de produção. A cogeração apresenta um rácio onde 4/5 da energia primária é convertida em energia utilizável apresentando vantagens na área financeira e ambiental (Silva & Costa, 2017).

Esta melhor eficiência resulta, apenas, do facto de se associar ao projeto de cogeração um consumidor que possa utilizar a energia térmica proveniente da combustão que não é transformada em eletricidade (COGEN, 2011).

Na figura 2.2 é apresentada a evolução da potência instalada em cogeração de 2007 a 2019

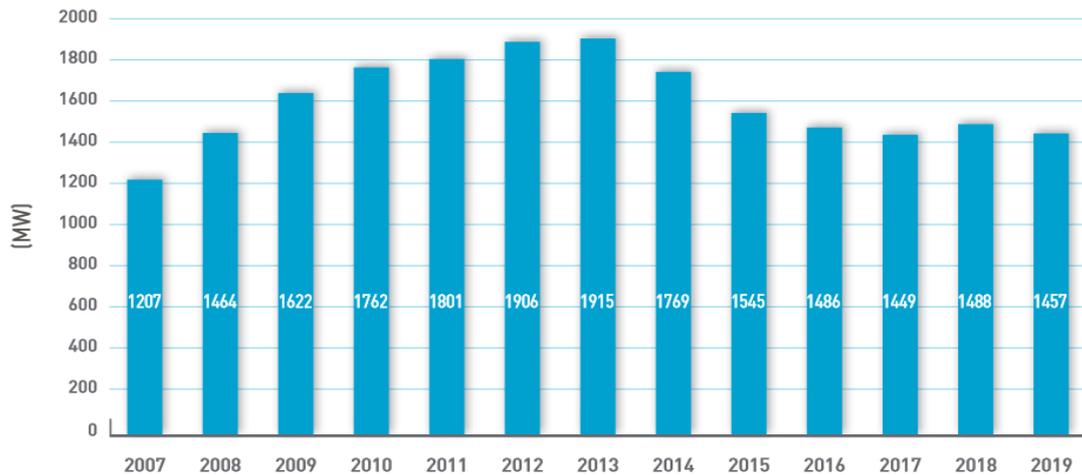


Figura 2.2 - Evolução da potência instalada em Cogeração de 2007 a 2019 em MW (COGEN, 2020)

O transporte da energia térmica acarreta grandes dificuldades, pelo que o seu aproveitamento deverá estar localizado nas proximidades do centro produtor, limitando estas instalações a centrais relativamente pequenas (figura 2.3).

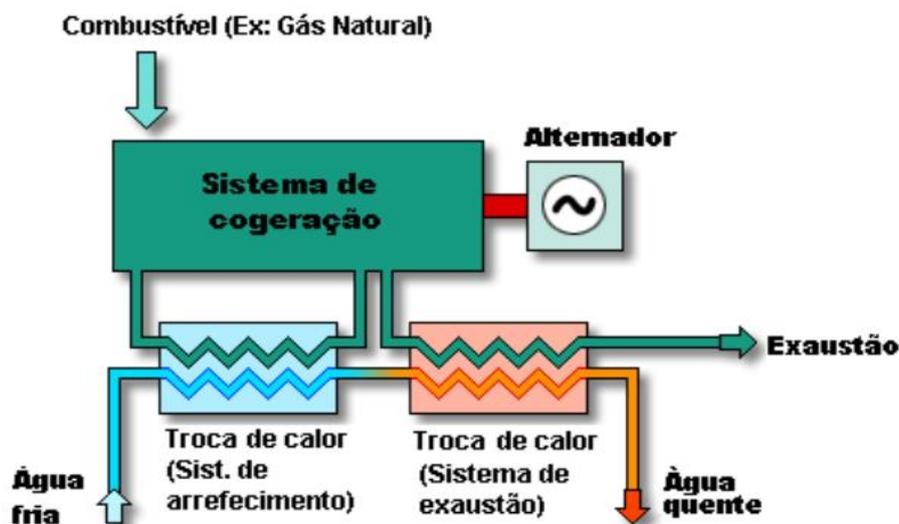


Figura 2.3 - Esquema de um sistema de cogeração (Silva & Costa, 2017)

Os setores de atividade com condições adequadas à instalação de unidades de cogeração correspondem a indústrias ou serviços que consomem grandes quantidades de energia térmica: refinação, petroquímica e química, pasta e papel, cerâmica, têxtil e alimentar (COGEN, 2011).

A energia térmica gerada pelos sistemas de cogeração é utilizada em grande parte para a climatização dos edifícios, no entanto as necessidades de aquecimento são limitadas a alguns meses de Inverno. Há, contudo, necessidades significativas de arrefecimento durante os meses de Verão (Silva & Costa, 2017).

Quando parte da energia térmica gerada é utilizada para produção de frio, dá-se a este sistema o nome de trieração, obtendo-se assim três tipos diferentes de energia, elétrica, térmica fria e térmica quente.

Na figura 2.4 é apresentado um esquema simplificado de um sistema de trieração.

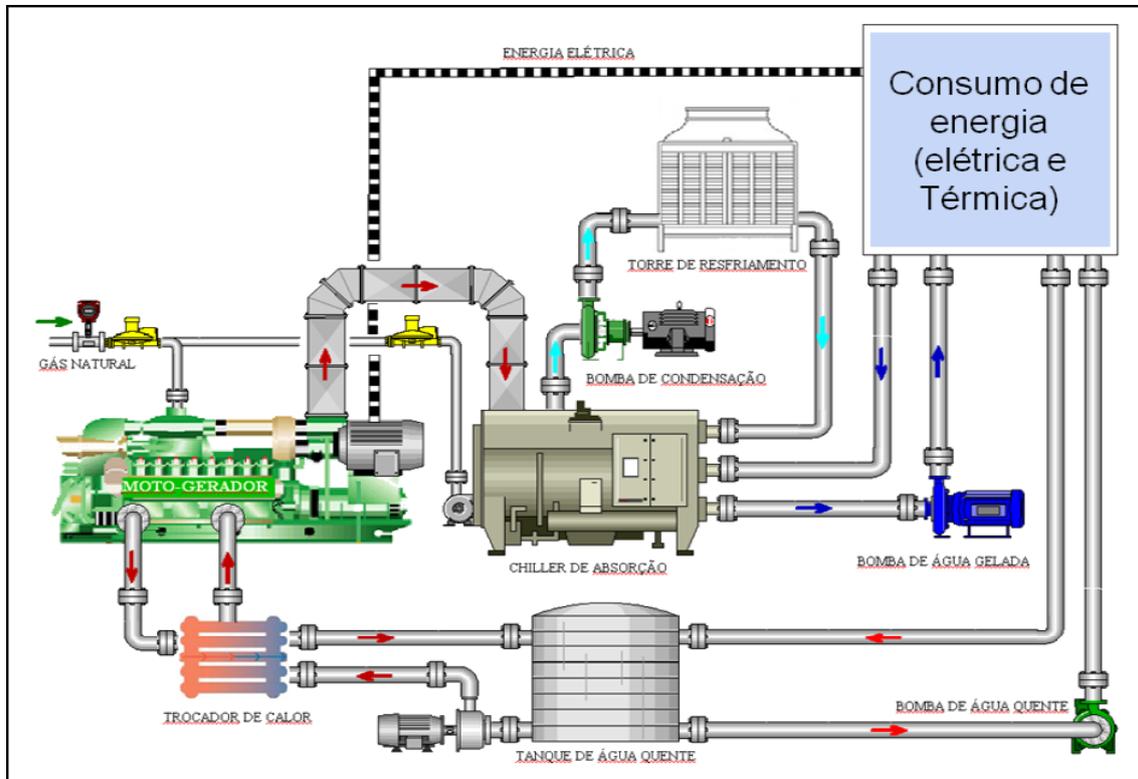


Figura 2.4 - Esquema genérico de uma unidade de trieração (Portal Energia, s.d.)

As centrais de cogeração são classificadas quanto ao tipo de ciclo em que operam (COGEN, 2011):

- Ciclo Simples – Quando é instalado um tipo de equipamento gerador;
- Ciclo Combinado – Quando um ciclo com motor(es) alternativo(s) ou turbina(s) a gás é conjugado com uma turbina a vapor onde se utiliza o vapor gerado pelo aproveitamento térmico dos gases de escape da(s) turbina(s) a gás ou motor(es).

No que respeita aos equipamentos integrantes das instalações de cogeração, convém salientar os seguintes:

- O grupo(s) de cogeração, nos quais se inserem motores de combustão interna, turbinas de gás ou de vapor e pilhas de combustível, e respetivo alternador elétrico;
- Caldeira(s) de recuperação e recuperadores de calor dos produtos de combustão
- Chiller(s) de absorção;
- Chiller(s) de compressão de vapor;
- Torres de arrefecimento;
- Quadros elétricos de potência e de comando;
- Auxiliares, como por exemplo, depósitos de tratamento e armazenamento de água, bombas, etc.;

É necessário fazer algumas considerações relativas aos combustíveis utilizados em instalações de cogeração, dado ser um aspeto central da sua viabilidade. O preço, a disponibilidade, a facilidade de acesso e as características do combustível utilizado são cruciais para a análise do custo de vida da instalação (Roriz, 2007).

O combustível usualmente utilizado em Portugal é o gás natural, uma vez que os produtos resultantes da sua combustão são menos poluentes, comparativamente a outros combustíveis fósseis, assim como a taxa de libertação de dióxido de carbono por unidade de energia química consumida é mais baixa. Adicionalmente, a rede nacional de distribuição de gás natural permite um mais fácil acesso nas zonas abrangidas pela rede, pelo que esta opção passou a constituir uma escolha mais favorável entre as diversas alternativas.

Entre os combustíveis mais utilizados com alternativa ao gás natural, destacam-se os seguintes:

- Gasóleo;
- Gás propano;
- Biocombustíveis.

As vantagens e benefícios dos sistemas de cogeração/trigeração são várias, destacando-se as seguintes (Silva & Costa, 2017):

- Economias de energia primária;
- Redução das emissões de poluentes, uma vez que, com a utilização de gás natural em alternativa aos combustíveis derivados do petróleo ou carvão, as emissões de CO<sub>2</sub> e partículas são praticamente nulas;
- Aumento da fiabilidade do aprovisionamento energético, garantindo uma operação ininterrupta da instalação, no caso de falha do funcionamento da central ou do abastecimento da rede;
- Aumento da estabilidade do sistema elétrico, proporcionando um alívio significativo da rede dos sistemas elétricos durante os meses quentes de verão, uma vez que as cargas de arrefecimento são transferidas da eletricidade servida pelas empresas de distribuição elétrica por unidades de apoio ineficientes para um combustível fóssil.

Na figura 2.5 é possível visualizar a evolução das importações de energia primária evitadas e das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas de 2007 a 2019.

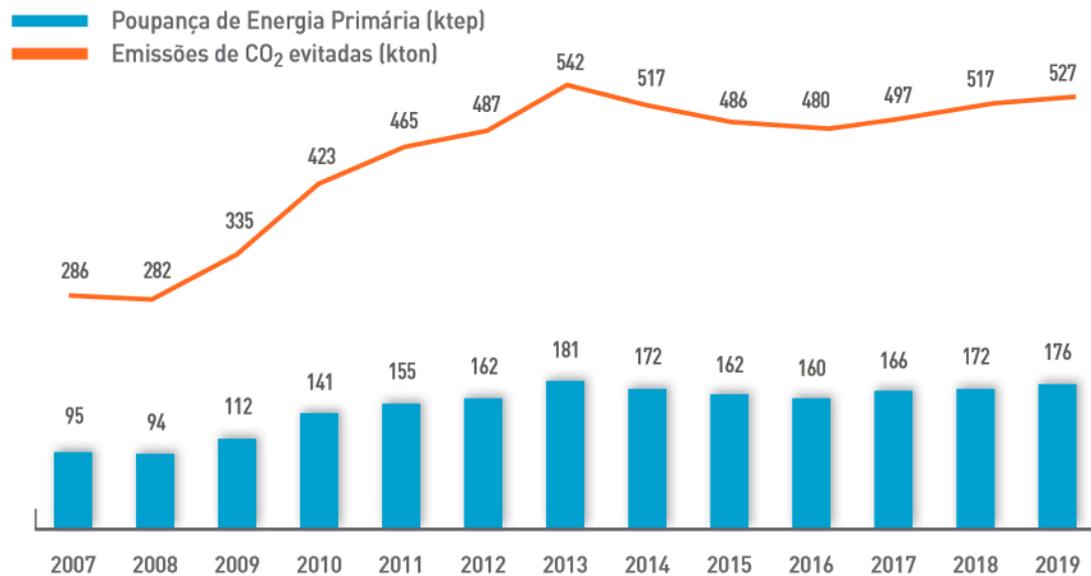


Figura 2.5 - Evolução das importações de energia primária evitadas e das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas de 2007 a 2019 (COGEN, 2020)

### 2.2.2 Chillers

Um chiller é uma máquina que tem como função arrefecer água ou outro tipo líquido em diferentes tipos de aplicações, através de um ciclo termodinâmico (Silva & Costa, 2017).

Os dois principais tipos de chiller são:

- o *chiller* de compressão ou elétrico;
- o *chiller* de absorção.

Os *chillers* de compressão utilizam um compressor mecânico acionado, normalmente por um motor elétrico, de forma a aumentar a pressão em determinada fase do ciclo termodinâmico do sistema (Silva & Costa, 2017).

Os *chillers* de absorção permitem produzir água gelada a partir de uma fonte de calor utilizando para tal uma solução de um sal (brometo de lítio) num processo termoquímico de absorção. Os *chillers* de absorção são, muitas vezes, integrados em sistemas de cogeração, de forma a permitir o aproveitamento do calor que de outra forma seria desperdiçado (Silva & Costa, 2017).

Estas unidades são essencialmente compostas pelos seguintes elementos:

- Gerador, onde água a quente troca calor com a solução de brometo de lítio-água, transformando-a numa solução rica em brometo de lítio e pobre em água através da vaporização da água;
- Evaporador, zona onde é trocado o calor da água gelada do circuito interno do *chiller* com a água que se pretende arrefecer;
- Absorvedor, zona onde volta a misturar-se o vapor que sai do evaporador com a solução rica em brometo de lítio e pobre em água;
- Condensador, zona onde a água, no estado de vapor, é condensada;

- Permutador de calor, no qual solução rica em brometo de lítio e pobre em água troca calor com a solução normal de brometo de lítio e água antes de esta ser reencaminhada para o gerador.

Poderá estar associada à unidade de *chiller* uma torre de arrefecimento, a qual possibilita o arrefecimento da água proveniente do *chiller*, através do contacto com o ar exterior na torre, arrefecendo posteriormente a solução rica em brometo de lítio e pobre em água.

A água arrefecida nestas unidades é bombeada até às UTA's para efetuar o arrefecimento do ar a insuflar nos locais e simultaneamente bombeada até às unidades terminais que removem total ou parcialmente a carga térmica do espaço.

### 2.2.3 Equipamentos de distribuição de energia

Como referido anteriormente, os equipamentos de distribuição da energia produzida no sistema primário constituem o sistema secundário do sistema de climatização, estando englobado neste as UTA's, as condutas de circulação de ar, as torres de arrefecimento, os ventiloconvectores e outros equipamentos. Nesta fase do estudo, serão apenas analisadas com maior detalhe as UTA's, devido à importância que estas representam no sistema em análise.

#### 2.2.3.1 Unidades de tratamento de Ar (UTA)

Uma unidade de tratamento de ar é um dispositivo utilizado para fazer a circulação do ar, manter e controlar as suas condições no estado requerido, e é o maior responsável pelos consumos energéticos nos sistemas de climatização dos edifícios, sendo de primordial importância a otimização do seu funcionamento (Pereira, 2012).

As UTA's são dispositivos responsáveis por diversas funções, destacando-se:

- Filtragem de ar;
- Controlo de temperatura, nomeadamente aquecimento e arrefecimento;
- Controlo do teor de água do ar, através da humedificação ou desumidificação;
- Controlo dos Caudais de ar extraído, insuflado e ar novo;
- Influência direta no nível de pressão do espaço.

Podem ser instaladas diretamente no espaço a climatizar ou montadas nas condutas de circulação que distribuem o ar, sendo uma parte integrante do sistema de climatização.

Podem ser constituídas por diversos equipamentos agrupados como ventiladores, bombas, baterias de aquecimento e arrefecimento, filtros, caixa de mistura, recuperador de calor sensível ou entálpico, válvulas e controlo (Roriz, 2007).

Um esquema de instalação típico de uma unidade de tratamento de ar é apresentado na figura 2.6.

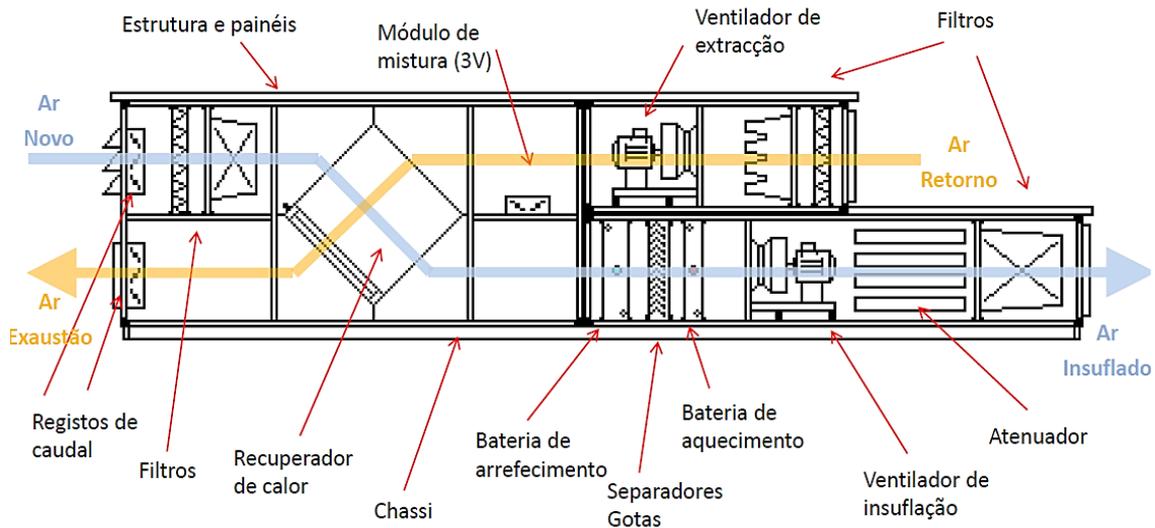


Figura 2.6 - Esquema típico de uma unidade de tratamento de ar (Jesus & Lapa, 2016)

Em sistemas mais simples estas unidades são normalmente constituídas por componentes básicos para o controlo das condições higrométricas, como o ventilador, filtros e bateria de aquecimento ou arrefecimento, realizando apenas a recolha do ar exterior e posterior tratamento para insuflação de ar 100% novo no espaço a tratar, sendo designadas por unidades de tratamento de ar novo (UTAN). Nestes casos, a UTAN tem apenas uma via de insuflação, podendo existir uma unidade de extração independente e situada em noutro local mais conveniente ou não existe extração e o ar é consumido pela atividade de certos equipamentos .

Em sistemas de climatização mais complexos, em que, adicionalmente à manutenção da temperatura do ar pretende-se o aproveitamento de calor através da recirculação do ar de extração, estes equipamentos podem incorporar componentes como humidificadores, recuperadores de calor, registos de ar, válvulas, atuadores, sensores, entre outros. Estas UTA's são constituídas por uma via de insuflação e uma de retorno, adjacentes ou sobrepostas, as quais comunicam entre si por uma câmara de mistura, ou seja, o ar de insuflação tratado na UTA é uma mistura de ar de retorno, extraído dos espaços ventilados e de ar novo.

Nestas UTAs, a fração de ar novo no circuito de insuflação pode ser variável, consoante o perfil de ocupação do espaço a climatizar, podendo funcionar com 100% de ar novo como resposta a necessidades extremas de ventilação ou para aproveitar, sempre que as condições climatéricas sejam propícias, geralmente, no período noturno, o método do arrefecimento gratuito (*free-cooling*).

As UTA's caracterizam-se pela sua excelente flexibilidade construtiva, permitindo que sejam adaptadas para diferentes situações de instalação, podem ser feitas com parâmetros específicos, de forma a adaptarem-se a cada caso, dependendo da complexidade e das funcionalidades pretendidas.

Considerando a existência de condicionantes do espaço de instalação, e de forma a evitar a necessidade de uma UTA de comprimento logo, quando são necessários vários

módulos na unidade, as UTA's podem ser lineares (figura 2.7), ou em “L”, ou de outras formas. As UTA's com sistema de recuperação ou UTA's servindo sistemas de dupla conduta possuem dois níveis (figura 2.8), enquanto que as mais simples possuem normalmente um só nível (Roriz, 2007).

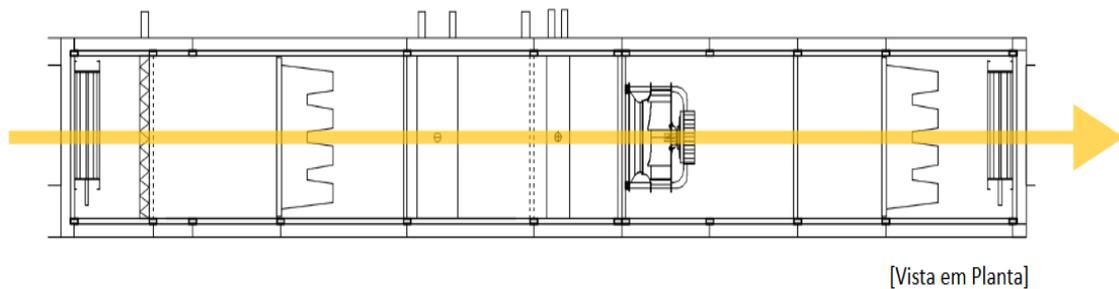


Figura 2.7 - Esquema de instalação de uma UTA linear (Jesus & Lapa, 2016)

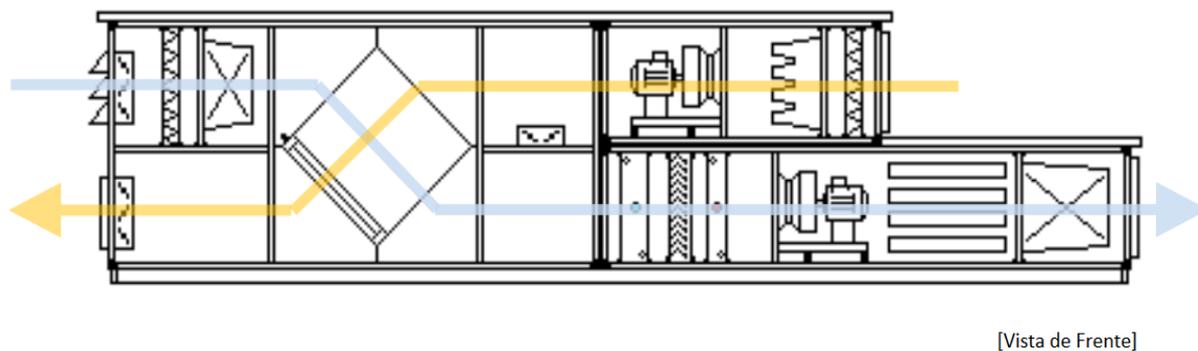


Figura 2.8 - Esquema de instalação de uma UTA de 2 níveis (Jesus & Lapa, 2016)

Segundo a norma EN 13053 (2019), a estrutura e painéis deverão ser fabricados em materiais resistentes à corrosão e abrasão, que não emitam substâncias nocivas para a saúde nem apoio para a formação de colónias de microrganismos.

Na prática, verifica-se que a estrutura é fabricada em perfis de alumínio extrudido sendo os painéis e portas de acesso em alumínio ou chapa de aço zincados, com pintura de acabamento e isolamento no seu interior (Pereira, 2012).

As UTA's podem igualmente ser classificadas segundo a sua estrutura e local de montagem (Pereira, 2012):

- Unidades verticais e horizontais, sendo que nas primeiras o ventilador está montado num nível superior aos filtros e permutadores e as segundas todos os componentes estão montados ao mesmo nível;

- Posição do ventilador, o qual pode estar posicionado antes ou após o permutador de calor;
- Unidades exteriores e interiores, sendo as unidades interiores montadas no espaço a climatizar e as exteriores são normalmente montadas na cobertura exterior do espaço;
- Unidades pré-fabricadas ou feitas por encomenda;
- Unidades de tratamento de ar novo e com recirculação de ar, trabalhando as primeiras com apenas ar novo, o qual passa apenas uma vez no dispositivo e as segundas poderão trabalhar com ar novo ou com mistura de determinada percentagem de ar de retorno, tendo em vista a maximização da eficiência energética.

### 2.3 Conforto Térmico

O conforto térmico pode ser definido como uma condição psicológica de satisfação com o ambiente térmico, que tem como base uma avaliação subjetiva definida pela sensação térmica. Uma vez que existem grandes variações, fisiológicas e psicológicas, de pessoa para pessoa, as condições ambientais exigidas para conforto não são iguais para todos (ASHRAE, 2017).

O conceito de conforto térmico é de difícil avaliação, pois depende de fatores quantificáveis e não quantificáveis e de múltiplas variáveis de caráter pessoal cuja quantificação é complexa, não permitindo portanto estabelecer um método de avaliação que se possa considerar 100% correto, sendo sempre expectável que nessa avaliação, para um determinado ambiente e para um conjunto de indivíduos, exista um certo número de indivíduos que manifestam insatisfação com as condições.

#### 2.3.1 Parâmetros que influenciam o conforto térmico

Os parâmetros que influenciam a sensação de conforto podem ser englobados em três grupos: características físicas, características fisiológicas e os fatores externos. No segundo grupo incluem-se as características relacionadas com a idade, o sexo e as especificidades morfológicas de cada indivíduo. No terceiro englobam-se o tipo de atividade e vestuário (Henriques, 2016).

O primeiro grupo, as características físicas, engloba:

- Temperatura do ar - é influenciada pelas condições ambientais, sendo um parâmetro simples de quantificar, é uma das variáveis mais importantes para avaliar as condições de conforto térmico e conseqüentemente de stress térmico;
- Humidade relativa - representa a concentração de vapor de água no ar relativamente à quantidade máxima de vapor que o ar pode conter a uma dada temperatura, ou seja, é capacidade que o ar apresenta para conter vapor de água relativamente à quantidade máxima que podia ser absorvida. A humidade relativa influencia a dissipação de calor por evaporação entre o corpo humano e

o ambiente, tendo um efeito significativo no conforto térmico quando se verificam elevados níveis de humidade para temperaturas altas, condições que restringem a capacidade de evaporação.

- A temperatura média radiante - é a temperatura média ponderada de todas as superfícies que envolvem um indivíduo, e que trocam calor por radiação com o corpo dessa pessoa, podendo ser obtida por cálculo ou por medição com um termómetro de bolbo negro.
- Velocidade do ar - parâmetro importante que influencia dissipação de calor por convecção entre o ser humano e o ambiente através do mecanismo de evaporação. Não existem valores mínimos de velocidade do ar que garantam o conforto térmico, no entanto o aumento da velocidade do ar diminui a sensação de temperatura, podendo ser responsável pela existência de desconforto localizado.

As características fisiológicas incluem características como a idade, o sexo e as especificidades morfológicas de cada indivíduo, como por exemplo, o metabolismo, o qual pode ser definido como, o calor gerado com a degradação da energia necessária para a manutenção de funções básicas (respiração, circulação sanguínea, etc.) no organismo, mesmo que este esteja em repouso. No terceiro grupo, dos fatores externos estão inseridas a atividade e a resistência térmica do vestuário.

O corpo humano é um sistema termodinâmico aberto, com transformação interna de energia, a qual simultaneamente interage com o meio envolvente externo. Para o corpo humano manter o equilíbrio térmico, a produção interna de calor, originada pelo metabolismo, deverá regular o balanço entre os fenómenos físicos internos e as perdas térmicas por dissipação para o ambiente.

A dissipação de calor do corpo humano resulta dos seguintes mecanismos:

- Radiação – trocas de calor diretas com as superfícies do meio envolvente devido às diferenças de temperatura entre o corpo humano e essas superfícies, estando dependente da temperatura média radiante;
- Convecção – trocas de calor, naturais ou forçadas, com o meio envolvente devido à diferença de temperatura entre o corpo humano e o ar, estando dependente da temperatura e da velocidade do ar;
- Evaporação – dissipação de calor para o meio envolvente pela respiração e evaporação da água presente na camada superficial do corpo humano, estado, estando dependente da humidade e velocidade do ar.

Teoricamente, deveria ainda ser considerado um mecanismo adicional, a condução, mas uma vez que esta não assume geralmente grande relevância no processo de manutenção de equilíbrio térmico, a generalidade da literatura exclui este mecanismo.

Existem ainda outros fatores subjetivos que devem ser considerados para efeitos de conforto térmico, especialmente em edifícios industriais caracterizados por elevados ganhos térmicos, entre os quais se destacam, o tempo de exposição a determinada temperatura e humidade relativa, período do dia e do ano, entre muitos outros fatores.

### 2.3.2 Ambiente térmico e stress térmico

Segundo (Lamberts, 2011), os estudos atuais acerca do stress térmico, bem como os mecanismos de sua determinação e ações preventivas e corretivas, encontram-se subdivididos em 2 grandes grupos:

- Ambiente quente (stress provocado por calor);
- Ambiente frio (stress provocado por frio).

Considerando as especificidades do ambiente industrial da MREF, dominado por elevados ganhos internos decorrentes da atividade produtiva, serão apenas abordados os ambientes quentes.

Os ambientes térmicos quentes são ambientes para os quais o balanço térmico resulta num ganho de calor, isto é, a temperatura do ar ambiente e a temperatura média radiante são superiores à temperatura média cutânea.

O ambiente térmico quente surge, normalmente quando há necessidade do uso de equipamentos que possam fazer elevar a temperatura. Estes equipamentos associados ao tipo de material usado e às características construtivas (portas, carência de janelas, ventilação insuficiente, entre outros), podem gerar altas temperaturas que são prejudiciais à saúde do operador. A sensação de calor sentida pelo indivíduo é resultante da temperatura sentida e do esforço físico que é feito durante a execução da tarefa, podendo em situações extremas gerar stress térmico (Meles, 2012).

O stress térmico existe em zonas de elevado desconforto devido às condições ambientais desfavoráveis, que podem ser provocadas, por exemplo, pelo excesso de calor, aumentando a suscetibilidade à ocorrência de acidentes e possíveis danos para a saúde. Pode definir-se stress térmico, como sendo o estado psicofisiológico a que um indivíduo está sujeito, quando exposto a situações ambientais extremas de frio ou calor (Meles, 2012). O desconforto térmico pode ser sentido em todas as partes do corpo de forma homogênea ou pode ser sentido em apenas uma ou várias zonas do corpo humano.

O ser humano, em condições de stress térmico sofre alterações das reações psicossensoriais e decréscimo do rendimento laboral, havendo diversos estudos que o comprovam estes efeitos, embora não haja um consenso quanto ao verdadeiro nível de impacto, uma vez que este depende de um número de fatores, nomeadamente a capacidade de aclimatização do indivíduo, a tarefa específica desempenhada e a habilidade do indivíduo para a desempenhar.

O Guia A de Design Ambiental da CIBSE (2006) contém um modelo representativo que engloba diversos desses estudos (figura 2.9), verificando-se que para níveis de temperatura do ar superiores a 25°C começa-se a registar um decréscimo do rendimento dos ocupantes do espaço.

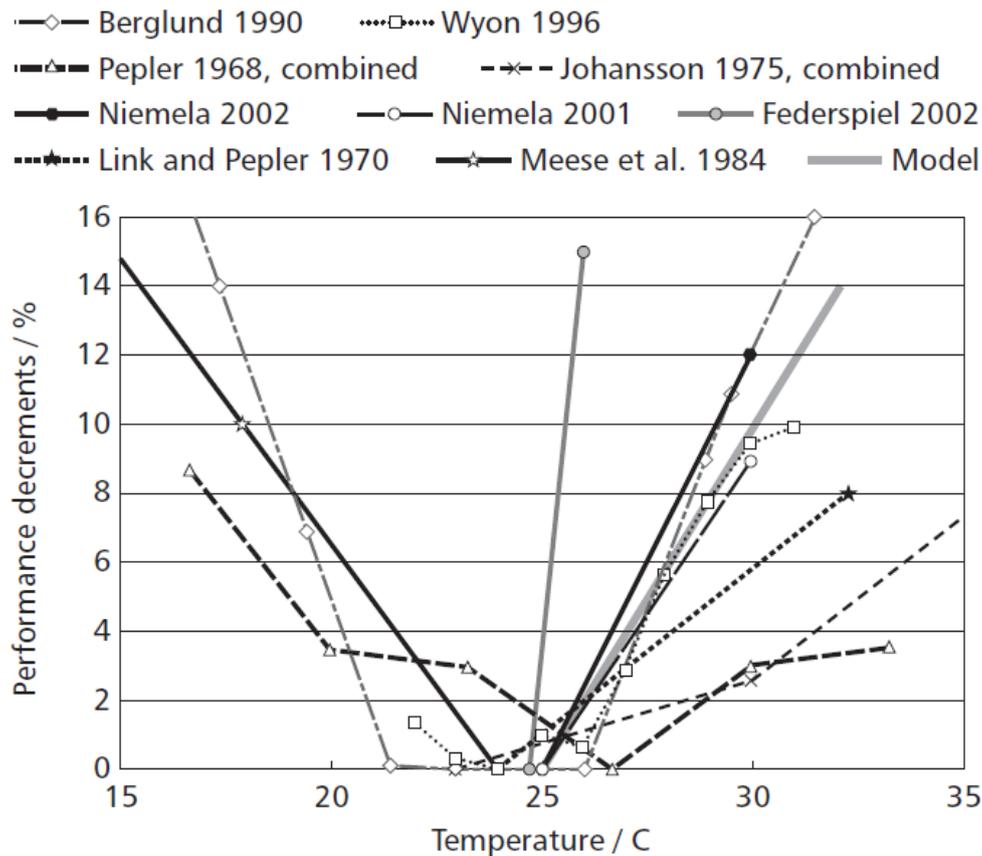


Figura 2.9 - Relação entre a temperatura do ar do espaço e o desempenho dos ocupantes (CIBSE, 2006)

Como já mencionado anteriormente, em ambientes industriais com elevados ganhos térmicos, a temperatura média radiante é, igualmente, um fator significativo a ter em conta na avaliação do ambiente térmico. Geralmente, é utilizado como parâmetro de avaliação desses ambientes a temperatura operativa, a qual combina a temperatura do ar e a temperatura média radiante num único valor representativo do seu efeito conjunto.

A temperatura operativa é definida como a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual uma pessoa trocava a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme. A temperatura operativa resulta da média ponderada entre a temperatura média radiante, a temperatura do ar e os coeficientes entre as trocas de calor por convecção e radiação (ASHRAE, 2019).

No Guia A da CIBSE (2006), não são estabelecidos limites máximos de temperatura operativa para edifícios industriais em regime de arrefecimento, devido à grande diversidade de atividades desenvolvidas neste tipo de edifício. No entanto, a norma EN 15251 (2006) especifica os parâmetros de ventilação e conforto para espaços interiores habitáveis não climatizados, mas que podem ser utilizados como base para análise de edifícios sujeitos a condições extremas de temperatura, estabelecendo uma gama de temperaturas operativas aceitáveis em função da temperatura média exterior para diferentes categorias de edifícios (figura 2.10), as quais variam de acordo com grau de expectativa dos ocupantes e o tipo de construção, sendo a categoria I a mais exigente e

recomendada para espaços ocupados por pessoas mais sensíveis e frágeis e, a categoria III a menos exigente e usualmente aplicada para edifícios existentes, ocupados por pessoas com um mínimo grau de expectativa aceitável.

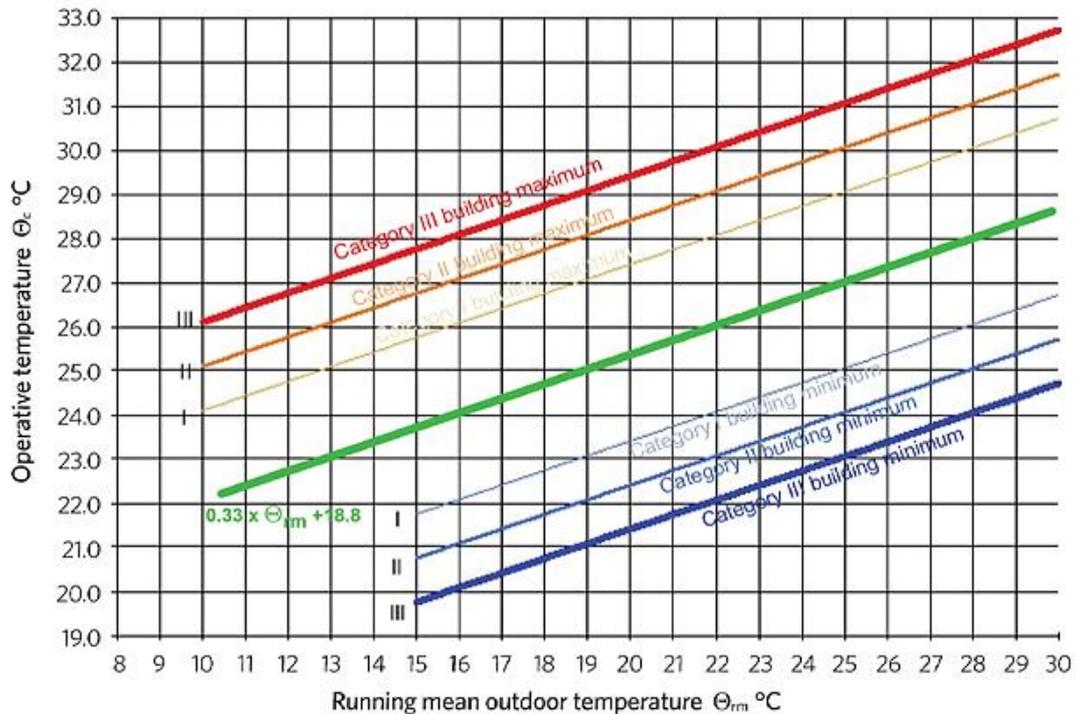


Figura 2.10 - Valores recomendados de temperatura operativa interior para edifícios não climatizados, em função da temperatura média exterior (European Committee for Standardization, 2006)

Em casos de ambientes quentes extremos podem ocorrer doenças com carácter complexo, nomeadamente, do foro psicológico, cardiovascular entre outras. Estas constituem uma importante causa de absentismo e de incapacitação para o desenvolvimento eficiente do trabalho, ou mesmo levar à morte (Morgado, 2014).

No entanto, o corpo humano, quando exposto a ambientes extremos desencadeia ações de regulação adequadas a partir do sistema termorregulador do organismo e através do nosso comportamento, através da adaptação fisiológica, comportamental e psicológica (Morgado, 2014).

Os mecanismos humanos mais comuns que permitem responder a esta regulação são os vasos sanguíneos, a segregação de suor e a termogénese. As ações comportamentais mais frequentes para combater o desconforto são a mudança de vestuário, mudança de atividade, mudança de postura ou local, abertura/fecho de uma janela, abandono de um espaço, ligar/desligar de um sistema de ventilação ou protestar (Morgado, 2014).

Os padrões de conforto começam a ser repensados e presentemente o conceito de conforto adaptativo começa a ganhar relevância na definição dos padrões de conforto, tal como acontece com a norma EN 15251 (2006). O conforto adaptativo é baseado no princípio de que as pessoas, até certo ponto, se conseguem adaptar a uma variedade de condições interiores, “incentivando-as” a tomar um papel ativo no controlo do conforto,

de forma a poderem adaptar-se a uma gama mais alargada de temperaturas do que aquelas que são, mais ou menos, convencionadas (20-25 °C).

A aclimatização a ambientes extremamente quentes é possível, como demonstra um estudo de (Sid Robinson, 1943), no qual os autores mostraram resultados a uma exposição de cinco indivíduos a um ambiente térmico com uma temperatura do ar de 40°C e uma humidade relativa de 23%, durante 6 dias, observando-se neste estudo que há um decréscimo da frequência cardíaca, da temperatura retal e da temperatura da pele, com o decorrer dos dias. Segundo (ASHRAE, 2017), a aclimatização pode ser atingida a partir da exposição a este tipo de ambientes durante um período de 100 minutos por dia de trabalho, em que 30% ocorre após o primeiro dia, 50% após três dias e 95% após 6-7 dias, referindo ainda que, o desenvolvimento de atividade física regular nestes ambientes pode melhorar a eficiência cardiovascular, a secreção de suor e a conservação de sódio.

É imprescindível conhecer as condições ambientais que conduziram ao stress térmico, ou seja, qual o tipo de trabalho e o tempo exposto a esta situação, para depois estabelecer quais as ações preventivas e corretivas que se podem aplicar (Meles, 2012).

Para além da componente humana, o estudo do ambiente térmico tem uma grande relevância a nível económico, principalmente no que se refere à gestão da eficiência energética.

Uma análise coerente do ambiente térmico assenta em três aspetos fundamentais. Em primeiro lugar, o conforto térmico é uma temática de saúde pública e por isso com preocupações para os indivíduos, o que leva à necessidade de assegurar o conforto térmico dos colaboradores no seu espaço de atuação. Em segundo lugar, e inteiramente associado ao primeiro aspeto, o conforto térmico é fulcral para uma boa performance humana, isto é, um indivíduo em conforto térmico apresenta melhor rendimento. Por último, é essencial para a conservação energética, pois conhecendo os parâmetros termohigrométricos de um determinado espaço evitam-se desperdícios de energia (Morgado, 2014).

Neste sentido, e em conformidade com o objetivo principal das empresas que consiste na geração de lucro, o estudo conforto térmico pode ser considerado um elemento fundamental na procura da melhoria contínua, visto que é uma ferramenta que permite aperfeiçoar o ambiente de trabalho, criando melhores condições para o desenvolvimento do mesmo.

## 2.4 Simulação Dinâmica

A crescente preocupação com as questões ambientais e as suas implicações na racionalização dos consumos energéticos, a maior preocupação com a saúde pública e diferentes aspetos económicos, traduzidos numa regulamentação cada vez mais restritiva, tornam o uso de um software de simulação, acreditado pela norma ASHRAE 140-2017, a base inicial de qualquer projeto de AVAC. Estes softwares permitem definir estratégias de uma forma mais segura e tomar decisões conscientes na fase de projeto, sustentadas num modelo matemático, posteriormente traduzido em parâmetros energéticos.

Os softwares de simulação dinâmica apresentam uma enorme versatilidade, constituindo uma ferramenta poderosa quando aplicados e explorados eficientemente, traduzindo-se em inúmeras vantagens na sua utilização, como por exemplo, a previsão mais precisa dos consumos energéticos do edifício e das cargas térmicas, o isolamento térmico a colocar e conseqüentemente o efeito da inércia térmica interior, o estudo e definição dos sombreamentos interiores e exteriores, entre outras.

Comparando diferentes programas e os resultados globais obtidos pelas simulações dinâmicas, verifica-se que estes não são contraditórios, mas registam-se algumas diferenças (Roriz, 2007).

As principais diferenças entre os softwares de simulação, estão relacionadas com a forma de introdução dos inputs necessários e o nível de detalhe dos mesmos, sendo que, as limitações mais comuns neste tipo de softwares prendem-se na sua generalidade, com a definição de geometrias e sistemas de AVAC com um elevado nível de complexidade.

Genericamente, a base comum destes programas são os dados físicos do edifício real que permitem convertê-lo num modelo, mais ou menos simplificado, ajustado às funções e formulação de entrada de dados disponibilizados pelo programa. Assim, tendo em conta esta base e reconhecendo que os vários processos de cálculo térmico aplicados, embora diferentes, são de uma forma geral aceites, lança-se então a seguinte questão: qual o motivo de surgirem situações em que a aplicação de softwares diferentes leva à obtenção de resultados diferentes? (Roriz, 2007).

As possíveis causas para a obtenção de resultados diferentes podem ser, por exemplo:

- Utilização de diferentes métodos de cálculo, nomeadamente no cálculo das cargas térmicas;
- Diferentes interpretações da arquitetura ou a simplificação de qualquer um dos vectores base para o desenvolvimento de uma simulação;
- Diferenças existentes na base de dados dos ficheiros climáticos usados por cada software.

Como bom princípio de desenvolvimento do modelo da simulação apresentam-se alguns pontos a definir imediatamente após a escolha do ficheiro de dados climáticos adequado ao local do edifício real (Roriz, 2007):

- Fatores climáticos especiais a ter em conta;
- Período de simulação;
- Dados das várias tipologias de envolvente;
- Orientação do(s) edifício(s);
- Sombreamentos existentes;
- Horários de ocupação e respetivas densidades;
- Ventilação e infiltrações de ar;
- Cargas térmicas internas;
- Sistema de climatização e ventilação;
- Curvas de funcionamento dos equipamentos principais.

A leitura dos resultados de uma simulação deve ser feita sempre com espírito crítico, uma vez que os softwares de simulação geram resultados de acordo com a informação introduzida pelo utilizador.

#### 2.4.1 DesignBuilder e EnergyPlus

O DesignBuilder é um programa de modelação energética que permite efetuar simulações térmicas de edifícios, possibilitando a introdução de dados referentes à geometria do edifício, características dos sistemas de aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação artificial, materiais construtivos, taxas de ocupação, entre outros, de modo a criar um modelo 3D do edifício a simular. A grande vantagem deste software é a sua interface gráfica que torna as simulações simples e intuitivas, até para utilizadores menos experientes.

O DesignBuilder foi desenvolvido como uma interface avançada para as capacidades de cálculo e simulação do EnergyPlus. Este último foi desenvolvido por iniciativa do Departamento de Energia Norte-Americano (DOE) a partir de outros dois softwares, o *Building Loads Analysis and System Thermodynamics* (BLAST) e o DOE-2.

O EnergyPlus baseia-se nas características geométricas e físicas do edifício e dos diferentes sistemas integrados para proceder ao cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento que garantem o conforto térmico e avaliar a performance energética do edifício. Tem capacidades de simulação diferenciadas, podendo-se destacar por exemplo, a possibilidade de cálculo de infiltração de ar para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico, como por exemplo o modelo de Fanger, um time-step de cálculo menor que uma hora, entre muitas outras capacidades.

A grande variedade de dados resultantes das simulações e a precisão nos seus resultados fazem do EnergyPlus um dos softwares de simulação de edifícios mais utilizados em todo o mundo. Porém, a introdução de dados neste programa é algo

complexa, daí o desenvolvimento do DesignBuilder, como interface gráfica do EnergyPlus, para facilitar a introdução de dados.

A versão do DesignBuilder utilizada para o desenvolvimento desta dissertação foi versão 6.1, lançada no ano de 2019, tendo como base a versão 8.9 do EnergyPlus.

#### 2.4.1.1 Introdução ao DesignBuilder

O DesignBuilder tem a capacidade de fazer múltiplas simulações apresentando os resultados destas na forma de gráficos ou tabela de dados. É possível fazer variar até dois parâmetros e definir um time-step personalizado para o programa realizar a análise paramétrica. As variáveis que são possíveis de analisar estão relacionadas com o tipo de materiais dos diferentes elementos (paredes, tetos, pavimentos e envidraçados), com a geometria do edifício (e.g. relação entre a envolvente opaca e translúcida), com as condições do ambiente interior (e.g. níveis de ocupação, ganhos internos, iluminação) e com as características dos diferentes equipamentos (e.g. equipamentos de ventilação e de climatização).

Na criação do modelo para simulação é necessário definir a geometria geral do edifício, as condições do ambiente interior e exterior, as características dos diferentes elementos construtivos, o tipo de ventilação e os níveis de atividade, nomeadamente a taxa de ocupação, o funcionamento de equipamentos e a iluminação artificial.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do programa, é necessário primeiro perceber como funciona a hierarquia de dados. No DesignBuilder a definição da geometria de modelação está organizada de forma hierárquica em seis níveis diferentes (figura 2.11). Uma alteração feita num nível superior é igualmente aplicada nos níveis seguintes. Isto permite não só fazer alterações ao nível do edifício, que se refletem em todos os blocos que constituem o mesmo, como também personalizar aspetos individuais ao nível de cada zona ou superfície.

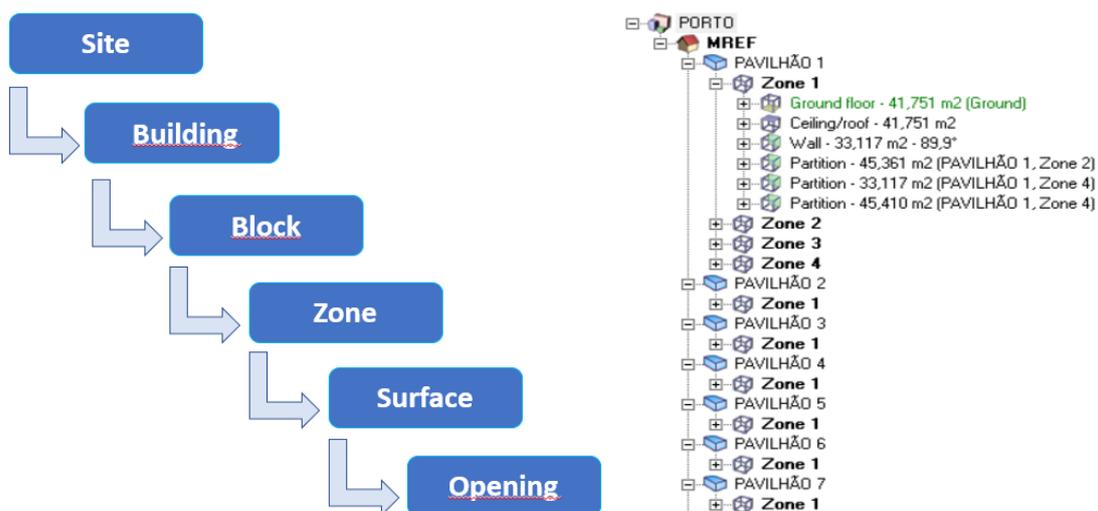


Figura 2.11 - Hierarquia de dados no DesignBuilder

Na figura 2.12, é possível observar o esquema da janela do programa e a identificação dos seus vários elementos constituintes. Na parte superior da janela encontra-se o Menu, o qual possibilita efetuar diferentes operações como criar, abrir ou guardar um projeto, assim como importar ou exportar dados.

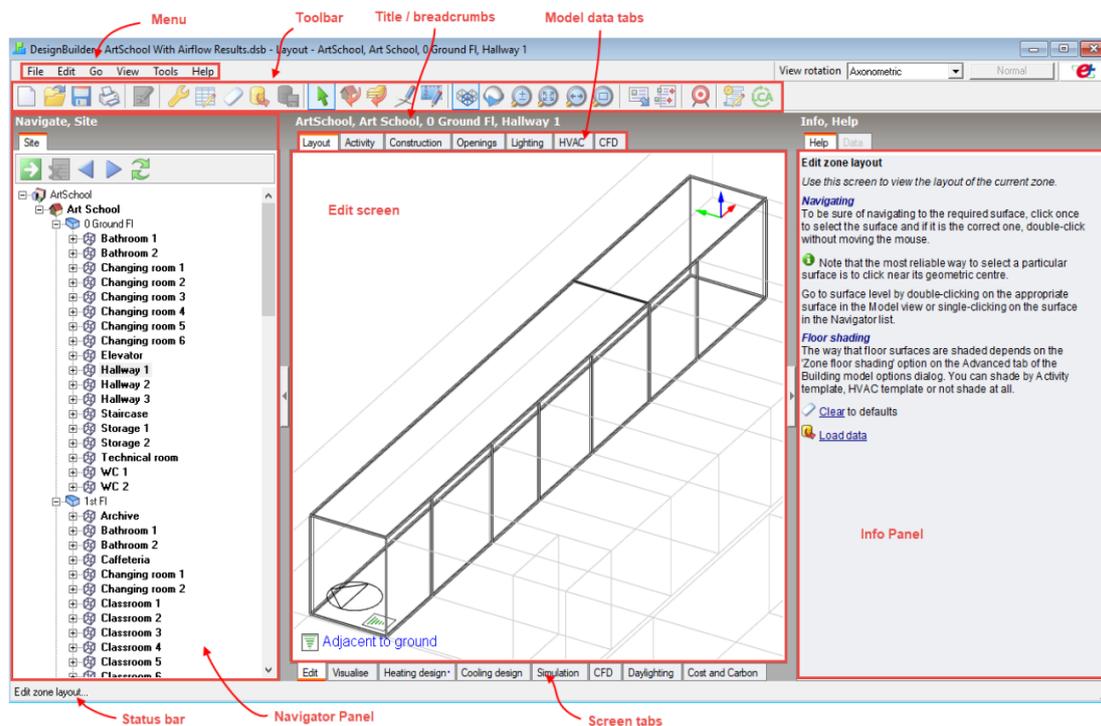


Figura 2.12 - Esquema da janela do programa e a identificação dos seus vários elementos constituintes (DesignBuilder Software Ltd, 2019)

O Painel de Navegação (*Navigator Panel*), permite selecionar os diferentes níveis hierárquicos de dados, como por exemplo, uma zona em particular do edifício ou o edifício completo, de modo a introduzir alterações ou obter informações nesses elementos. Na Barra de Ferramentas (*Toolbar*) estão as ferramentas utilizadas para a construção e edição da geometria do modelo.

Na Janela de Edição (*Edit Screen*) efetua-se a modelação geométrica do edifício, e através dos diferentes Separadores de Dados (*Model data tabs*), é possível definir os dados relativos aos materiais construtivos, tipo de atividade desenvolvida, sistemas de ventilação e climatização, iluminação e aberturas.

Já nos Separadores de Janela (*Screen Tabs*) pode-se observar a renderização do modelo, consultar os dados da simulação, nomeadamente do projeto de aquecimento e de arrefecimento e da iluminação natural. Finalmente, o Painel de Informação serve como um auxiliar, orientando e sugerindo o utilizador nas diversas ações e tarefas a realizar.

O primeiro passo na criação de um projeto no DesignBuilder, é definir o nome do projeto, a localização deste, e estabelecer o modelo de simulação, que neste caso será o EnergyPlus.

Em seguida, pode-se iniciar a definição geométrica do modelo. Como se pode observar na figura 2.13, a construção geométrica do modelo é relativamente simples, sendo esta

realizada por blocos. Estes são a base da modelação e permitem definir a geometria do edifício a simular. Os blocos são criados através da extrusão de uma qualquer forma geométrica previamente desenhada no programa, podendo-se efetuar alterações na sua orientação e nas suas dimensões em qualquer instante. Adicionalmente, é possível proceder-se à união de diferentes blocos, ou à divisão interna de um bloco em várias zonas, que funcionam como as divisões de compartimentação interna do edifício.

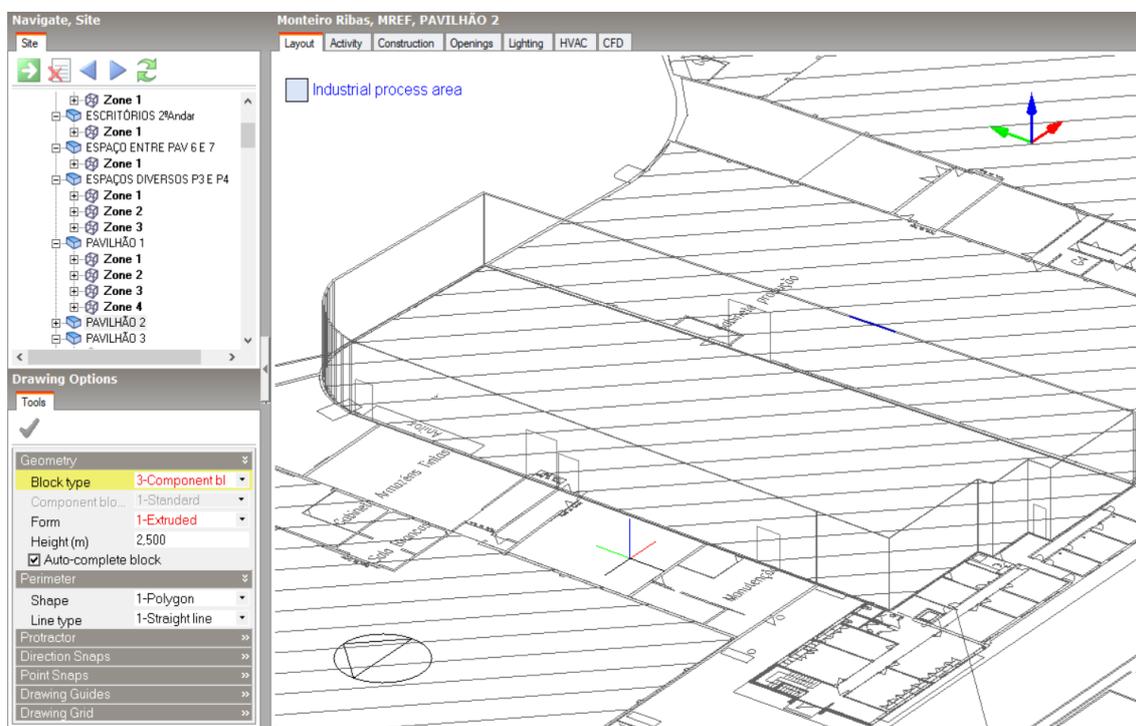


Figura 2.13 - Ilustração da construção geométrica do modelo

#### 2.4.1.1.1 Ambiente Exterior

O ambiente exterior e todos os parâmetros climáticos tem como base a localização escolhida para o projeto, à qual está associada um ficheiro de dados predefinidos. O Designerbuilder contém uma extensa base de dados climáticos de diferentes países, baseada em informação partilhada pela ASHRAE e medições reais, recolhidas e compiladas ao longo de vários anos. Os dados referentes a Portugal são da autoria do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

#### 2.4.1.1.2 Ambiente Interior

O separador *Activity* permite configurar as condições do ambiente interior, podendo ser definidos diferentes tipos de atividade para cada bloco ou zona (figura 2.14). O DesignBuilder permite caracterizar as diferentes partições como:

- *Standard* - zona com ocupação e com aquecimento e/ou arrefecimento;
- *Semi-exterior unconditioned* - espaço não útil, ou seja, zona sem ocupação e climatização;

- *Cavity* - zona de cavidade, como por exemplo uma caixa de ar dentro de uma parede;
- *Plenum* - zona situada no espaço vazio dos tetos falsos sem climatização ou ventilação mecânica destinada à instalação de diferentes sistemas.

Selecionando uma destas opções, o programa estabelece automaticamente um conjunto de parâmetros e valores que melhor se adequam ao tipo de zona definido.

Adicionalmente, neste separador são especificados a taxa ocupação do espaço, o horário de utilização, entre outros parâmetros, como por exemplo, o tipo de vestuário, o metabolismo, o caudal de ar fresco a fornecer aos ocupantes e a taxa de libertação de CO<sub>2</sub> dos mesmos. De modo a caracterizar o controlo de temperatura, é definido o intervalo de temperatura interior pretendido para a zona em análise, estipulando a temperatura de *setpoint*, que corresponde à temperatura que deve ser garantida durante o horário de ocupação, e a temperatura de *setback*, que corresponde à temperatura do espaço quando este não tem ocupação.

Ainda no separador *Activity* é possível introduzir os dados relativos aos ganhos internos, nomeadamente, os ganhos resultantes da iluminação, equipamentos diversos e processos desenvolvidos na partição.

The screenshot shows the 'Activity' tab in a software interface. The 'Activity Template' section is expanded, showing the following parameters:

- Activity Template:** Industrial process area
- Template:** B2 to B7 General Industrial and Special Industrial Groups
- Sector:** 1-Standard
- Zone type:** 1
- Zone multiplier:** 1
- Include zone in thermal calculations
- Include zone in Radiance daylighting calculations

The 'Occupancy' section is also expanded, showing:

- Number of people:** 23
- Schedule:** Horário Ocupação Monteiro Ribas
- Metabolic:** >>
- Clothing:** >>
- Comfort Radiant Temperature Weighting:** >>

The 'Environmental Control' section is expanded, showing:

- Heating Setpoint Temperatures:**
  - Heating (°C):** 21
  - Heating set back (°C):** 20
- Cooling Setpoint Temperatures:**
  - Cooling (°C):** 25
  - Cooling set back (°C):** 26
- Humidity Control:** >>
- Ventilation Setpoint Temperatures:** >>
- Minimum Fresh Air:** >>
- Lighting:** >>

Other sections visible include 'Computers', 'Office Equipment', 'Miscellaneous', 'Catering', and 'Process', all with '>>' indicators.

Figura 2.14 - Separador onde se introduzem os dados relativos à atividade desenvolvida no espaço

### 2.4.1.1.3 Elementos construtivos

No separador *Construction* introduzem-se as características construtivas de todos os elementos do modelo, como paredes, cobertura, pavimento e envidraçados. O DesignBuilder inclui uma extensa biblioteca de materiais e elementos construtivos, sendo possível editar os componentes existentes predefinidos ou criar componentes totalmente novos, através da especificação das características pretendidas. Cada material possui informações sobre seu aspeto visual, como a rugosidade ou cor e sobre as suas propriedades físicas como, por exemplo, a espessura, o coeficiente de condutibilidade térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ ), a densidade ( $kg/m^3$ ), entre outras.

Os elementos construtivos como paredes, pisos e coberturas são compostos por um conjunto de materiais diferentes. Para criar um componente novo é necessário escolher o número de camadas e atribuir um material e uma espessura a cada uma delas, uma vez que os elementos construtivos como paredes e coberturas, são usualmente compostos por um conjunto de materiais diferentes (figura 2.15).

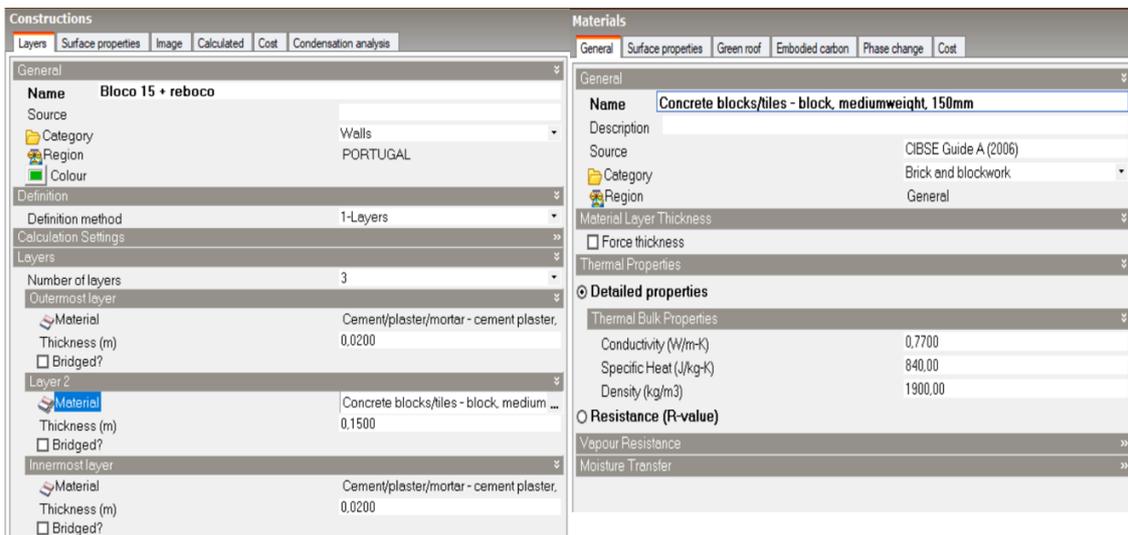


Figura 2.15 - Definição de elemento construtivo (esquerda) e dos materiais (direita)

Também é possível nesse mesmo separador definir a taxa de infiltração de ar através destes elementos, caracterizada em renovações de ar por hora (rph).

### 2.4.1.1.4 Aberturas

O separador *Openings* inclui todas as opções relacionadas com as aberturas existentes no edifício, como portas, janelas, claraboias, e grelhas de ventilação (figura 2.16). O programa está capacitado para desenhar automaticamente os envidraçados do edifício, baseando-se em dados relacionados com a percentagem de envolvente envidraçada, dimensões e distância ao solo de cada janela, realizando uma distribuição uniforme destes ao longo da envolvente do edifício.

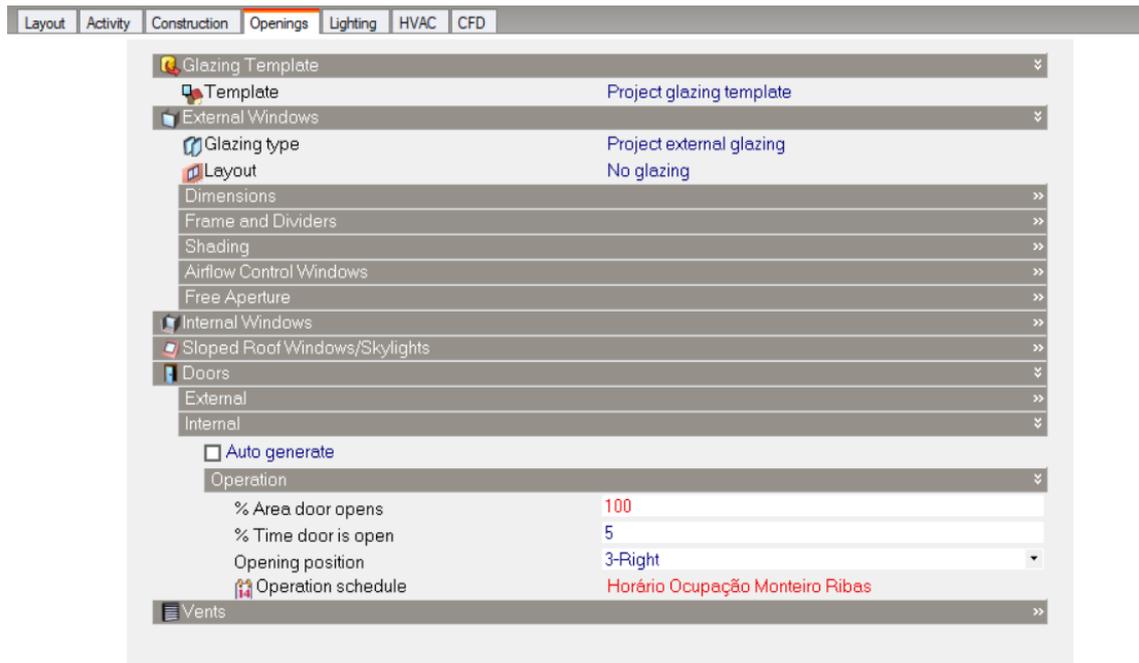


Figura 2.16 - Separador onde se introduzem os dados relativos às aberturas

De referir que para este estudo, este separador não tem grande relevância uma vez que a envolvente em análise não apresenta qualquer envidraçado, apenas portas de conexão para os diferentes pavilhões e exterior.

#### 2.4.1.1.5 Iluminação

O separador *Lighting* permite controlar a iluminação artificial, possibilitando particularizar o tipo de dispositivo, a sua potência de iluminação e o horário de funcionamento (figura 2.17). Para além disso, possibilita a caracterização da fração visível, da fração de convecção e da fração radiante dos diferentes tipos de iluminação e os ganhos internos resultantes. Existe ainda, a opção *Lighting Control*, a qual estabelece os níveis de iluminação artificial em função dos níveis de iluminação natural, garantindo sempre que a iluminação artificial é ativada quando a intensidade da iluminação natural não é suficiente para garantir os níveis de iluminação necessário.

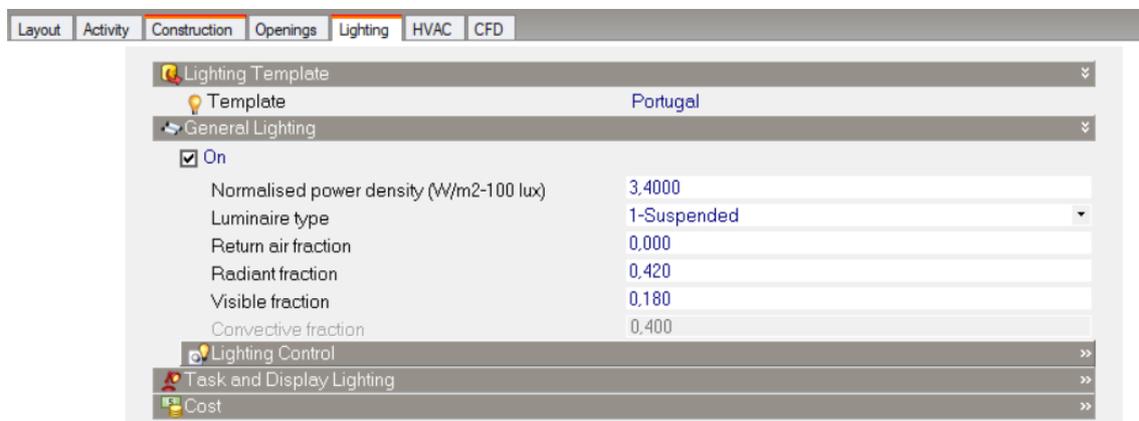


Figura 2.17 - Separador onde se introduzem os dados relativos à iluminação

#### 2.4.1.1.6 Ventilação

A ventilação mecânica e a sua caracterização estão dependentes do modo de cálculo escolhido nas definições gerais do modelo, sendo possível selecionar dois tipos de modelação diferentes:

- *Ideal Loads* - modela conjuntamente os sistemas de ventilação e de climatização. A parcela das cargas térmicas originadas pela ventilação mecânica não é detalhada nos resultados, sendo o seu valor apresentado como aquecimento ou arrefecimento sensível;
- *Room Ventilation* - os sistemas de ventilação e climatização são modelados de forma separada, sendo discriminadas nos resultados as cargas térmicas associadas a cada um destes. Esta opção permite ainda a definição do tipo de sistema de ventilação como sendo de admissão ou de extração de ar.

Relativamente à ventilação natural estão disponíveis dois tipos de modelação:

- *Calculated* - o programa calcula o fluxo de ar que se estabelece através da conjugação da ação do vento e do efeito chaminé. Desta forma torna-se possível quantificar o caudal médio de ar que atravessa uma determinada grelha de ventilação e comparar a eficiência da ventilação de diferentes tipos de fachada;
- *Scheduled* - a ventilação natural é definida através da imposição do número de renovações horárias e dos períodos em que esta ocorre para cada zona, sendo para tal necessário conhecer com exatidão as condições de ventilação dos diferentes espaços.

No separador HVAC (figura 2.18), é possível estabelecer os parâmetros característicos do sistema de aquecimento e arrefecimento para cada zona e definir o tipo de ventilação (mecânica, natural ou as duas). No DesignBuilder existem três níveis de modelação dos sistemas AVAC (simples, detalhado ou compacto) e três modos de dimensionamento (adequado, manual ou automático).

É possível selecionar os diferentes equipamentos a introduzir no modelo construtivo, existindo para tal modelos pré-definidos na biblioteca do programa, os quais podem ser editados pelo utilizador. Adicionalmente, é possível definir os horários de funcionamento, a fonte de energia e os respetivos *Coefficient Of Performance* (COP) e *Energy Efficiency Ratio* (EER), para os diferentes equipamentos de aquecimento e arrefecimento, tornando exequível a introdução das informações de catálogo de um determinado equipamento, e a simulação das suas capacidades.

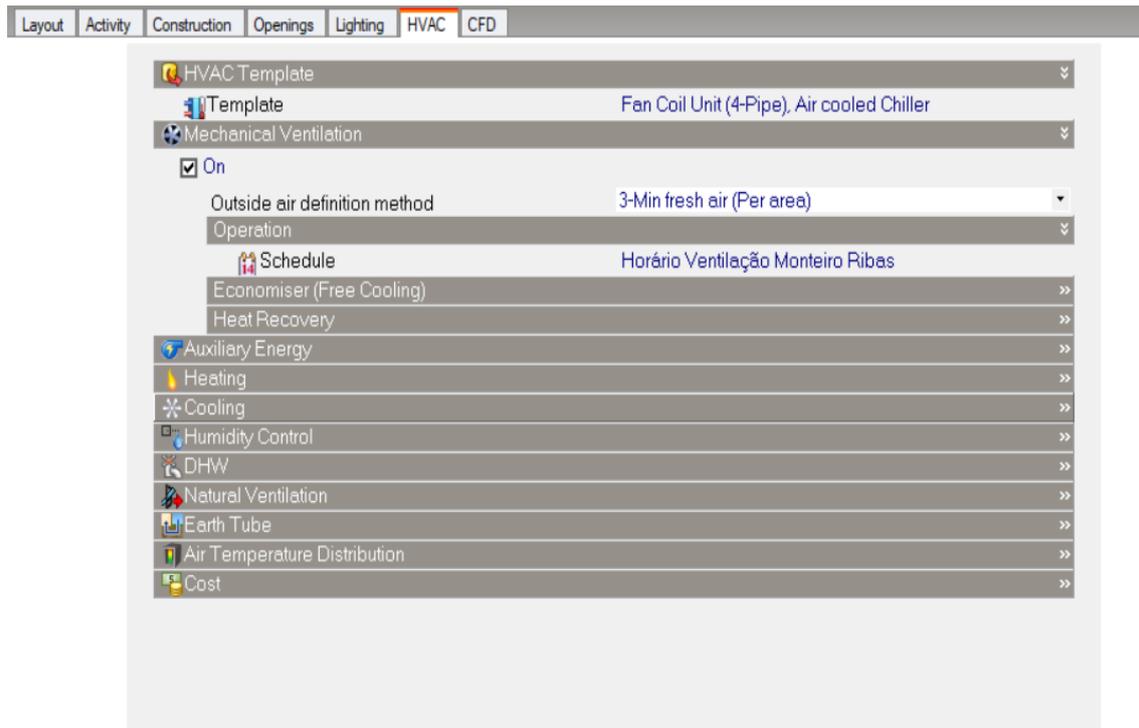


Figura 2.18 - Separador onde se introduzem os dados relativos à ventilação

A abertura e fecho das grelhas de admissão e exaustão podem ser programadas para operar num horário definido, sendo também possível de ser feita a modelação de modo a que o seu funcionamento esteja dependente dos diferenciais de temperaturas entre o interior e o exterior.

Convém mencionar que o DesignBuilder não quantifica a influência da ventilação mecânica na modelação da circulação de ar através de grelhas de ventilação, janelas ou orifícios, não considerando os caudais de ar que atravessam estes elementos quando a opção ventilação natural é excluída e apenas considerada a opção de ventilação mecânica.

#### 2.4.2 Resultados da simulação

Concluída a modelação geométrica e a parametrização do caso de estudo, pode-se iniciar a simulação do edifício e obter os dados característicos do seu comportamento higratérmico, sendo possível selecionar as variáveis a apresentar e o formato destas, nomeadamente em gráfico, tabela ou folha de cálculo.

O Designerbuilder, possui três módulos de simulação:

- *Heating Design Simulation;*
- *Cooling Design Simulation;*
- *Hourly weather data Simulation.*

### 2.4.2.1 Heating Design Simulation

Este módulo simula as piores condições de cargas térmicas possíveis na estação de aquecimento para a localização em que o edifício está inserido. A simulação calcula as necessidades de aquecimento para manter a temperatura interior ao nível estabelecido, quantificando todas as perdas de calor que se dão através de cada elemento da envolvente, para a totalidade do edifício e para cada compartimentação.

Os resultados obtidos neste módulo de simulação são os seguintes:

- Temperatura do ar interior;
- Temperatura média radiante – média das temperaturas superficiais da envolvente dos espaços com ocupação considerando adicionalmente o efeito da radiação solar incidentes nessas superfícies;
- Temperatura operativa – temperatura uniforme de um corpo radiante negro com o qual um individuo trocava a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que troca com o ambiente em que está inserido;
- Temperatura de bolbo seco – temperatura média do ar exterior sem o efeito da humidade e radiação;
- Trocas de calor pelos elementos da envolvente, por infiltração de ar e resultantes da ventilação mecânica e/ou natural.

De referir que este módulo de simulação assume que a temperatura exterior, velocidade e direção do vento são constantes, o funcionamento contínuo dos sistemas de aquecimento e a ausência de ganhos internos. A simulação considera adicionalmente um fator de segurança pré-estabelecido de 25%, mas cujo valor pode ser alterado pelo utilizador, como precaução para que os sistemas de ventilação e climatização possam fazer face a possíveis perdas de calor que podem não ser consideradas para efeito de simulação.

A representação das temperaturas e das trocas de calor é feita através de um gráfico de barras, sendo igualmente possível a apresentação dos dados em forma de tabela, como é possível visualizar na figura 2.19. As temperaturas são apresentadas em graus Celsius (°C) e as trocas de calor em quilowatt (kW), sendo que os valores positivos representam ganhos de calor e os valores negativos representam as perdas de calor para o exterior.

18,77  
EnergyPlus Output

### Temperature and Heat Loss

Licensed

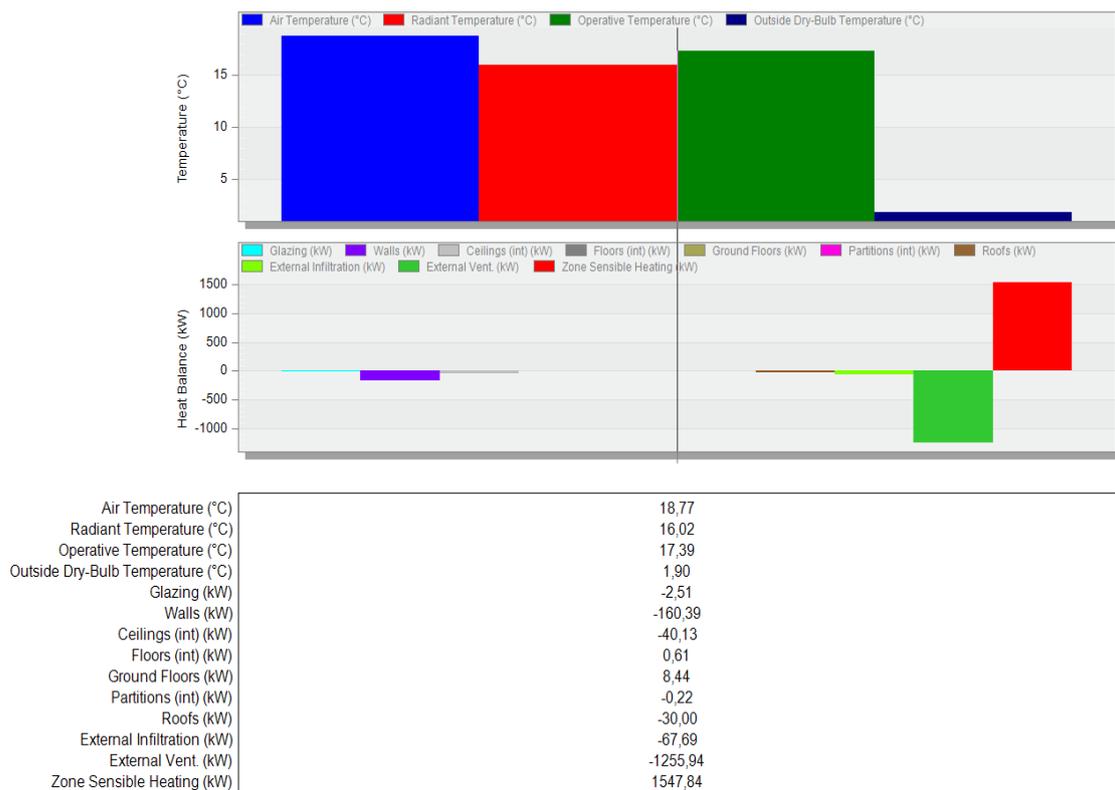


Figura 2.19 - Representação dos resultados da simulação no módulo *Heating Design*

#### 2.4.2.2 Cooling Design Simulation

Este módulo simula as piores condições de cargas térmicas possíveis na estação de arrefecimento para a localização em que o edifício está inserido, assumindo os seguintes pressupostos:

- Temperatura exterior constante;
- Ausência de vento;
- Transmissão de calor por convecção e condução entre zonas com diferentes temperaturas;
- Ganhos solares através da envolvente envidraçada e pela ventilação natural;
- Cargas térmicas resultantes da ocupação, iluminação e equipamentos.

A simulação considera adicionalmente um fator de segurança pré-estabelecido de 15%, mas cujo valor pode ser alterado pelo utilizador, como precaução para que os sistemas de ventilação e climatização possam ter capacidade de resposta a possíveis ganhos de calor que podem não ser consideradas para efeito de simulação.

Aos valores de temperatura e trocas térmicas com os elementos da envolvente apresentados no módulo *Heating Design*, são adicionados os seguintes parâmetros:

- Humidade relativa do ar;
- Taxa de renovação horária de ar resultante da ventilação mecânica, natural e infiltrações;

- Ganhos térmicos (interiores e exteriores);
- Potência de arrefecimento (sensível);

Uma vez que são considerados os ganhos internos, nomeadamente os solares, que variam ao longo do dia, os resultados gráficos são apresentados em gráficos de linhas, contendo a informação para totalidade de um dia de condições extremas, como visualizado na figura 2.20. É igualmente possível a apresentação dos dados em forma de tabela, ou a exportação destes para outro programa como por exemplo o Microsoft Excel.

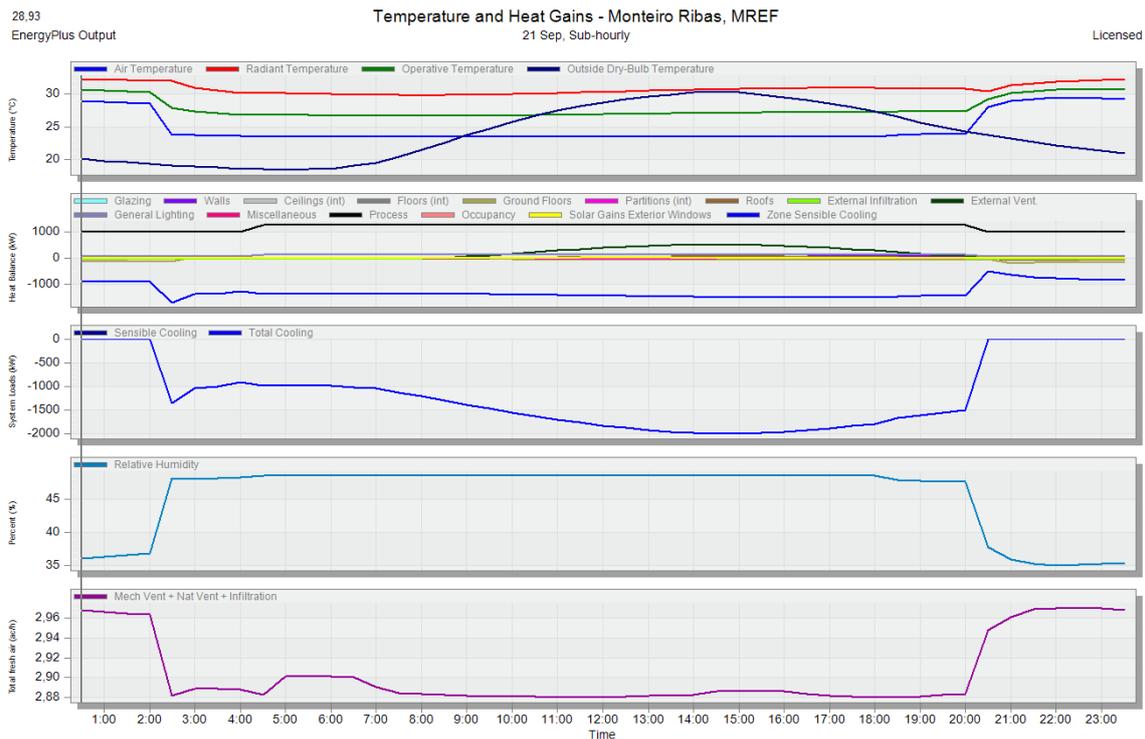


Figura 2.20 - Representação dos resultados da simulação no módulo *Cooling Design*

#### 2.4.2.3 Hourly weather data simulation

Este módulo de simulação permite simular por um intervalo de tempo personalizado as condições para a localização onde o edifício está inserido, podendo esse intervalo ser sub-horário (até um máximo 60 intervalos por hora, ou, seja intervalos de 1 minuto), horário, diário, mensal e anual. O programa disponibiliza adicionalmente os seguintes intervalos de tempo predefinidos:

- Meses com temperaturas mais altas – 1 de Abril a 30 de Setembro;
- Semana típica de Verão – 15 a 21 de Julho;
- Semana crítica de Verão – 5 a 11 de Agosto;
- Meses com temperaturas mais baixas – 1 de Outubro a 31 de Março;
- Semana crítica de Inverno – 22 a 28 de Janeiro;
- Semana típica de Inverno – 29 de Janeiro a 4 de Fevereiro.

Os resultados obtidos neste módulo de simulação são mais completos comparativamente aos módulos descritos anteriormente, sendo possível para os diferentes intervalos de tempo obter os seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar interior, temperatura média radiante, temperatura operativa e temperatura de bolbo seco;
- Trocas de calor pelos elementos da envolvente;
- Potências de arrefecimento e de aquecimento;
- Taxa de renovação horária de ar resultante da ventilação mecânica, natural e infiltrações;
- Consumo energético dos diferentes equipamentos.

Para as diferentes simulações, este módulo assume os seguintes parâmetros:

- Variação horária da temperatura, com base nos dados climáticos horários presentes na base de dados do programa para a localização escolhida;
- Transmissão de calor por convecção e condução entre zonas com diferentes temperaturas;
- Ação do vento variável, tendo por base os dados climáticos para a localização do edifício;
- Ganhos solares através da envolvente envidraçada e pela ventilação natural.
- Horários de funcionamentos estabelecidos para os diferentes sistemas de climatização, dispositivos de sombreamento, entre outros.

A representação em forma gráfica de alguns resultados deste módulo pode ser visualizada nas figuras 2.21 e 2.22.

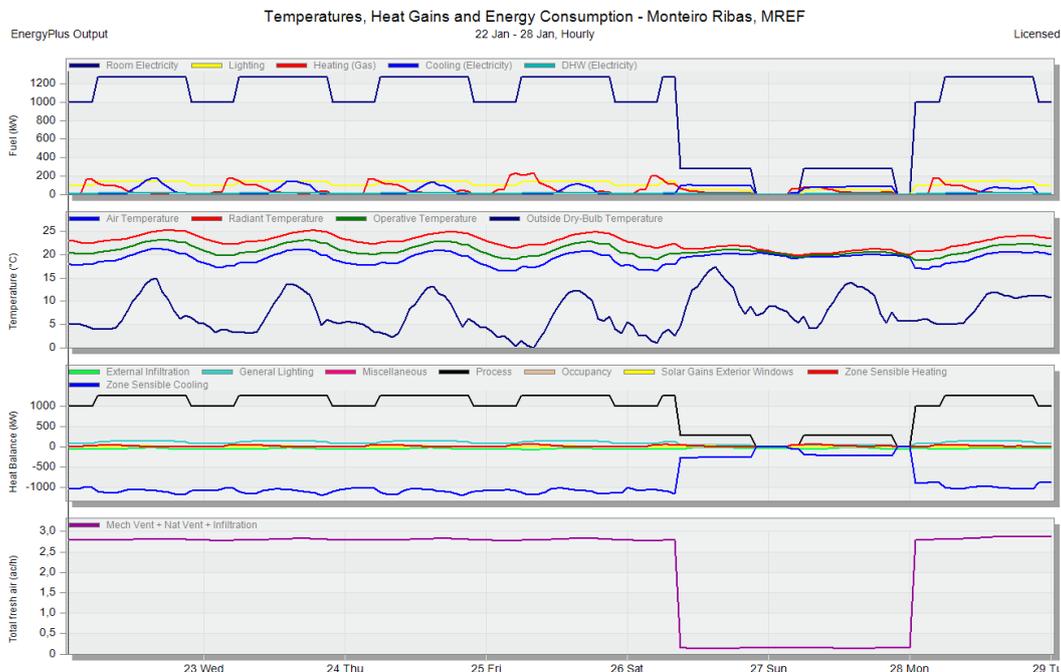


Figura 2.21 - Representação dos resultados da simulação, com um intervalo de tempo horário, para a semana crítica de Inverno

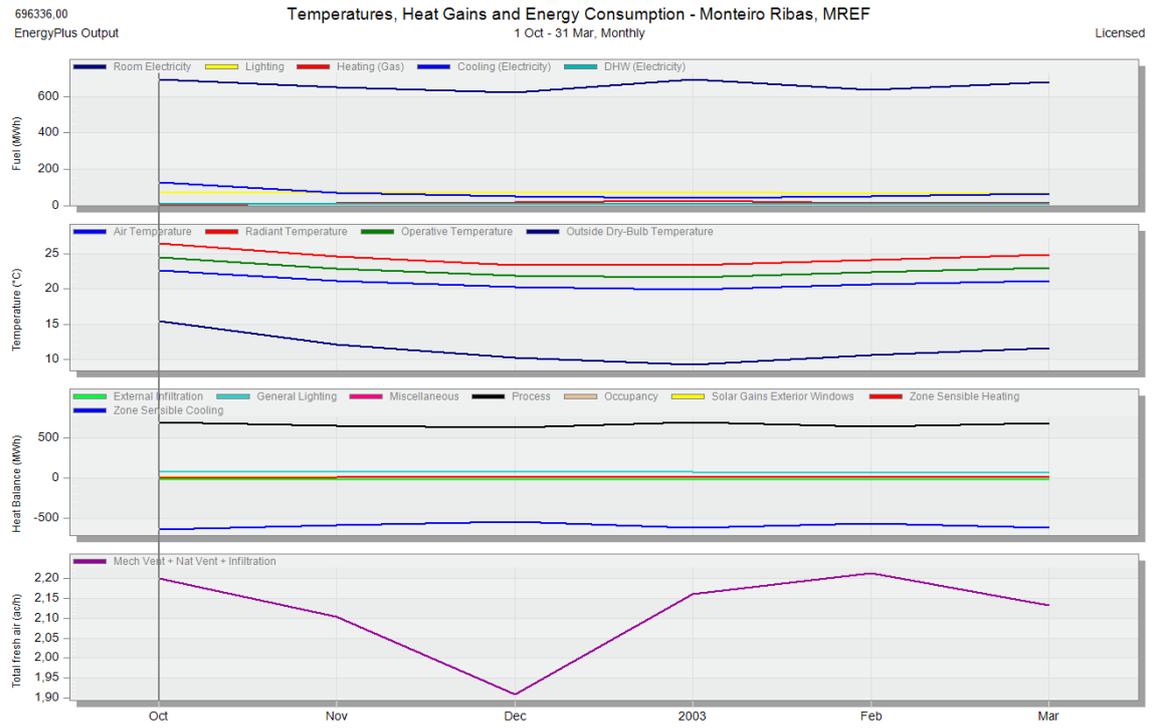


Figura 2.22 - Representação dos resultados da simulação, com um intervalo de tempo mensal, para os meses com temperaturas mais baixas

# DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caso em Estudo
- 3.2 Diagnóstico da Situação Atual
- 3.3 Desenvolvimento da Simulação Dinâmica
- 3.4 Apresentação e Discussão dos Resultados
- 3.5 Admissão Direta de Ar para as Máquinas de Impressão



## 3 DESENVOLVIMENTO

Ao longo deste capítulo apresentam-se os resultados obtidos neste estudo, descrevendo-se detalhadamente o desenvolvimento do trabalho que leva à obtenção desses resultados, tendo em conta as seguintes etapas: diagnóstico da situação atual, realizando o balanço de caudais de ar, desenvolvimento da simulação dinâmica e análise das necessidades de arrefecimento e aquecimento e, análise do impacto da captação direta de ar exterior para o processo de secagem das máquinas de impressão.

### 3.1 Caso em Estudo

#### 3.1.1 Descrição do edifício

O edifício analisado no presente estudo está integrado no complexo industrial do grupo Monteiro Ribas.

O levantamento das áreas foi realizado através do projeto da arquitetura disponibilizado (anexo 6.1) em suporte informático, com o auxílio do software AutoCAD, sendo de crucial importância para construção do modelo geométrico do edifício, no software de simulação DesignBuilder.

Resumidamente, o edifício em análise é constituído por uma zona de escritórios, sete pavilhões industriais e espaços adjacentes de armazenamento de materiais afins, e ainda uma área dedicada exclusivamente ao sistema de trigeriação. Este estudo analisará apenas os pavilhões 2, 3 e 4, no entanto para o desenvolvimento de uma simulação mais fidedigna e enquadrada com as condições reais de projeto é necessário a inclusão dos restantes espaços.

Na figura 3.1 é possível visualizar o esquema do edifício modelado com recurso ao software de simulação DesignBuilder.

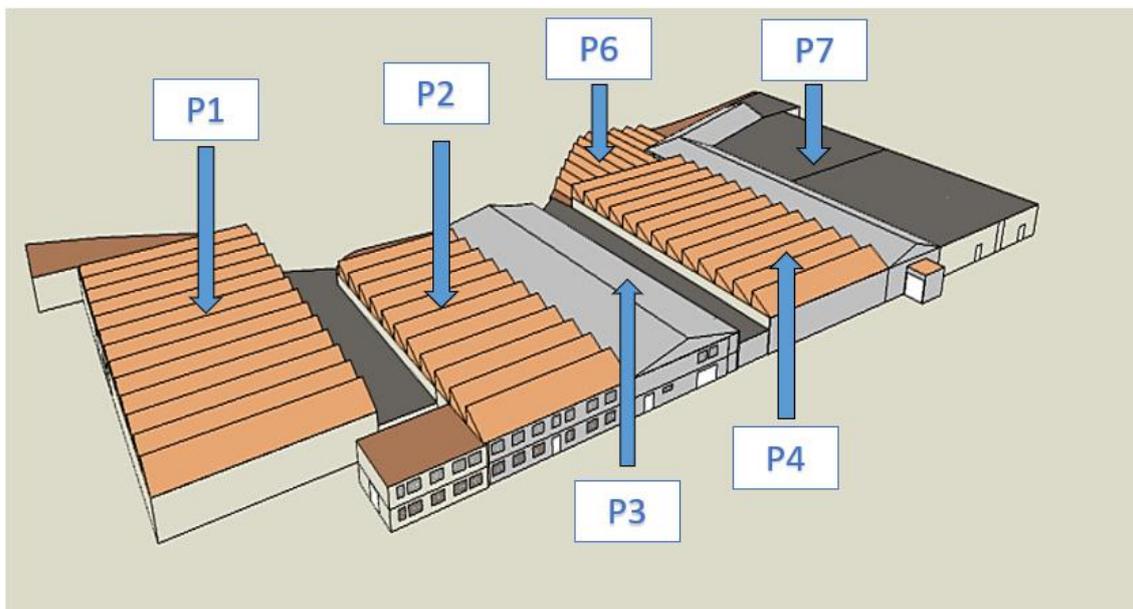


Figura 3.1 - Edifício industrial da MREF modelado no software DesignBuilder

A fachada principal, orientada a sul, é a única que apresenta uma área de envidraçados, localizada na zona de escritórios, logo como este espaço não é de crítica importância para este estudo, não será feita qualquer análise a estes envidraçados. A iluminação natural é garantida apenas no P1, P2 e P4 por placas de policarbonato translúcido orientadas a norte inserido na cobertura, sendo que a iluminação dos restantes pavilhões é garantida artificialmente.

O P2 está localizado adjacente ao P3, encontrando-se conectados entre si por uma porta (3 x 3.5 m), e separado do P1 por espaços de armazenamento de tintas e outros compostos, estando conectado a este apenas por um corredor, o qual contém duas portas de homem (2.5 x 1 m) e duas portas para transporte de matérias primas e afins (3 x 2.5 m). Adicionalmente, o P2 é contíguo ao espaço de escritórios destinados aos diferentes departamentos técnicos da MREF.

O P3 encontra-se separado do P4 por um espaço destinado a armazenagem, gabinetes e um laboratório de controlo de qualidade, sendo um corredor, que contém duas portas de homem (2.5 x 1 m) e duas portas para transporte de matérias primas e afins (3 x 2.5 m), o único ponto de conexão entre os dois pavilhões. O P4 está ainda conectado por um espaço aberto ao P6 (área total de abertura de 118 m<sup>2</sup>, aproximadamente) e ao P5 por uma porta de homem de (2.5 x 1 m) e uma porta para transporte de matérias primas e afins de (3 x 2.5) m.

De forma a minimizar a permeabilidade do ambiente dos diferentes pavilhões e a migração de ar dos espaços com elevada emissão de poluentes para os pavilhões adjacentes, as portas dos corredores e dos diferentes pontos de conexão entre os pavilhões estão grande parte do tempo fechadas.

Nas figuras 3.2, 3.3 e 3.4 é possível visualizar em maior detalhe a configuração do P2, P3 e P4, respetivamente.

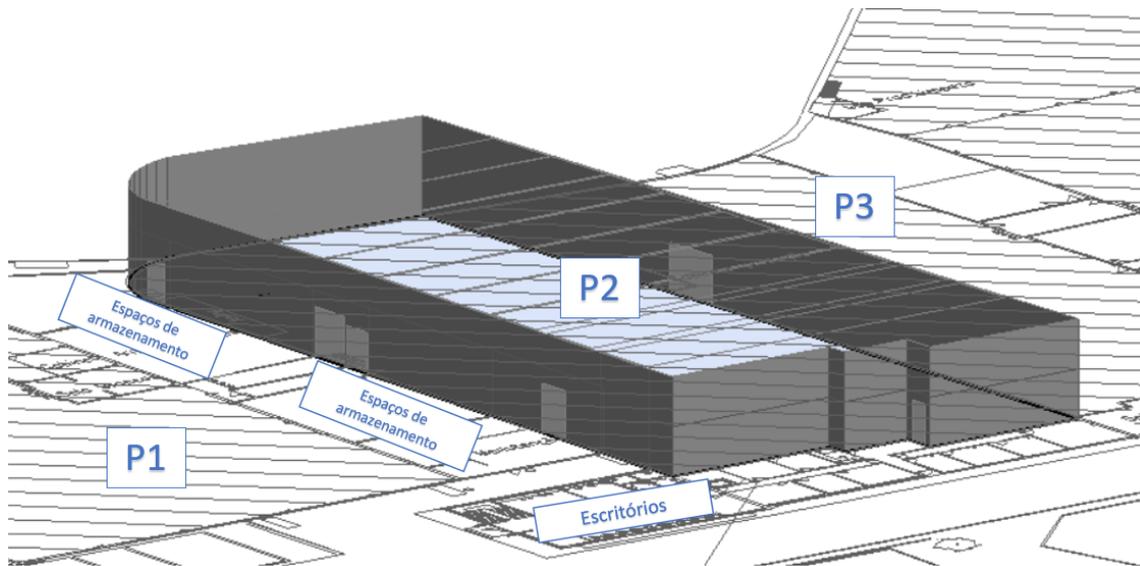


Figura 3.2 - Vista detalhada do P2 no software DesignBuilder

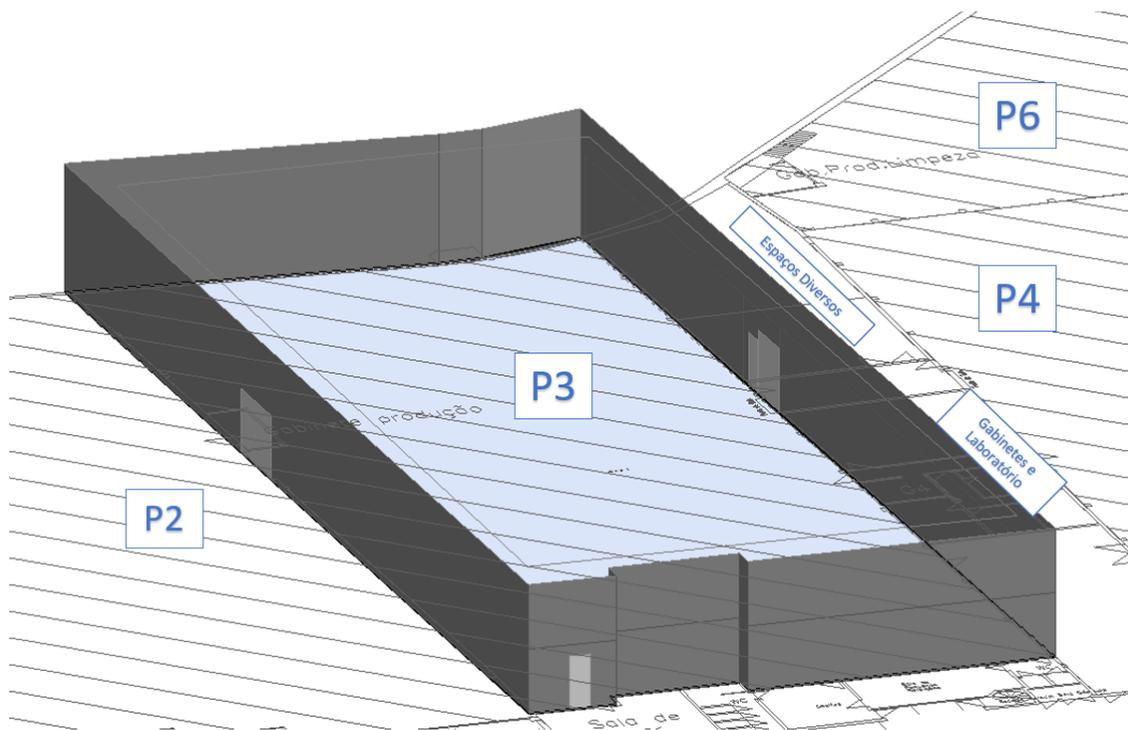


Figura 3.3 - Vista detalhada do P3 no software DesignBuilder

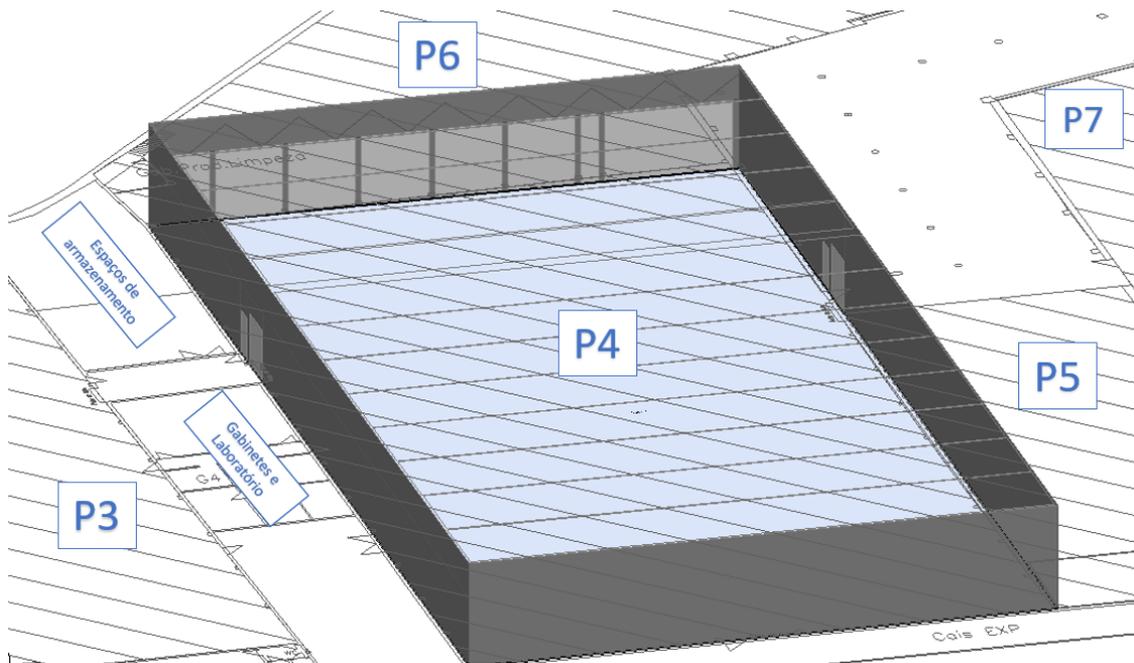


Figura 3.4 - Vista detalhada do P4 no software DesignBuilder

### 3.1.2 Unidade industrial da MREF

Nesta unidade fabril existe uma grande necessidade de tratamento e renovação de ar interior, uma vez que, são utilizados solventes (mistura de acetato de etilo, álcoois...) no processo de impressão e ocorrem elevados ganhos térmicos resultantes da atividade contínua das máquinas intervenientes no processo.

Como referido anteriormente, esta unidade foca-se na área da impressão de filmes e embalagens de plástico, usando para tal máquinas próprias para esse efeito, as quais estão distribuídas da seguinte forma pelos diversos pavilhões (tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Distribuição das máquinas de impressão de filme e embalagens de plástico pelos diferentes pavilhões

| Espaço | Máquinas                          |
|--------|-----------------------------------|
| P2     | Impressora de Rotogravura 1 (IR1) |
|        | Impressora de Rotogravura 2 (IR2) |
|        | Impressora de Flexografia 1 (IF1) |
|        | Impressora de Flexografia 2 (IF2) |
|        | Impressora de Flexografia 3 (IF3) |
| P3     | Impressora de Rotogravura 3 (IR3) |
|        | Impressora de Rotogravura 4 (IR4) |
|        | Complexadora 2 (C2)               |
|        | Complexadora 5 (C5)               |
|        | Complexadora 6 (C6)               |

| <b>Espaço</b> | <b>Máquinas</b>   |
|---------------|---|
| P4            | Impressora de Rotogravura 5 (IR5)<br>Impressora de Flexografia 4 (IF4)<br>Complexadora 3 (C3)<br>Complexadora 4 (C4)<br>Complexadora 7 (C7) |
| P6            | Máquinas de Corte   |
| P7            | Saqueiras   |

As diversas máquinas de impressão utilizam o ar interior da nave fabril para os processos de secagem do produto. Esse ar saturado resultante da secagem é extraído por tiragem induzida para sistemas de tratamento de efluente, nomeadamente um Sistema de Recuperação Solventes (SRU) e um Oxidador Térmico Regenerativo (RTO).

Cada máquina de impressão por flexografia e rotogravura tem instalada uma ou duas estufas por cada cabeça de impressão onde circula ar quente para secagem da tinta, o qual é aquecido com água quente e vapor provenientes das caldeiras de recuperação de vapor e das centrais de cogeração instaladas. As temperaturas no interior das estufas variam entre de 50°C e 70°C, aproximadamente. Todas estas máquinas fazem recirculação de uma parte do ar quente extraído das estufas, permitindo assim reduzir a quantidade de ar novo introduzido no circuito, ou seja, permitindo reduzir os consumos de energia no aquecimento do ar novo.

Relativamente às máquinas de complexagem, estas utilizam o vapor para fazer o aquecimento do ar usado no processo de colagem dos filmes, sendo que as temperaturas do ar nestas máquinas são na ordem dos 30-45°C.

As máquinas dos P6 e P7 são máquinas eminentemente de consumo elétrico sem ganhos térmicos significativos, nem utilização de solventes, não havendo qualquer tipo de extração de ar nessas máquinas e, o P1 e P5, são espaços destinados apenas ao armazenamento de matérias e produtos, pelo que as necessidades de ventilação e climatização nestas áreas são significativamente inferiores. Sendo assim as áreas críticas em que incidirá com maior foco este estudo são o P2, P3 e P4.

A remoção de potenciais contaminantes gasosos presentes no ar, tais como os compostos orgânicos voláteis (COV's) não pode ser obtida através de filtragem, sendo procedida a diluição das concentrações destes, através da insuflação de ar novo e posterior extração pelos sistemas mencionados anteriormente, procedendo à renovação do ar interior.

No entanto, devido à variação da extração de ar pelas máquinas de impressão consoante o nível de intensidade produtiva, verificou-se em diferentes estudos realizados por entidades externas, que em períodos de maior produção poderá existir um défice significativo de ar, o qual não é totalmente eliminado pelo caudal de ar tratado insuflado

pelo sistema de unidades de tratamento de ar nesses espaços, sistema este que pode ser visualizado, na sua generalidade, no anexo 6.1.

### 3.1.3 Sistema de trigeriação da Monteiro Ribas

Devido à importância fundamental que a cogeração tem para a funcionamento da unidade produtiva da MREF e do seu sistema de climatização e ventilação, convém fazer um enquadramento mais detalhado do funcionamento do sistema e distribuição de energia térmica, analisando para tal a instalação em estudo, esquema da qual pode ser visualizado no anexo 6.2.

A Monteiro Ribas Indústrias (MRI) tem atualmente na sua unidade de cogeração dois motores térmicos. Um motor de 4.4 MW, apresentado na figura 3.5, cuja energia elétrica produzida é vendida na sua totalidade à rede, funcionando apenas nos dias úteis das 7h às 24h (horas de ponta e horas de cheia), visto ser o horário com maior rentabilidade económica e, um motor de 1.6 MW que gera energia elétrica para autoconsumo, no mesmo horário de funcionamento referido anteriormente.



Figura 3.5 - Motor de 4.4 MW da unidade de trigeriação da MRI

A queima de gás no motor térmico gera trabalho no veio que sai do motor, o qual é convertido em energia elétrica por um gerador associado. A eletricidade produzida é utilizada como força motriz em vários equipamentos auxiliares ao processo produtivo, climatização, iluminação e compressão de ar.

Paralelamente, estão instaladas duas caldeiras de recuperação de calor do tipo aquatubular (figura 3.6) e outra do tipo gás-tubular, nas quais é extraída a energia térmica dos gases de escape do motor, transferindo essa energia à água de alimentação da caldeira, aquecendo-a e transformando-a em vapor. A tipologia aquatubular permite uma menor perda de carga ao escoamento dos gases de escape do motor, permitindo reduzir os efeitos de retorno de escoamento.

É possível regular o caudal de gases de escape enviado para as caldeiras de recuperação através de uma válvula de três vias, a qual permite o funcionamento contínuo do motor,

possibilitando direcionar os fumos para a chaminé parcialmente, ou na sua totalidade, no caso de ser necessário ajustar, num dado instante, a geração de vapor necessário nas diferentes atividades do processo produtivo.

A alimentação de água às caldeiras de recuperação é feita a partir de um desgaseificador térmico, o qual está a funcionar a uma temperatura na ordem dos 105°C. A água que sai do desgaseificador é sujeita, adicionalmente, a um tratamento de desgaseificação química através de um conjunto de bombas doseadoras que fazem a injeção de produtos químicos na tubagem de alimentação, de forma a reduzir a oxidação dos tubos e garantir o menor grau de formação de impurezas.



Figura 3.6 - Caldeira de recuperação de calor instalada no sistema de trigeriação da MRI

Depois de atingir a temperatura e pressão requeridas, a água é direcionada para um barrilete onde é feita a separação do vapor saturado. O vapor é utilizado no aquecimento de água e de ar de algumas máquinas produtivas, nas colunas de destilação de solvente da unidade SRU, nunca ocorrendo o consumo direto do vapor.

O vapor dos circuitos de arrefecimento dos motores é recuperado sob a forma de água quente, a qual é armazenada num depósito. Essa água quente é posteriormente utilizada para aquecimento de ar nas máquinas de impressão e para aquecimento de ar nas UTA's. O vapor consumido na fábrica é alimentado a partir da central térmica da MRI e das 2 caldeiras de recuperação a uma pressão de 8.5 bar.

Tanques reservatórios de água quente e fria, estão instalados, isoladamente, no exterior, de forma a minimizar possíveis perdas térmicas, e a garantir a disponibilidade de água à temperatura desejada, consoante a necessidade e intensidade produtivas. Na figura 3.7 é apresentado um dos exemplares instalados, nomeadamente o tanque de reservatório de água fria, o qual apresenta uma capacidade de 90 m<sup>3</sup>.



Figura 3.7 - Tanque reservatório de água fria instalado na MRI

Existe também, um tanque de condensados, que recebe os condensados que retornam da produção, gerados pela utilização do vapor produzido nos vários equipamentos do processo produtivo. Os condensados resultantes são novamente reencaminhados para a central térmica.

Todas as trocas térmicas entre correntes de fluidos são efetuadas por permutadores de calor distribuídos por diversos pontos do sistema. Os permutadores são na sua maioria permutadores de placas, os quais são constituídos por placas finas que favorecem a permuta de calor entre dois fluidos a temperaturas distintas. Este tipo de permutador presente na instalação, permite a troca de calor entre a água de arrefecimento do motor e o tanque de água quente.

É a partir do depósito de água quente instalado na central de cogeração da MRI que é feita a alimentação de água quente a 85-87°C às máquinas de impressão e às unidades de tratamento de ar da MREF.

Na unidade fabril da MREF estão instalados 3 permutadores de calor água/água que fazem o aquecimento da água utilizada nas máquinas de impressão com água quente proveniente do depósito. A água depois de aquecida nestes permutadores pode ainda passar por outros permutadores de calor vapor/água para um aquecimento final antes de ser enviada para as máquinas de impressão.

Associada às duas unidades de cogeração da MRI estão instalados 4 grupos produtores de água refrigerada, vulgarmente designados por chillers, mais especificamente 2 chillers de absorção, de 1.1 MW e 0.568 MW, e dois chillers elétricos de 0.6 MW. Associada a cada chiller de absorção está uma torre de arrefecimento para arrefecimento adicional de água proveniente desses chillers e do fluido de trabalho destes.

Mais detalhadamente, o funcionamento dos chillers de absorção consiste na troca de calor entre quatro circuitos independentes, de água fria, de água quente proveniente do tanque de acumulação de água quente, de água da torre de arrefecimento e um circuito interno onde o fluido de trabalho é uma mistura de brometo de lítio e água.

Na figura 3.8 é apresentado o esquema de instalação do chiller de 1.1 MW instalado.

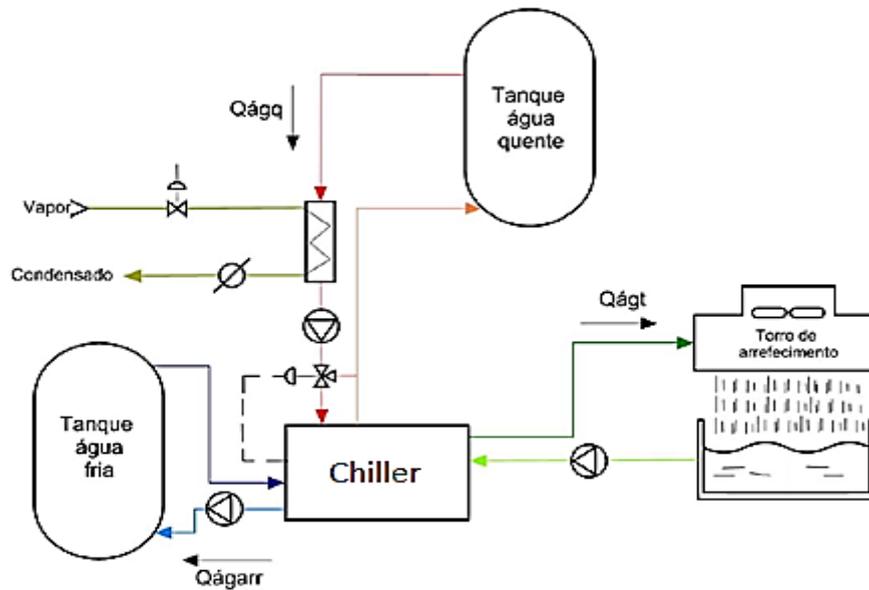


Figura 3.8 - Esquema de instalação do chiller de 1.1 MW da MRI

A água refrigerada nos circuitos dos chillers da instalação é armazenada no depósito de água refrigerada instalado na central de cogeração a 7°C, sendo posteriormente transportada para as unidades de tratamento de ar e máquinas de impressão da MREF.

## 3.2 Diagnóstico da Situação Atual

Neste subcapítulo é efetuada uma descrição das UTA's e das suas características e, subsequentemente, é realizado um balanço das necessidades de insuflação e extração de ar dos diferentes espaços em análise.

### 3.2.1 Unidades de Tratamento de Ar (UTA's)

As unidades de tratamento de ar instaladas na unidade industrial em estudo são na sua maioria unidades VAC, com insuflação de 100% de ar novo (UTAN), sendo todas do tipo linear e inseridas num sistema centralizado "tudo ar".

Na figura 3.9 é possível visualizar uma das UTAN's instaladas na unidade fabril da MREF.



Figura 3.9 - Exemplo de uma unidade exterior de tratamento de ar da MREF

A rede de UTAN's procede à filtragem de poeiras, e ao aquecimento e arrefecimento de ar, através de água quente com origem nos circuitos de arrefecimento do motor de cogeração e água fria proveniente dos chillers de absorção, não sendo realizado qualquer controlo de humidade dos espaços climatizados ou recuperação de calor. Resumidamente, estes equipamentos são constituídos por um ventilador, dois filtros e duas baterias, uma de aquecimento e outra de arrefecimento, tendo apenas uma via de insuflação, realizando a captação do ar exterior e procedendo posteriormente ao seu tratamento para insuflação de ar 100% novo no espaço a tratar.

As unidades não procedem a qualquer tipo de extração de ar dos espaços a climatizar, uma vez que, este é extraído diretamente do espaço climatizado pelas diferentes máquinas intervenientes no processo produtivo, como referido anteriormente.

A rede de UTAN's é constituída por 11 unidades, sendo apresentada na tabela 3.2 a afetação destas unidades aos diversos pavilhões.

Tabela 3.2 - Afetação das UTA's aos diversos pavilhões da unidade fabril

| <b>Espaço</b> | <b>UTAN</b> | <b>Caudal de Insuflação (m<sup>3</sup>/h)</b> |
|---------------|-------------|---|
| P1            | 4           | 20 000  |
| P2            | 1, 2, 3     |   |
| P3            | 5, 7        |   |
| P4            | 6, 8, 10    |   |
| P6            | 9           |   |
| P7            | 11          |   |

As UTAN's 1 a 9 são modelos VAC, Airtech 300 da CIAT, e as unidades 10 e 11 são modelos VAV, UTA 50D Plus 50 da EVAC, podendo as *datasheets* dos diferentes modelos ser visualizadas no anexo 6.3.

Na tabela 3.3 é feita uma sumarização das principais características dos 2 modelos instalados de UTAN e dos seus componentes.

Tabela 3.3 - Características das UTAN's

| <b>Modelo</b>   | <b>CIAT Airtech 300</b> | <b>EVAC UTA 50D Plus 50</b> |
|---|-------------------------|-----------------------------|
| Localização /Montagem                                   | Exterior                | Interior                    |
| Tipo  | Horizontal              | Horizontal                  |
| Ano fabrico / instalação                                | 2012/2013               | 2019                        |
| Caudal Insuflação (m <sup>3</sup> /h)                   | 20 000                  | 20 000                      |
| Caudal Extração (m <sup>3</sup> /h)                     | 0                       | 0                           |
| Filtros Plano /Saco                                     | G4/F7                   | G4/G7                       |
| Recuperação Calor                                       | Não                     | Não                         |
| Humidificação   | Não                     | Não                         |
| <b>Bateria Aquecimento</b>                              |                         |                             |
| Entrada – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %) | Sem Informação          | 0.8/90                      |
| Saída – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %)   | Sem Informação          | 30.3/13                     |
| Temp. água in/out (°C)                                  | 80/60                   | 80/60                       |
| Caudal Fluido Primário (l/h)                            | 7 310                   | 9 346                       |
| Potência Útil (kW)                                      | 170                     | 212.75                      |
| <b>Bateria Arrefecimento</b>                            |                         |                             |
| Entrada – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %) | Sem Informação          | 35/35                       |
| Saída – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %)   | Sem Informação          | 12.6/9.3                    |
| Temp. água in/out (°C)                                  | 7/12                    | 7/12                        |
| Caudal Fluido Primário (l/h)                            | 36 980                  | 36 100                      |
| Potência Útil (kW)                                      | 215                     | 209.87                      |
| <b>Motor Elétrico Insuflação</b>                        |                         |                             |
| Quantidade  | 1                       | 2                           |
| Potência (kW)   | 7.5                     | 3.5                         |
| Eficiência  | Sem Informação          | C                           |
| Tensão (V)  | 400                     | 400                         |
| <b>Dimensões Unidade</b>                                |                         |                             |
| Comp./Largura/Alt. (mm)                                 | 2980x2172x1666          | 2960x2382x1100              |
| Peso (kg)   | 1 205                   | 850                         |

Constata-se, analisando esta tabela, que ambos os modelos de UTAN apresentam na sua generalidade características técnicas semelhantes, nomeadamente, em termos de caudal de insuflação, a inexistência de módulos de extração de ar, recuperação de calor

e controlo de humidade. Contudo verifica-se que, embora em termos de potência útil de arrefecimento os dois modelos apresentam capacidades muito próximas, ao nível da potência útil de aquecimento, o modelo da EVAC apresenta uma maior potência.

Associadas a estas unidades estão instaladas condutas e mangas têxteis de circulação de ar, as quais fazem distribuição final do ar aquecido ou arrefecido proveniente das UTAN's, pelas áreas úteis dos diferentes pavilhões da MREF (figura 3.10).



Figura 3.10 - Condutas e mangas têxteis da instalação

### 3.2.2 Balanço dos caudais de ar

O caudal volumétrico é a quantidade de ar em volume que atravessa uma dada secção por unidade de tempo. Os valores de caudal volumétrico de extração em seguida apresentados foram fornecidos pela MREF e são resultado de medições efetuadas no âmbito de uma auditoria realizada por uma entidade externa, no qual foram analisadas as condições interiores de ar na unidade fabril.

Como já foi mencionado, os espaços em que incidirá este estudo são o P2, P3 e P4, uma vez que nestes se encontram as máquinas de impressão cuja extração do ar interior da nave fabril causa desequilíbrios significativos.

Relativamente aos caudais de insuflação, como referido anteriormente, as UTAN's instaladas nestes espaços são na sua maioria unidades de caudal constante que debitam 20000 m<sup>3</sup>/h. Apenas a UTAN 10, afeta ao P4, é uma unidade de caudal variável, no entanto, devido à grande necessidade de tratamento e renovação de ar para controlo da qualidade de ar interior e atenuação dos elevados ganhos térmicos, esta nos períodos de atividade produtiva por falta de monitorização contínua das necessidades de ar opera tipicamente no regime de funcionamento máximo, pelo que foi considerado que debita continuamente o caudal de insuflação máximo de 20000 m<sup>3</sup>/h.

Para esta análise foi desprezado o caudal de ar mínimo necessário à ocupação, uma vez que este, comparativamente às necessidades das diferentes máquinas de impressão, em termos proporcionais, tem um impacto muito reduzido no balanço global dos espaços em análise.

Considerando que o processo produtivo das máquinas de impressão é caracterizado por uma grande aleatoriedade dos tempos de set-up e preparação das diferentes gamas do produto a produzir, foi assumido adicionalmente, um fator de simultaneidade, que consiste num coeficiente estimativo do nível de atividade simultânea das diferentes máquinas de impressão, a qual com base em análises internas dos níveis de atividade produtiva por parte da MREF não ultrapassa os 60%, podendo pontualmente ser inferior. Por motivos de simplicidade de análise, será assumido neste estudo o fator de simultaneidade de 0.6, sendo desprezados os períodos de menor atividade simultânea.

Na tabela 3.4, 3.5 e 3.6 estão presentes os balanços de caudais de ar do P2, P3 e P4, respetivamente.

Tabela 3.4 - Balanço de caudais de ar do Pavilhão 2

| <b>Pavilhão 2</b>                             |               |                                 |               |            |            |
|---|---------------|---------------------------------|---------------|------------|------------|
| <b>Extração</b>                               | <b>IF1</b>    | <b>IF2</b>                      | <b>IF3</b>    | <b>IR1</b> | <b>IR2</b> |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 12 740        | 12 676                          | 9 367         | 32 306     | 22 000     |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 89 089        |                                 |               |            |            |
| Total c/ fator de simult. (m <sup>3</sup> /h) | 53 453        | Nº de renovações por hora (rph) |               |            | 5.73       |
| <b>Insuflação</b>                             | <b>UTAN 1</b> | <b>UTAN 2</b>                   | <b>UTAN 3</b> |            |            |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 20 000        | 20 000                          | 20 000        |            |            |
| TOTAL (m <sup>3</sup> /h)                     | 60 000        | Nº de renovações por hora (rph) |               |            | 6.43       |
| <b>Balanço (m<sup>3</sup>/h)</b>              | <b>6 547</b>  |                                 |               |            |            |

Tabela 3.5 - Balanço de caudais de ar do Pavilhão 3

| <b>Pavilhão 3</b>                             |                |                                 |           |            |            |
|---|----------------|---------------------------------|-----------|------------|------------|
| <b>Extração</b>                               | <b>C2</b>      | <b>C5</b>                       | <b>C6</b> | <b>IR3</b> | <b>IR4</b> |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 0              | 16 564                          | 14 314    | 30 836     | 29 242     |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 90 956         |                                 |           |            |            |
| Total c/ fator de simult. (m <sup>3</sup> /h) | 54 574         | Nº de renovações por hora (rph) |           |            | 6.61       |
| <b>Insuflação</b>                             | <b>UTAN 5</b>  | <b>UTAN 7</b>                   |           |            |            |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 20 000         | 20 000                          |           |            |            |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 40 000         | Nº de renovações por hora (rph) |           |            | 4.84       |
| <b>Balanço (m<sup>3</sup>/h)</b>              | <b>-14 573</b> |                                 |           |            |            |

Tabela 3.6 - Balanço de caudais de ar do Pavilhão 4

| <b>Pavilhão 4</b>                             |               |                                 |                |           |           |
|---|---------------|---------------------------------|----------------|-----------|-----------|
| <b>Extração</b>                               | <b>IR5</b>    | <b>IF4</b>                      | <b>C7</b>      | <b>C4</b> | <b>C3</b> |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 37 407        | 27 004                          | 8 697          | 2 000     | 2 000     |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 77 108        |                                 |                |           |           |
| Total c/ fator de simult. (m <sup>3</sup> /h) | 46 264        | Nº de renovações por hora (rph) |                |           | 3.55      |
| <b>Insuflação</b>                             | <b>UTAN 6</b> | <b>UTAN 8</b>                   | <b>UTAN 10</b> |           |           |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 20 000        | 20 000                          | 20 000         |           |           |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 60 000        | Nº de renovações por hora (rph) |                |           | 4.60      |
| <b>Balanço (m<sup>3</sup>/h)</b>              | <b>13 736</b> |                                 |                |           |           |

A partir da análise dos resultados obtidos, é possível observar que, apenas se verifica um défice de ar no P3, de 14 573 m<sup>3</sup>/h, confirmando-se assim que a insuflação de ar pelas UTAN's neste espaço não satisfaz as necessidades de caudal de ar das diferentes máquinas de impressão, induzindo um ambiente em subpressão excessiva, considerando que a norma EN 13779 (2007) estabelece um limite de desequilíbrio, em depressão, aceitável de 15%, para controlo de pressão e do fluxo de migração de ar entre as diferentes áreas e o exterior de um edifício.

Relativamente aos restantes espaços em análise, o sistema de insuflação de ar tem capacidade de resposta para as necessidades de extração das máquinas de impressão, apresentando um excedente de ar de 6 547 m<sup>3</sup>/h no P2 e 13 736 m<sup>3</sup>/h no P4, criando níveis de subpressão excessivos e não desejáveis, uma vez que deve-se impedir a migração de ar destes espaços com produção de contaminantes para os restantes espaços adjacentes.

Tomando como exemplo o caso do P4, estando este conectado por um espaço aberto ao P6 (área total de abertura de 118 m<sup>2</sup>, aproximadamente), como referido anteriormente e, considerando que o P6 tem um volume substancialmente inferior ao P4, apresenta uma UTAN afeta exclusivamente a este e não tem grandes necessidades de ar, apenas para satisfazer as necessidades dos diferentes trabalhadores inseridos neste espaço (9 trabalhadores), o significativo excedente de ar obtido no P4 e resultante sobrepressão poderá induzir uma migração de ar para o P6, pelo é necessário garantir que o P4 está em subpressão relativamente ao P6.

Na figura 3.11 é apresentado um esquema resumo das condições atuais de insuflação e extração dos três diferentes espaços em análise, sendo realizada na tabela 3.7 uma síntese dos resultados obtidos.

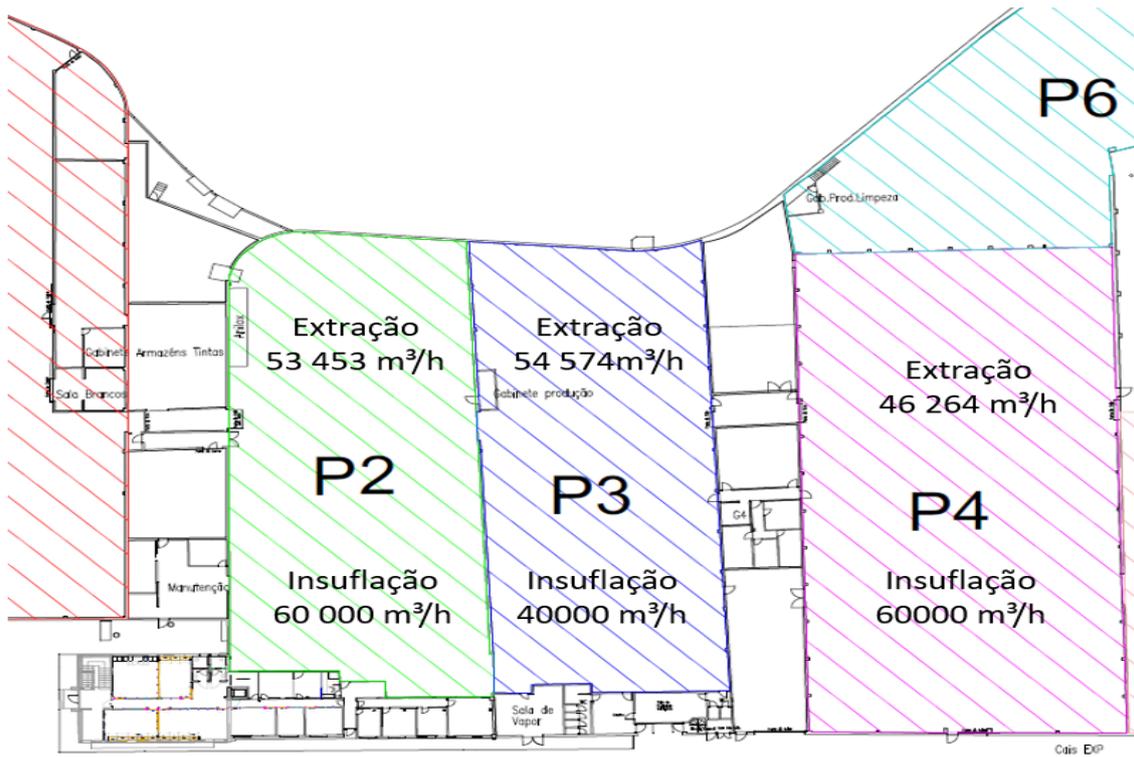


Figura 3.11 - Esquema das condições atuais de insuflação e extração dos diferentes espaços em análise

Tabela 3.7 - Síntese dos balanços de caudais de ar para os espaços analisados

| Pavilhão     | UTAN's   | Insuflação        | Extração          | dif.              | fator<br>simult. | Extração          | dif.              |
|--------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|              |          | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h |                  | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h |
| P2           | 1, 2, 3  | 60 000            | 89 089            | -29 089           | 0.6              | 53 453            | 6 547             |
| P3           | 5, 7     | 40 000            | 90 956            | -50 956           | 0.6              | 54 574            | -14 573           |
| P4           | 6, 8, 10 | 60 000            | 77 108            | -17 108           | 0.6              | 46 264            | 13 736            |
| <b>TOTAL</b> |          | <b>160 000</b>    | <b>257 153</b>    | <b>-97 153</b>    |                  | <b>154 290</b>    | <b>5710</b>       |

Face aos resultados obtidos, constata-se a necessidade de reduzir os desequilíbrios observados e simultaneamente criar nestes três espaços uma ligeira subpressão que limite a migração do ar contaminado desses espaços para as restantes divisões do edifício.

Analisando primeiramente o P2, que apresenta um excedente de ar de 6 547 m<sup>3</sup>/h, este excedente poderá ser reduzido através de uma UTA com recirculação, a qual possuiria um módulo de mistura e respetivo sistema de controlo para modelação das diferentes percentagens de ar novo e ar de recirculação, sendo que o retorno do ar à UTA seria feito por uma conduta própria. O ponto de funcionamento estabelecido para esta unidade de tratamento de ar resultará na admissão de um caudal de ar constituído por 13 000 m<sup>3</sup>/h (65.0%) de ar novo e 7 000 m<sup>3</sup>/h (35.0%) de ar de recirculação.

Considerando as características das unidades atualmente instaladas, a capacitação de qualquer uma destas com recirculação não seria exequível, logo será necessário

proceder à substituição de uma das unidades instaladas, sendo que a substituição da UTAN 1, considerando a sua localização, seria de mais fácil execução. O esquema de funcionamento desta nova unidade, a qual será denominada UTA A, pode ser visualizado na figura 3.12, sendo assumido ainda para efeitos de análise que as características deste novo modelo são idênticas às das unidades atualmente instaladas.

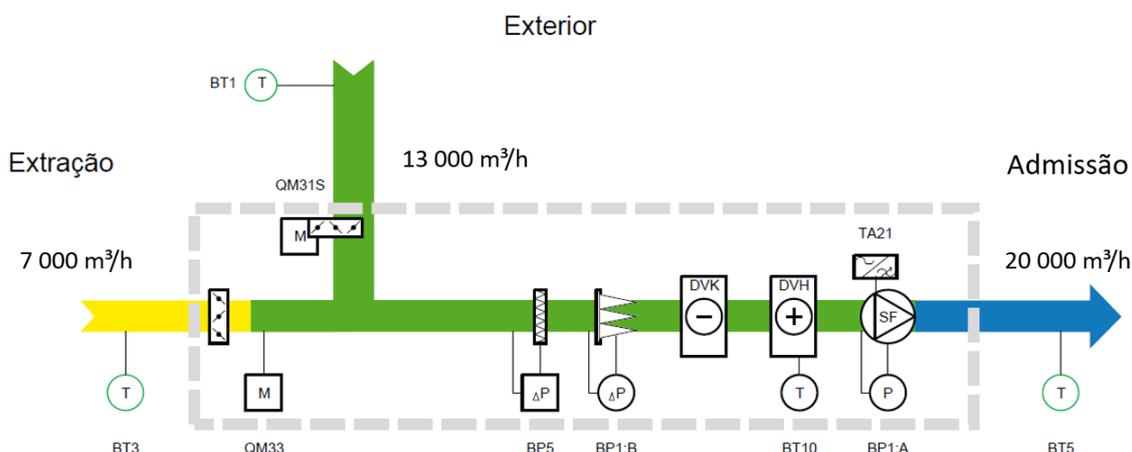


Figura 3.12 - Esquema de funcionamento da UTA A

Na tabela 3.8 é apresentado o novo balanço de caudais de ar com a aplicação da solução proposta para o P2, resultando o novo balanço de caudais de ar num défice de ar de 453 m<sup>3</sup>/h, obtendo-se a subpressão pretendida.

Tabela 3.8 - Novo balanço de caudais de ar do Pavilhão 2

| Pavilhão 2                                    |             |                                     |                                  |        |        |
|---|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------|--------|
| Extração                                      | IF1         | IF2                                 | IF3                              | IR1    | IR2    |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 12 740      | 12 676                              | 9 367                            | 32 306 | 22 000 |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 89 089      |                                     |                                  |        |        |
| Total c/ fator de simult. (m <sup>3</sup> /h) | 53 453      | Nº de recirculações por hora (rcph) |                                  | 5.73   |        |
| Insuflação                                    | UTAN 2      | UTAN 3                              | UTA A                            |        |        |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 20 000      | 20 000                              | 13 000 (+ 7 000 em recirculação) |        |        |
| TOTAL (m <sup>3</sup> /h)                     | 53 000      | Nº de recirculações por hora (rcph) |                                  | 6.43   |        |
| <b>Balanço (m<sup>3</sup>/h)</b>              | <b>-453</b> |                                     |                                  |        |        |

Relativamente ao P3, este apresenta um défice de ar 14 573 m<sup>3</sup>/h, o qual poderá ser reduzido através da insuflação de uma maior quantidade de ar neste espaço, o que pressupõe a afetação de uma unidade de tratamento de ar adicional. Considerando que o nível expectável de ganhos internos decorrentes da atividade das máquinas de impressão neste espaço é semelhante ao nível verificado no P2, no sentido de realizar uma análise mais conservadora, a solução que mais se adequa a este espaço, passará pela instalação de um modelo idêntico ao proposto para o P2, estabelecendo como ponto de funcionamento para essa unidade, a admissão de um caudal de ar constituído

por 14 000 m<sup>3</sup>/h (70.0%) de ar novo e 6 000 m<sup>3</sup>/h (30.0%) de ar de recirculação. O esquema de funcionamento desta nova unidade, a qual será denominada UTA B, pode ser visualizado na figura 3.13.

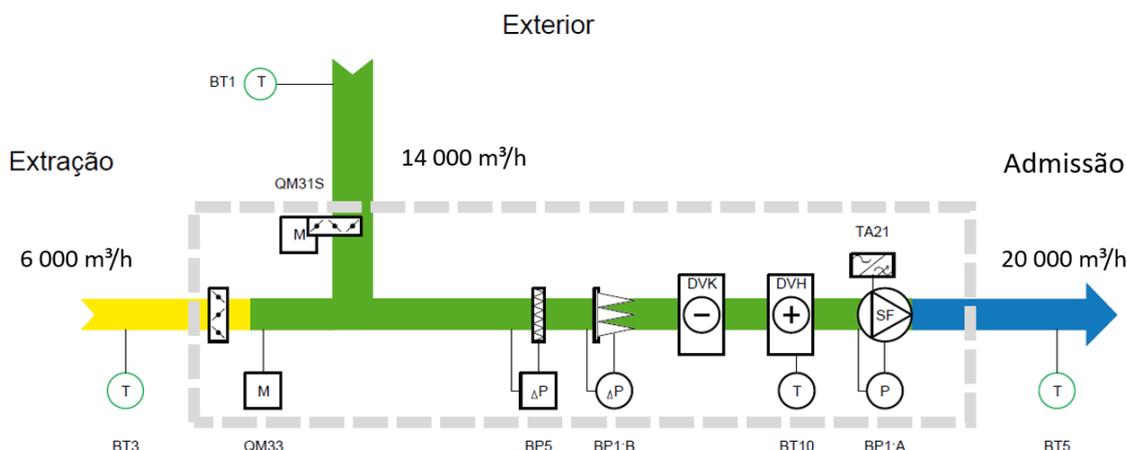


Figura 3.13 - Esquema de funcionamento da UTA B

Na tabela 3.9 é apresentado o novo balanço de caudais de ar com a aplicação da solução proposta para o P3, resultando o novo balanço de caudais de ar num défice de ar de 574 m<sup>3</sup>/h, obtendo-se a ligeira subpressão pretendida.

Tabela 3.9 - Novo balanço de caudais de ar do Pavilhão 3

| Pavilhão 3                                    |             |                                     |                                  |        |        |
|---|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------|--------|
| Extração                                      | C2          | C5                                  | C6                               | IR3    | IR4    |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 0           | 16 564                              | 14 314                           | 30 836 | 29 242 |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 90 956      |                                     |                                  |        |        |
| Total c/ fator de simult. (m <sup>3</sup> /h) | 54 574      | Nº de recirculações por hora (rcph) |                                  | 6.61   |        |
| Insuflação                                    | UTAN 5      | UTAN 7                              | UTA B                            |        |        |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 20 000      | 20 000                              | 14 000 (+ 6 000 em recirculação) |        |        |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 54 000      | Nº de recirculações por hora (rcph) |                                  | 7.26   |        |
| <b>Balanço (m<sup>3</sup>/h)</b>              | <b>-574</b> |                                     |                                  |        |        |

No caso do P4, é preciso ter em consideração a influência da migração de ar do P6 para o P4, resultante da abertura permanente sem possibilidade de fecho entre estes espaços, podendo ser assumido para efeitos de análise que a sobrepressão no P6 é garantida por 10% do caudal de ar insuflado neste espaço, valor dentro do limite de desequilíbrio de 15% estabelecido pela EN 13779 (2007), resultando numa migração de 18 000 m<sup>3</sup>/h de ar para o P4, pelo que é necessário garantir neste espaço um défice de ar na ordem desse valor.

Considerando as necessidades de extração de ar das máquinas, a proposta de solução para este espaço consistirá na remoção das UTAN's 6 e 8 e, na instalação de um modelo

de UTA semelhante ao proposto para as restantes naves fabris, o qual terá como ponto de funcionamento, a admissão de um caudal de ar constituído por 8 264 m<sup>3</sup>/h (41.3%) de ar novo e 11 736 m<sup>3</sup>/h (58.7%) de ar de recirculação. O esquema de funcionamento desta nova unidade, a qual será denominada UTA C, pode ser visualizado na figura 3.14.

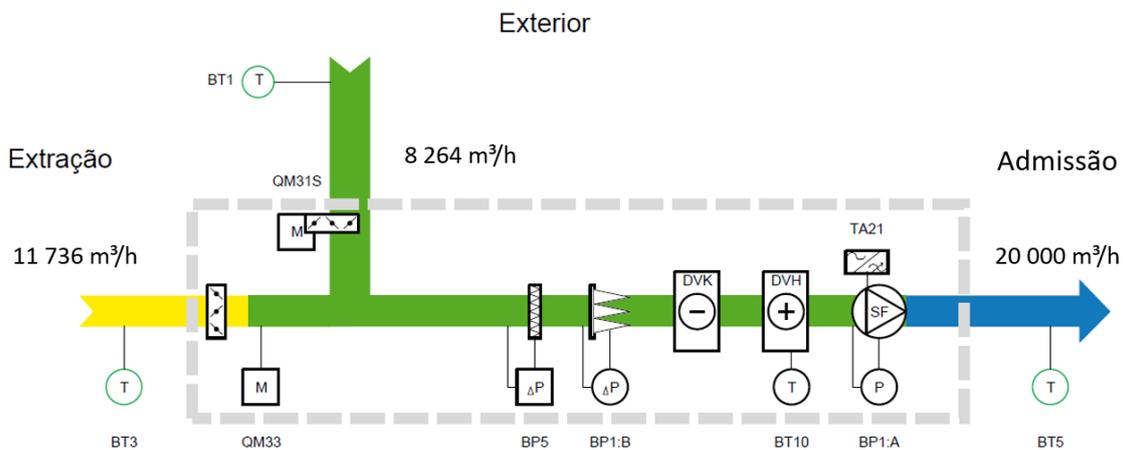


Figura 3.14 - Esquema de funcionamento da UTA C

Na tabela 3.10 é apresentado o novo balanço de caudais de ar com a aplicação da solução proposta para o P4, resultando o novo balanço de caudais de ar num défice de 18 000 m<sup>3</sup>/h, obtendo-se a subpressão relativamente ao P6 e o equilíbrio quando analisado o ambiente comum do P4 e P6.

Tabela 3.10 - Novo balanço de caudais de ar do Pavilhão 4

| Pavilhão 4                                    |                |                                     |       |       |       |
|---|----------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| Extração                                      | IR5            | IF4                                 | C7    | C4    | C3    |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 37 407         | 27 004                              | 8 697 | 2 000 | 2 000 |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 77 108         |                                     |       |       |       |
| Total c/ fator de simult. (m <sup>3</sup> /h) | 46 264         | Nº de recirculações por hora (rcph) |       | 3.55  |       |
| Insuflação                                    | UTAN 10        | UTA C                               |       |       |       |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                    | 20 000         | 8 264 (+ 11 736 em recirculação)    |       |       |       |
| Total (m <sup>3</sup> /h)                     | 28 264         | Nº de recirculações por hora (rcph) |       | 3.07  |       |
| <b>Balanço (m<sup>3</sup>/h)</b>              | <b>-18 000</b> |                                     |       |       |       |

Na figura 3.15 é apresentado um esquema resumo das condições propostas de insuflação e extração dos três diferentes espaços em análise, sendo realizada na tabela 3.11 uma síntese dos resultados obtidos.

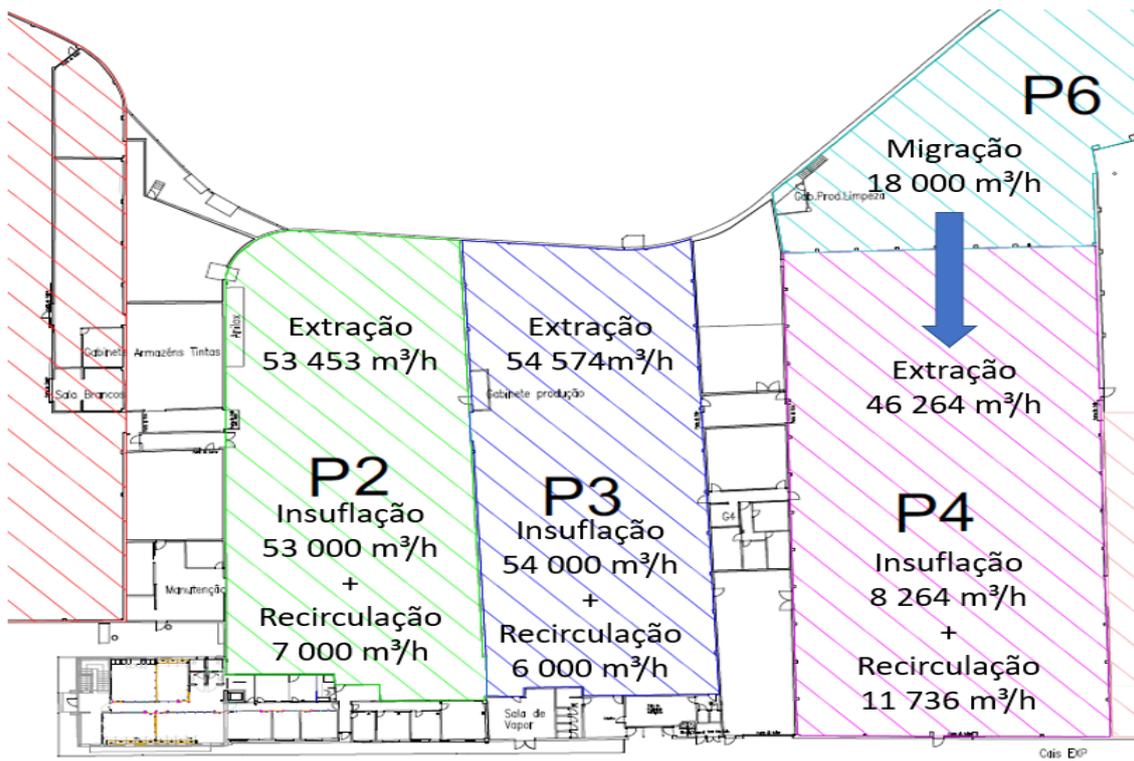


Figura 3.15 - Esquema das condições propostas de insuflação e extração dos diferentes espaços em análise

Tabela 3.11 - Síntese dos balanços de caudais de ar resultantes das alterações propostas para os espaços analisados

| Pavilhão     | UTA's   | Insuflação        | Extração          | dif.              | fator<br>simult. | Extração          | dif.              |
|--------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|              |         | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h |                  | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h |
| P2           | 2, 3, A | 53 000            | 89 089            | -36 089           | 0.6              | 53 453            | - 453             |
| P3           | 5, 7, B | 54 000            | 90 956            | -36 956           | 0.6              | 54 574            | - 574             |
| P4           | 10, C   | 28 264            | 77 108            | -48 844           | 0.6              | 46 264            | -18 000           |
| <b>TOTAL</b> |         | <b>135 264</b>    | <b>257 153</b>    | <b>-121 889</b>   |                  | <b>154 290</b>    | <b>- 19 027</b>   |

Adicionalmente, a implementação destas soluções requereria uma análise complementar às concentrações de poluentes, no sentido de verificar se estas se encontram dentro do intervalo de valores aceitáveis pela legislação aplicável, análise esta que não será objeto de estudo nesta dissertação.

No entanto, as soluções apresentadas inserem-se numa análise que, embora seja fundamental para obter informação sobre os níveis adequados de ventilação, esta é bastante simplista ao considerar apenas as necessidades de ar das máquinas, não considerando devidamente outros parâmetros cruciais para a criação de condições de conforto térmico minimamente aceitáveis para os diferentes espaços, como por exemplo, a capacidade de remoção das cargas térmicas associadas ao processo produtivo por parte dos sistemas de ventilação mecânica, sendo, portanto, necessário recorrer à simulação dinâmica para obter uma análise mais abrangente.

### 3.3 Desenvolvimento da Simulação Dinâmica

Neste subcapítulo são abordados os diferentes níveis de preparação e definição da simulação dinâmica no software DesignBuilder, para os espaços de maior interesse mencionados anteriormente.

#### 3.3.1 Caracterização térmica do edifício

Antes de qualquer modelação do edifício é necessário ter conhecimento das cargas térmicas existente neste, condição necessária à obtenção do correto dimensionamento dos diferentes equipamentos e acessórios pertencente ao sistema de AVAC, de forma a garantir as condições interiores de utilização adequadas para fazer face às condições exteriores mais adversas.

As cargas térmicas de arrefecimento e aquecimento correspondem às taxas de calor que devem ser fornecidas ou removidas pelo sistema de AVAC, para manter um espaço nas condições de conforto pretendidas. Estas resultam de diversos processos de transferência de calor através da envolvente do edifício, da geração de ganhos térmicos associados à atividade dos espaços a climatizar e de infiltração e transferência de ar (migração de ar e humidade entre as diferentes frações do edifício).

##### 3.3.1.1 Zonamento climático

A qualidade térmica da envolvente é diretamente influenciada pelo clima em que o edifício se insere, sendo, portanto, desde logo, necessário efetuar a caracterização climática da zona em que o edifício se insere. O Designbuilder contém na sua base de dados climáticos a informação relativa a Portugal, nomeadamente da cidade do Porto, dados estes fornecidos pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), os quais podem ser consultados na tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Dados climáticos referentes à zona em que está inserido o edifício em estudo

| <b>Dados Climáticos</b>                   |       |
|---|-------|
| Localidade                                | Porto |
| Altitude (m)                              | 94    |
| Número de Graus-Dias (°C)                 | 1250  |
| Zona Climática Inverno                    | I1    |
| Duração da Estação de Aquecimento (meses) | 6.2   |

|   |      |
|---|------|
| Temperatura Exterior de Projeto Inverno (°C) -<br>Probabilidade acumulada de ocorrência de 2.5% | 1.9  |
| Zona Climática Verão  | V2   |
| Temperatura Exterior de Projeto Verão (°C) –<br>Probabilidade acumulada de ocorrência de 99.0%  | 30.9 |
| Amplitude Térmica (°C)  | 9.6  |

A opção por uma probabilidade acumulada de ocorrência da temperatura exterior de projeto de verão de 99.0%, que corresponde a um valor de temperatura que só será excedido em 30 horas, deve-se ao facto deste edifício estar inserido numa área urbana, tipo de zona que apresenta geralmente uma temperatura média do ar superior às áreas circunvizinhas, onde estão, normalmente as estações meteorológicas de aquisição de dados e, de forma a ter em consideração as alterações climáticas, especificamente o aumento da ocorrência de ondas de calor, traduzindo-se por estas razões numa abordagem mais conservadora.

Na figura 3.16 é possível visualizar a evolução da temperatura de bolbo seco e bolbo húmido ao longo do ano no Porto, extraída da base de dado do DesignBuilder.

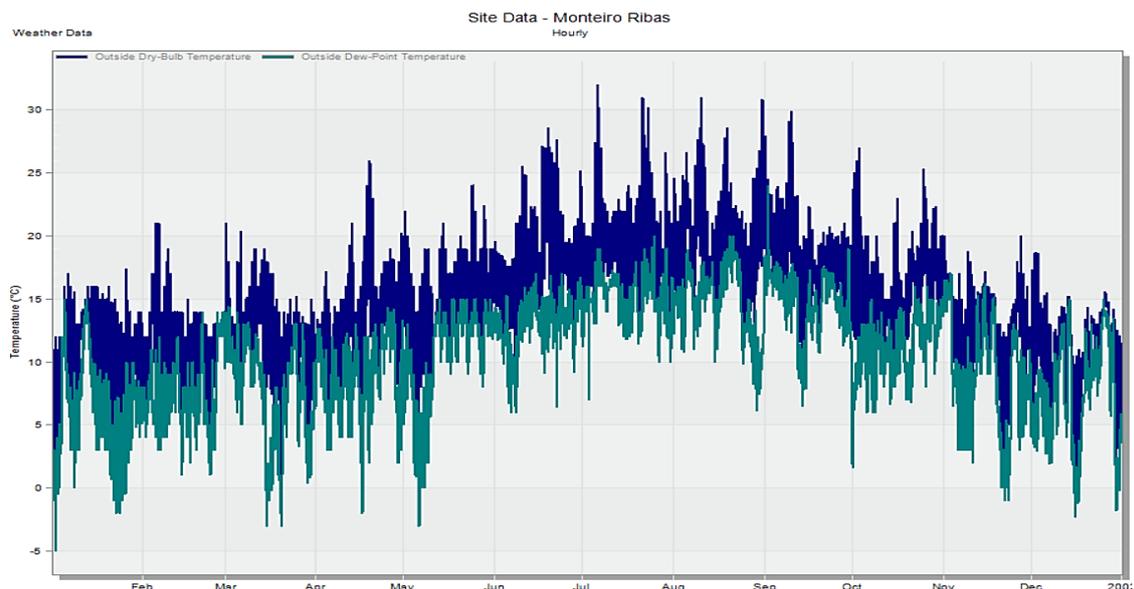


Figura 3.16 - Evolução da temperatura de bolbo seco (azul escuro) e bolbo húmido (azul claro) ao longo do ano no Porto

### 3.3.1.2 Análise da envolvente

A análise da envolvente é realizada do ponto de vista da sua componente física, de forma a delimitar adequadamente a sua fronteira e proceder à respetiva caracterização térmica, tendo esta como base, a avaliação da capacidade de transferência térmica do edifício, definida por parâmetros como a resistência térmica,  $R$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ ), coeficiente global de transmissão térmica,  $U$  ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$ ), massa superficial útil,  $M_{si}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) e inércia térmica,  $I_t$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

Para a caracterização térmica da envolvente do edifício recorreu-se à publicação ITE50 - “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios” do LNEC. Esta publicação apresenta, sob forma tabular, valores convencionais de resistências térmicas superficiais e de condutibilidades térmicas, e ainda, dos coeficientes de transmissão térmica de soluções correntes da construção portuguesa das envolventes opaca e envidraçada.

O cálculo do coeficiente de transmissão Térmica é efetuado através da equação 3.1.

$$U = (R_{si} + nR_j + R_{se})^{-1} \quad (3.1)$$

Em que:

- $U$  representa o coeficiente de transmissão térmica, em  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$ ;
- $R_{si}$ ,  $R_{se}$  representam as resistências térmicas superficiais, interior e exterior, respetivamente, em  $\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ ;
- $R_j$  representa a resistência térmica do elemento/camada  $j$ , em  $\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ .

A análise à planta do edifício e os dados construtivos fornecidos pela MREF permitiram caracterizar do ponto de vista físico e térmico os diferentes elementos construtivos opacos (paredes, pavimentos e coberturas).

#### 3.3.1.2.1 Paredes exteriores e interiores

As paredes interiores e exteriores deste edifício têm a mesma tipologia. Estas são constituídas por alvenaria de Tijolo e duas camadas de Reboco tradicional, uma interior e outra exterior.

Para cálculo do coeficiente global de transmissão de calor ( $U$ ) das paredes, consideraram-se os materiais que compõem as mesmas, a sua espessura e a sua condutibilidade. Nas tabelas 3.13 e 3.14, estão inseridos os valores para a obtenção do coeficiente global de transmissão de calor para as paredes exteriores e interiores, respetivamente.

Tabela 3.13 - Constituição e coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores

| <b>Componente</b>   | <b>Espessura (m)</b> | <b>Condutibilidade térmica (W/m.°C)</b> | <b>Resistência térmica (m<sup>2</sup>.°C/W)</b> |
|---|----------------------|---|---|
| Resistência Interior  | -                    | -                                       | 0.13  |
| Reboco Interior   | 0.02                 | 1.3                                     | 0.015   |
| Alvenaria de Tijolo   | 0.15                 | -                                       | 0.27  |
| Reboco Exterior   | 0.02                 | 1.3                                     | 0.015   |
| Resistência Exterior  | -                    | -                                       | 0.04  |
| <b>Coeficiente global de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> |                      |   | <b>2.13</b>                                     |

Tabela 3.14 - Constituição e coeficiente de transmissão térmica das paredes interiores

| <b>Componente</b>   | <b>Espessura (m)</b> | <b>Condutibilidade térmica (W/m.°C)</b> | <b>Resistência térmica (m<sup>2</sup>.°C/W)</b> |
|---|----------------------|---|---|
| Resistência Interior  | -                    | -                                       | 0.13  |
| Reboco interior   | 0.02                 | 1.3                                     | 0.015   |
| Alvenaria de Tijolo   | 0.15                 | -                                       | 0.27  |
| Reboco interior   | 0.02                 | 1.3                                     | 0.015   |
| Resistência Interior  | -                    | -                                       | 0.13  |
| <b>Coeficiente global de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> |                      |   | <b>1.79</b>                                     |

### 3.3.1.2.2 Pavimento

No cálculo do coeficiente global de transmissão de calor (U) do pavimento consideram-se os materiais que compõem o mesmo, a sua espessura e a sua condutibilidade. O pavimento é constituído por uma simples camada de betão de 0.4 m. Na tabela 3.15, estão inseridos os valores para a obtenção do coeficiente global de transmissão de calor para o pavimento.

Tabela 3.15 - Constituição e coeficiente de transmissão térmica do pavimento

| Componente  | Espessura (m) | Condutibilidade térmica (W/m.°C) | Resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C/W) |
|---|---------------|----------------------------------|--|
| Resistência Interior  | -             | -                                | 0.10                                       |
| Betão   | 0.4           | 2.0                              | 0.20                                       |
| <b>Coeficiente global de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> |               |                                  | <b>3.33</b>                                |

### 3.3.1.2.3 Cobertura

Existem 2 tipologias de cobertura presentes neste edifício:

- cobertura de uma água em dente de serra constituída por painéis sanduiche de poli-isocianurato (PIR), para o P1, P2, P4, P5 e P7;
- cobertura de duas meias águas com cumieira de placa de Poliestireno Extrudido, para o P3 e P6.

No cálculo do coeficiente global de transmissão de calor (U) do pavimento consideram-se os materiais que compõem o mesmo, a sua espessura e a sua condutibilidade. Na tabela 3.16 e 3.17, estão inseridos os valores para a obtenção dos coeficientes globais de transmissão de calor para a cobertura em dente de serra e a cobertura de duas meias águas com cumieira.

Tabela 3.16 - Constituição e coeficiente de transmissão térmica da cobertura de uma água

| Componente   | Espessura (m) | Condutibilidade térmica (W/m.°C) | Resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C/W) |                   |
|--|---------------|----------------------------------|--|-------------------|
|  |               |                                  | Fluxo Ascendente                           | Fluxo Descendente |
| Resistência Exterior   | -             | -                                | 0.04                                       | 0.04              |
| Painel Sanduiche PIR   | 0.03          | 0.037                            | 0.81                                       | 0.81              |
| Resistência Interior   | -             | -                                | 0.10                                       | 0.17              |
| <b>Coeficiente de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> |               |                                  | <b>1.05</b>                                | <b>0.98</b>       |

Tabela 3.17 - Constituição e coeficiente de transmissão térmica da cobertura de duas meias águas com Cumieira

| Componente  | Espessura (m) | Condutibilidade térmica (W/m.°C) | Resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C/W) |                   |
|---|---------------|----------------------------------|--|-------------------|
|   |               |                                  | Fluxo Ascendente                           | Fluxo Descendente |
| Resistência Exterior  | -             | -                                | 0.04                                       | 0.04              |
| Placa de Poliestireno Extrudido                                       | 0.03          | 0.037                            | 0.81                                       | 0.81              |
| Resistência Interior  | -             | -                                | 0.10                                       | 0.17              |
| <b>Coeficiente global de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> |               |                                  | <b>1.05</b>                                | <b>0.98</b>       |

Na cobertura dos pavilhões 1, 2 e 4 estão inseridas placas de policarbonato translúcido orientadas a norte, para garantir um nível mínimo de iluminação natural. Na tabela 3.18,

podem ser consultados os valores para a obtenção do coeficiente global de transmissão de calor desse elemento.

Tabela 3.18 - Constituição e coeficiente de transmissão térmica da cobertura com placas de policarbonato translúcido

| <b>Componente</b>   | <b>Espessura (m)</b> | <b>Condutibilidade térmica (W/m.°C)</b> | <b>Resistência térmica (m<sup>2</sup>.°C/W)</b> |
|---|----------------------|---|---|
| Resistência Exterior  | -                    | -                                       | 0.04  |
| Policarbonato translúcido   | 0.001                | 0.2                                     | 0.005   |
| Resistência Interior  | -                    | -                                       | 0.13  |
| <b>Coeficiente global de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> |                      |   | <b>5.71</b>                                     |

Uma vez que as placas de policarbonato translúcidas são elementos não opacos, estes são adicionalmente caracterizados por um fator solar, o qual foi obtido através da consulta da base de dados do DesignBuilder e, cujo valor para a tipologia apresentada é igual a 0.75.

#### 3.3.1.2.4 Pontes térmicas

Para além dos ganhos/perdas de calor pelas diferentes superfícies da envolvente, os edifícios trocam calor através das ligações entre os elementos construtivos, designadas por pontes térmicas. Podem existir dois tipos de pontes térmicas:

- Pontes Térmicas Planas (PTP);
- Pontes Térmicas Lineares (PTL).

As PTP são heterogeneidades inseridas numa zona corrente da envolvente, tais como pilares, vigas e caixas de estore, por onde ocorre um fluxo térmico unidimensional. As PTL, contrariamente às PTP, envolvem um fluxo térmico bidimensional decorrente da ligação de dois elementos construtivos, como por exemplo, a ligação da fachada com pavimentos ou coberturas.

Segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013, nas situações em que não existam evidências de que a solução construtiva garante a ausência ou reduzida contribuição de zonas de ponte térmica plana, dispensa-se a determinação rigorosa das áreas e dos coeficientes de transmissão térmica das zonas de pilares, vigas, caixas de estore e outras

heterogeneidades, podendo ser considerado para estes elementos o coeficiente de transmissão térmica determinado para a zona corrente, agravado em 35%.

O referido valor agravado é aplicado à globalidade da envolvente, compreendendo zonas correntes e não correntes, podendo ser consultado na tabela 3.19 os valores do coeficiente de transmissão térmica corrigidos.

Tabela 3.19 - Coeficientes de transmissão térmica corrigidos

| <b>Elemento Construtivo</b> | <b>Coeficiente global de transmissão Térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> | <b>Coeficiente global de transmissão Térmica corrigido (W/m<sup>2</sup>.°C)</b> |
|-----------------------------|---|---|
| Paredes Exteriores          | 2.13  | 2.88  |
| Paredes Interiores          | 1.79  | 2.42  |

No caso das PTL, em grandes edifícios dominados por ganhos térmicos, face ao número e complexidade de levantamento, estas podem ser contabilizadas pelo agravamento em 5% das necessidades energéticas de aquecimento.

### 3.3.1.3 Inércia térmica

A inércia térmica do elemento traduz a sua capacidade de armazenamento de energia térmica, estando intrinsecamente dependente da massa deste, e tendo como função atenuar as variações de temperatura no interior resultado das amplitudes térmicas diárias, permitindo minimizar a ocorrência de sobreaquecimento ou subarrefecimento.

A classe de inércia térmica de uma construção depende da massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento ( $I_t$ ) de cada um dos elementos constituintes de construção (paredes, pavimentos, coberturas), estando definidas três classes de inércia térmica, conforme indicado na tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Classes de inércia térmica

| <b>Classe de Inércia</b> | <b><math>I_t</math> (kg/m<sup>2</sup>)</b> |
|--------------------------|--|
| Fraca                    | $I_t < 150$                                |
| Média                    | $150 \geq I_t \leq 400$                    |
| Forte                    | $I_t > 400$                                |

A massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento ( $I_t$ ) é determinada pela equação 3.2.

$$I_t = \sum \frac{(M_{si} \cdot S_i \cdot r_i)}{A_u} \quad (3.2)$$

Onde:

- $I_t$  representa a massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento, em  $\text{kg/m}^2$
- $M_{si}$  representa a massa superficial útil do elemento  $i$ , em  $\text{kg/m}^2$ ;
- $S_i$  representa a área útil interna do elemento  $i$ , em  $\text{m}^2$ ;
- $r_i$  representa o fator de correção devido ao revestimento superficial;
- $A_u$  representa a área útil do pavimento, em  $\text{m}^2$ .

A massa superficial útil de cada elemento da envolvente depende dos seguintes fatores:

- Massa volúmica e espessura do elemento;
- Da resistência térmica do revestimento superficial interior;
- Da posição relativa do elemento ao isolamento térmico, se existente.
- Localização dos elementos na envolvente, sendo distinguidos os seguintes tipos de elementos:
  - EL1 – elementos da envolvente interior ou exterior, ou elementos de construção em contato com outra fração autónoma ou edifício adjacente;
  - EL2 – elementos em contato com o solo;
  - EL3 – elementos de compartimentação interior da fração autónoma (parede, pavimento ou solo)

Os valores máximos de  $M_{si}$  em função do tipo de elemento da envolvente anteriormente descritos, são apresentados na tabela 3.21.

Tabela 3.21 - Os valores máximos de  $M_{si}$  em função do tipo de elemento da envolvente

| Valores máximos de $M_{si}$ (kg/m <sup>2</sup> ) |                                    |  |
|--|------------------------------------|--|
| Tipo de Elemento                                 | Sem Isolamento                     | Com isolamento                         |
| EL1  | $M_{si} = m_i$ e $M_{si} \leq 150$ | $M_{si} = m_t / 2$ e $M_{si} \leq 150$ |
| EL2  | $M_{si} = m_i$ e $M_{si} \leq 150$ | $M_{si} = 150$                         |
| EL3  | $M_{si} = m_t$ e $M_{si} \leq 300$ |  |

Devido à complexidade do edifício e por uma questão de simplicidade, visto que os espaços críticos de interesse para este estudo são o P2, P3 e P4, a inércia térmica foi analisada exclusivamente para cada uma destas frações. Os cálculos efetuados para quantificar a classe de inércia podem ser consultados no anexo 6.4.

A classificação da inércia térmica para os diferentes espaços em análise pode ser consultada a tabela 3.22, contatando-se através da análise dos valores apresentados, que a classe de inércia térmica obtida se enquadra com o que seria expectável de um edifício desta tipologia.

Tabela 3.22 - Classificação da inércia térmica para o P2, P3 e P4

| Espaço | $I_t$ (kg/m <sup>2</sup> ) | Classe de Inércia |
|--------|----------------------------|-------------------|
| P2     | 198.93                     | Média             |
| P3     | 192.14                     | Média             |
| P4     | 189.49                     | Média             |

### 3.3.2 Caracterização dos ganhos internos

A par da análise e caracterização da envolvente do edifício, é indispensável a realização da caracterização das condições de funcionamento de diferentes parâmetros, nomeadamente a ocupação, iluminação e equipamentos, os quais exibem um impacto substancial no balanço térmico do edifício, como fontes de ganhos internos.

Os ganhos internos estão, normalmente, associados a um ganho de calor em período de arrefecimento representando, por tal, uma parcela importante de potência térmica a instalar no sistema de climatização para a sua remoção. Contrariamente, no período de

aquecimento, os ganhos internos contribuem para a diminuição de energia a despender pelo sistema de climatização, visto que representam um ganho útil, o qual, habitualmente, não é contabilizado para o dimensionamento do referido sistema.

Uma subavaliação pode resultar numa instalação subdimensionada o que se irá traduzir numa temperatura ambiente acima do valor pretendido na estação de arrefecimento. No entanto, uma sobreavaliação dos ganhos internos pode resultar em custos dispensáveis por via do aumento desnecessário da potência em arrefecimento a instalar.

### 3.3.2.1 Ocupação

O regime de funcionamento da unidade produtiva é, normalmente, de três turnos, das 00:00 h de Segunda-feira até às 14 h de Sábado. Os índices de ocupação, por turno, dos diversos espaços da unidade MREF podem ser consultados na tabela 3.23.

Tabela 3.23 - Índice de ocupação por turno dos diversos espaços da MREF

| <b>Espaço</b> | <b>Área(m<sup>2</sup>)</b> | <b>Nº de Ocupantes</b> | <b>Índice de Ocupação (nº ocupantes/m<sup>2</sup>)</b> |
|---------------|----------------------------|------------------------|--|
| P1            | 2 606                      | 5                      | 0.0019   |
| P2            | 1 555                      | 23                     | 0.0148   |
| P3            | 1 377                      | 10                     | 0.0073   |
| P4            | 2 173                      | 25                     | 0.0115   |
| P5            | 594                        | 5                      | 0.0084   |
| P6            | 1 122                      | 9                      | 0.0080   |
| P7            | 732                        | 12                     | 0.0164   |

A potência referente aos ganhos de ocupação foi definida pela base de dados do programa de simulação e que tem como base o Guia A de Design Ambiental da CIBSE (2007). Na figura 3.17 é possível consultar as taxas típicas de emissão de calor por pessoas em diferentes estados de atividade.

| Degree of activity            | Typical building               | Total rate of heat emission for adult male / W | Rate of heat emission for mixture of males and females / W |          |        | Percentage of sensible heat that is radiant heat for stated air movement / % |     |
|-------------------------------|--------------------------------|--|--|----------|--------|--|-----|
|                               |                                |  | Total  | Sensible | Latent | High   | Low |
| Seated at theatre             | Theatre, cinema (matinee)      | 115  | 95   | 65       | 30     | —  | —   |
| Seated at theatre, night      | Theatre, cinema (night)        | 115  | 105  | 70       | 35     | 60   | 27  |
| Seated, very light work       | Offices, hotels, apartments    | 130  | 115  | 70       | 45     | —  | —   |
| Moderate office work          | Offices, hotels, apartments    | 140  | 130  | 75       | 55     | —  | —   |
| Standing, light work; walking | Department store, retail store | 160  | 130  | 75       | 55     | 58   | 38  |
| Walking; standing             | Bank                           | 160  | 145  | 75       | 70     | —  | —   |
| Sedentary work                | Restaurant                     | 145  | 160  | 80       | 80     | —  | —   |
| Light bench work              | Factory                        | 235  | 220  | 80       | 140    | —  | —   |
| Moderate dancing              | Dance hall                     | 265  | 250  | 90       | 160    | 49   | 35  |
| Walking; light machine work   | Factory                        | 295  | 295  | 110      | 185    | —  | —   |
| Bowling                       | Bowling alley                  | 440  | 425  | 170      | 255    | —  | —   |
| Heavy work                    | Factory                        | 440  | 425  | 170      | 255    | 54   | 19  |
| Heavy machine work; lifting   | Factory                        | 470  | 470  | 185      | 285    | —  | —   |
| Athletics                     | Gymnasium                      | 585  | 525  | 210      | 315    | —  | —   |

Figura 3.17 - Taxas típicas de emissão de calor por pessoas em diferentes estados de atividade (CIBSE, 2006)

Para edifícios industriais e considerando um nível de atividade leve, os ganhos internos por ocupante estabelecidos são 110 W de calor sensível e 185 de calor latente, perfazendo um total de 295 W de calor emitido.

### 3.3.2.2 Iluminação

A iluminação das instalações da fábrica tem um funcionamento contínuo durante o período de atividade de produção, sendo efetuada maioritariamente por lâmpadas fluorescentes T8 de 18, 36 e 58 W, com balastros eletrónicos, e por lâmpadas tubulares LED de 9 e 24 W. Em número relativamente menos significativo, mas com alguma expressão estão também instaladas lâmpadas fluorescentes compactas de 75 W e lâmpadas fluorescentes T5 de 14 e 28 W.

A potência de iluminação obtida através do levantamento realizado no âmbito deste estudo, dos diferentes equipamentos de luminária afetos aos diferentes espaços, pode ser consultada na tabela 3.24.

Tabela 3.24 - Potência de iluminação para os diferentes pavilhões

| Espaço | Área(m <sup>2</sup> ) | Potência (W) | Densidade de Potência (W/ m <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------------------|--------------|--|
| P1     | 2 606                 | 5 760        | 2.2  |
| P2     | 1 555                 | 10 574       | 6.8  |

| Espaço | Área(m <sup>2</sup> ) | Potência (W) | Densidade de Potência (W/ m <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------------------|--------------|--|
| P3     | 1 377                 | 8 438        | 6.1  |
| P4     | 2 173                 | 10 859       | 5.0  |
| P5     | 594                   | 2 247        | 3.8  |
| P6     | 1 122                 | 2 989        | 2.7  |
| P7     | 732                   | 3 896        | 5.3  |

Considerando a impossibilidade de distinguir todos estes tipos de equipamentos de iluminação no DesignBuilder devido a limitações do programa neste campo específico e, tendo em conta que a maioria da iluminação instalada é do tipo fluorescente, para efeitos de simulação foi considerada toda a iluminação deste tipo.

De acordo com o (U.S. Department of Energy, 2018), deve-se considerar que a potência elétrica das lâmpadas fluorescentes é convertida em 20% de radiação visível, 20% de radiação térmica e 60% em ganhos convectivos.

### 3.3.2.3 Equipamentos

Considerando que as máquinas de impressão de flexografia, rotogravura e complexagem contribuem para a quase totalidade de produção de calor nos espaços em análise, e não havendo muitos equipamentos com presença permanente, específica a cada espaço, como por exemplo, empilhadores e outros equipamentos de transporte de materiais que podem circular entre os diferentes pavilhões, considerou-se apenas as máquinas de impressão como os únicos equipamentos emissores de calor.

Para o cálculo das potências das máquinas foi considerado um fator de utilização baseado na potência elétrica máxima medida em cada máquina comparativamente à potência elétrica nominal destas, com o intuito de estimar o nível de atividade de cada máquina. Adicionalmente, foi aplicado o fator de simultaneidade, referido anteriormente neste estudo de forma a contabilizar o nível máximo espectável de atividade simultânea das diferentes máquinas.

A potência térmica dissipada por cada máquina para o espaço foi determinada recorrendo à equação 3.3, à qual segue recomendações da ASHRAE para o cálculo dos ganhos internos de equipamentos.

$$Pt_r = Pe_m + (Pt_f - Pd_c - Pd_a) \cdot F_u \quad (3.3)$$

Em que:

- $P_{tr}$  representa a potência térmica a remover para determinada máquina, em kW;
- $P_{em}$  representa a potência elétrica máxima medida, em kW;
- $P_{tf}$  representa a potência térmica fornecida à máquina, em kW;
- $P_{dc}$  representa a potência dissipada para o exterior pela chaminé da máquina, em kW;
- $P_{da}$  representa a potência dissipada por água arrefecida nos circuitos internos da máquina, em kW;
- $F_u$  representa o fator de utilização.

O cálculo das potências térmicas das máquinas de impressão do P2, P3 e P4 pode ser consultado nas tabelas 3.25, 3.26 e 3.27, respetivamente, devendo ser salientado que, os valores das diferentes medições, em seguida apresentados, foram fornecidos pela MREF.

Tabela 3.25 - Cálculo da Potência térmica a dissipar dos Equipamentos do P2

| <b>Pavilhão 2</b>   |                |                                    |              |              |              |
|---|----------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Máquina</b>  | <b>IF1</b>     | <b>IF2</b>                         | <b>IF3</b>   | <b>IR1</b>   | <b>IR2</b>   |
| <b>Pot. Eléct. Nominal (kW)</b>                           | 185.6          | 180.0                              | 187.0        | 240.0        | 240.0        |
| <b>Pot. Eléct. Máx. Medida (kW)</b>                       | 39.5           | 92.1                               | 112.2        | 87.5         | 87.5         |
| <b>Fator de utilização</b>                                | 21%            | 51%                                | 60%          | 36%          | 36%          |
| <b>Pot. Térmica fornecida (kW)</b>                        | 580.0          | 526.0                              | 385.0        | 700.0        | 531.0        |
| <b>Pot. Arrefec. Água (kW)</b>                            | - 84.0         | - 84.0                             | - 24.0       | - 60.0       | - 60.0       |
| <b>Pot. Dissipada Chaminé (kW)</b>                        | -107.8         | - 115.5                            | - 85.4       | - 378.6      | - 164.7      |
| <b>Pot. Térmica a remover (kW)</b>                        | 427.7          | 418.6                              | 387.8        | 348.9        | 393.8        |
| <b>Pot. Térmica a remover c/ fator de utilização (kW)</b> | <b>122.1</b>   | <b>259.1</b>                       | <b>277.6</b> | <b>182.8</b> | <b>199.2</b> |
| <b>Total a remover (kW)</b>                               | <b>1 040.8</b> | <b>Total c/ fator simult. (kW)</b> |              | <b>624.5</b> |              |

Tabela 3.26 - Cálculo da Potência térmica a dissipar dos Equipamentos do P3

| <b>Pavilhão 3</b>   |              |                                    |           |              |            |
|---|--------------|------------------------------------|-----------|--------------|------------|
| <b>Máquina</b>  | <b>C2</b>    | <b>C5</b>                          | <b>C6</b> | <b>IR3</b>   | <b>IR4</b> |
| <b>Pot. Eléct. Nominal (kW)</b>                           | 94.0         | 66.4                               | 203.2     | 260.0        | 240.0      |
| <b>Pot. Eléct. Máx. Medida (kW)</b>                       | 37.5         | 31.3                               | 50.0      | 62.5         | 93.8       |
| <b>Fator de Utilização</b>                                | 40%          | 47%                                | 25%       | 24%          | 39%        |
| <b>Pot. Térmica Fornecida (kW)</b>                        | 323.0        | 715.0                              | 225.0     | 722.0        | 950.0      |
| <b>Pot. Arrefec. (água) (kW)</b>                          | 0            | 0                                  | 0         | - 60.0       | - 118.0    |
| <b>Pot. Dissipada chaminé (kW)</b>                        | 0            | - 204.9                            | - 83.9    | - 361.4      | - 238.0    |
| <b>Pot. Térmica a remover (kW)</b>                        | 360.5        | 541.4                              | 191.1     | 363.1        | 687.8      |
| <b>Pot. Térmica a remover c/ fator de utilização (kW)</b> | 166.4        | 271.7                              | 84.7      | 134.8        | 326.0      |
| <b>Total a remover (kW)</b>                               | <b>983.5</b> | <b>Total c/ fator simult. (kW)</b> |           | <b>590.1</b> |            |

Tabela 3.27 - Cálculo da Potência térmica a dissipar dos Equipamentos do P4

| <b>Pavilhão 4</b>   |              |                                    |           |              |           |
|---|--------------|------------------------------------|-----------|--------------|-----------|
| <b>Máquina</b>  | <b>IR5</b>   | <b>IF4</b>                         | <b>C7</b> | <b>C3</b>    | <b>C4</b> |
| <b>Pot. Eléct. Nominal (kW)</b>                           | 221.0        | 400.0                              | 220.0     | 180.0        | 180.0     |
| <b>Pot. Eléct. Máx. Medida (kW)</b>                       | 88.4         | 160.0                              | 66.0      | -            | -         |
| <b>Fator de utilização</b>                                | 40%          | 40%                                | 30%       | 60%          | 60%       |
| <b>Pot. térmica fornecida (kW)</b>                        | 0            | 600.0                              | 420.0     | -            | -         |
| <b>Pot. arrefec (água) (kW)</b>                           | 0            | - 10.0                             | - 22.3    | -            | -         |
| <b>Pot. dissipada chaminé (kW)</b>                        | - 341.0      | - 246.2                            | - 79.3    | -            | -         |
| <b>Pot. Térmica a remover (kW)</b>                        | -252.6       | 503.8                              | 384.3     | -            | -         |
| <b>Pot. Térmica a remover c/ fator de utilização (kW)</b> | -48.0        | 297.5                              | 161.5     | 108.0        | 108.0     |
| <b>Total a remover (kW)</b>                               | <b>627.1</b> | <b>Total c/ fator simult. (kW)</b> |           | <b>376.2</b> |           |

Em suma, têm de ser removidos 624.5 kW (401.6 W/m<sup>2</sup>), 590.1 kW (428.6 W/m<sup>2</sup>) e 376.2 kW (173.2 W/m<sup>2</sup>) de carga térmica resultante da atividade das máquinas de impressão, no P2, P3 e P4, respetivamente. Considerando a grande diversidade de tipologia e características das máquinas de impressão instaladas nos diferentes espaços, para efeitos de simulação, após consulta com a MREF, foi assumido que 30% dessas cargas corresponde a trocas de calor por radiação.

Relativamente ao P1 e P5, uma vez que são espaços de armazenamento, não apresentam qualquer equipamento libertador de calor.

As máquinas dos P6 e P7 são máquinas predominantemente de consumo elétrico sem grandes ganhos térmicos, não havendo um conhecimento preciso da potência térmica emitida por parte destes equipamentos, devido à inexistência de medições por parte da MREF.

Apesar de não serem espaços de interesse prioritário para este estudo, mas com o objetivo de obter uma simulação fiel às condições reais dos diferentes espaços do edifício, não descurando uma possível influência destas frações nos espaços de interesse deste estudo, nomeadamente a localização adjacente do P6 relativamente ao P4, e considerando as máquinas nestes instaladas, na tabela 3.28 são apresentadas as potências térmicas estimadas pela MREF para estes espaços.

Tabela 3.28 - Potências térmicas a dissipar estimadas para o P6 e P7

| <b>Espaço</b> | <b>Equipamentos</b>   | <b>Potência Térmica a Remover (kW)</b> |
|---------------|-----------------------|--|
| P6            | 3 saqueiras de 30 kW  | <b>67</b>                              |
|               | 3 saqueiras de 60 kW  |  |
| P7            | 3 máq. de corte 30 kW | <b>158</b>                             |
|               | 5 máq. de corte 40 kW |  |
|               | 2 máq. de corte 50 kW |  |
|               | 4 máq. de corte 60 kW |  |

### 3.3.3 Caracterização do funcionamento do sistema AVAC

Numa simulação são definidos limites para a temperatura do ar nas zonas ocupadas para o horário de funcionamento, as temperaturas de *setpoint*, as quais devem ser garantidas pelo sistema de climatização do edifício.

O Guia A de Design Ambiental da CIBSE (2006), para o período de aquecimento, para unidades fabris caracterizadas por atividades que não exigem um esforço físico intenso, recomendada temperaturas operativas não inferiores a 13°C, sendo sugerido um intervalo mínimo entre os 16°C e os 19°C, para resistências térmicas de vestuário de 0.85 clo, valor este assumido neste estudo. No polo oposto, para o período de arrefecimento não é definido qualquer limite de temperatura.

Na MREF não existe qualquer procedimento de controlo da temperatura operativa, havendo apenas monitorização da temperatura do ar interior, sendo este o único parâmetro utilizado para avaliação do ambiente térmico durante o período de atividade laboral. Na estação de arrefecimento, nos espaços em análise neste estudo, em períodos de temperaturas exteriores elevadas e níveis altos de intensidade produtiva, podem -se verificam temperaturas de ar interior superiores a 30°C criando um ambiente bastante desconfortável. Como tal, um dos objetivos complementares desta análise é verificar a possibilidade de criar condições de conforto ajustadas à realidade da MREF, através da simulação de diferentes níveis de temperatura que possam contribuir para uma melhoria das condições verificadas.

Como referido na revisão bibliográfica, segundo (CIBSE, 2006) para temperaturas do ar de um espaço superiores a 25°C, verifica-se um decréscimo do desempenho dos ocupantes, tendo sido assumido conjuntamente com a MREF níveis de decréscimo aceitáveis até 8%, que corresponde a temperaturas até 28°C. Outro parâmetro a ter em consideração são as expectáveis temperatura médias radiantes elevadas, resultantes dos significativos ganhos térmicos, induzindo nos espaços temperatura operativas consideráveis. Recorrendo à norma EN 15251 (2006), considerando que o edifício em estudo se enquadra na categoria III, edifícios existentes com um nível aceitável e moderado de expectativas, e considerando que a temperatura média exterior no Porto para a estação de arrefecimento é de 20.9°C, embora por razões já mencionadas anteriormente, se possa considerar um nível ligeiramente mais elevado devido ao edifício estar inserido numa zona urbana, o limite de temperatura operativa estabelecido é de 30°C (figura 3.18).

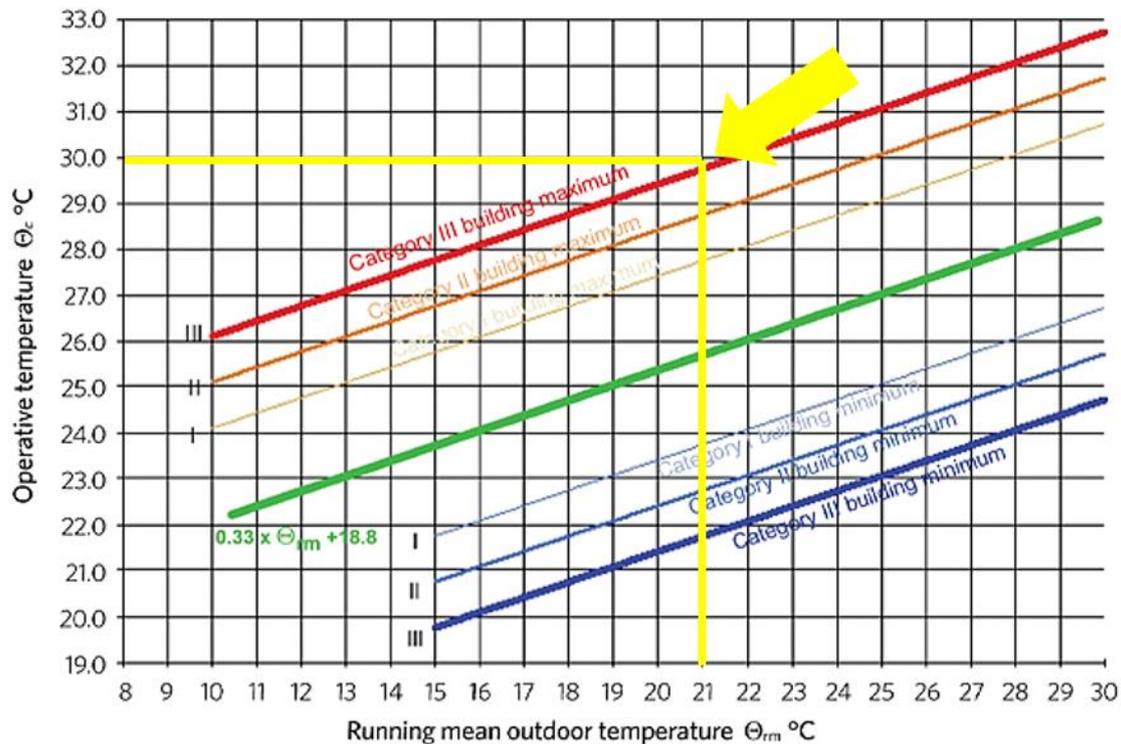


Figura 3.18 - Determinação do limite de temperatura operativa, segundo a norma EN 15251 (2006)

Adicionalmente, não será estabelecido qualquer processo de controlo da humidade relativa, uma vez que o sistema de climatização instalado na MREF também não o efetua, e, considerando que este parâmetro só tem influência no conforto térmico do espaço quando se registam níveis elevados deste aliado a temperaturas do ar altas, condições estas não expectáveis neste edifício.

Na tabela 3.29 são apresentadas as condições de temperatura interior definidas, para efeitos de simulação, para as estações de aquecimento e arrefecimento.

Tabela 3.29 - Condições interiores pretendidas para as estações de aquecimento e arrefecimento

| Estação de Aquecimento        |                   | Estação de Arrefecimento      |                   |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| Temperatura de bolbo seco(°C) | Humidade Relativa | Temperatura de bolbo seco(°C) | Humidade Relativa |
| 18 / 20                       | Não controlada    | 26 / 28                       | Não controlada    |

Independentemente da temperatura de bolbo seco exterior, pretende-se que para as naves fabris em análise neste estudo, a temperatura do ar interior esteja limitada a um mínimo de 18°C e a um máximo de 28°C, durante o horário de produção. Para efeitos comparativos, no período de aquecimento serão simuladas as temperaturas de 18°C e 20°C e, para o período de arrefecimento serão simuladas as temperaturas de 26°C e 28°C, com o intuito de averiguar os possíveis efeitos da variação da temperatura definida

nas potências térmicas de aquecimento e arrefecimento necessárias para os diferentes espaços de interesse e nos níveis de temperatura operativa.

No entanto, podem ocorrer períodos em que a temperatura deixa de estar contida neste intervalo, como por exemplo, períodos de fim de semana ou feriado, em que não é necessário garantir o conforto dos ocupantes.

Adicionalmente, a simulação requer a definição dos caudais de ventilação para os espaços em análise. Considerando a distribuição das UTAN's pelos diferentes espaços abordada anteriormente, foram definidas as seguintes condições de ventilação apresentadas na tabela 3.30.

Tabela 3.30 - Caudais de ar definidos para os diferentes pavilhões

| <b>Espaço</b> | <b>Caudal Insuflação [m<sup>3</sup>/h]</b> | <b>Volume[m<sup>3</sup>]</b> | <b>Movimentação total de ar [(m<sup>3</sup>/h)/m<sup>3</sup>]</b> |
|---------------|--|------------------------------|---|
| P1            | 20 000                                     | 15 633                       | 1.28  |
| P2            | 60 000                                     | 9 330                        | 6.43  |
| P3            | 60 000                                     | 8 261                        | 7.26  |
| P4            | 40 000                                     | 13 035                       | 3.07  |
| P6            | 20 000                                     | 6 733                        | 2.97  |
| P7            | 20 000                                     | 4 389                        | 4.56  |

Convém ainda referir, as infiltrações, que constituem todas as entradas de ar novo admitidas de forma não controlada, como por exemplo, abertura de portas, frinchas, entre outras e são responsáveis por trocas térmicas, sendo por isso necessário ter em consideração este fator.

As infiltrações dependem diretamente do tipo e qualidade de construção e, constatando a não viabilidade do cálculo manual do valor representativo destas, foi considerado o conteúdo do Guia A de Design Ambiental da CIBSE (2006), que recomenda um valor médio de 0.25 rph para divisões de edifícios industriais com mais de 10 000 m<sup>2</sup>, para um diferencial de pressão de 50 Pa.

### 3.4 Apresentação e Discussão dos Resultados

Após a definição do modelo com os dados anteriormente referidos, procedeu-se ao cálculo das potências térmicas de aquecimento e arrefecimento para os espaços de interesse, nos módulos *Heating Design e Cooling Desing* do DesignBuilder, com o objetivo de encontrar as necessidades energéticas base para o dimensionamento adequado dos sistemas de climatização.

#### 3.4.1 Potência de aquecimento

O cálculo das necessidades de aquecimento foi feito com o módulo *Heating Design* do Design Builder, que tem como base o algoritmo do EnergyPlus.

Como referido anteriormente, este módulo simula as condições de temperatura exterior de projeto da estação de aquecimento para a localização em que edifício está inserido. A simulação calcula as necessidades de aquecimento para manter a temperatura interior ao nível estabelecido, quantificando todas as perdas de calor que se dão através de cada elemento da envolvente.

Este módulo de simulação assume que a temperatura exterior, velocidade e direção do vento são constantes, o funcionamento contínuo dos sistemas de aquecimento e a ausência de ganhos internos.

##### 3.4.1.1 Pavilhão 2

Em seguida, na tabela 3.31 são apresentados os valores detalhados do balanço térmico resultante da simulação para o P2, para as condições exteriores de projeto na estação de aquecimento, que corresponde a uma temperatura de 1.9°C, para as temperaturas do ar interior de 18°C e 20°C. O balanço térmico tem como variáveis as perdas pela envolvente, as parcelas correspondentes à ventilação e a energia necessária fornecer pelo sistema de AVAC.

Tabela 3.31 - Resultados detalhados da simulação para o pavilhão 2, na estação de aquecimento

| <b>Pavilhão 2</b>                      |           |           |
|--|-----------|-----------|
| <b>Temperatura de ar (°C)</b>          | <b>18</b> | <b>20</b> |
| <b>Temperatura Média Radiante (°C)</b> | 16.3      | 17.4      |
| <b>Temperatura operativa (°C)</b>      | 17.2      | 18.7      |

|                                     |                       |        |        |
|-------------------------------------|-----------------------|--------|--------|
| <b>Trocas pela envolvente</b>       | <b>Paredes (kW)</b>   | -8.4   | -10.2  |
|                                     | <b>Cobertura (kW)</b> | -8.4   | -9.1   |
|                                     | <b>Pavimento (kW)</b> | 5.5    | 1.1    |
| <b>Infiltração Exterior (kW)</b>    |                       | -12.4  | -13.9  |
| <b>Ventilação Mecânica (kW)</b>     |                       | -265.7 | -298.7 |
| <b>Potência de Aquecimento (kW)</b> |                       | 289.4  | 330.8  |

Tendo por base os dados acima apresentados, a potência necessária para manter as condições pretendidas no P2 é de 289.4 kW (186.1 W/m<sup>2</sup>) para 18°C e 330.8 kW (212.7 W/m<sup>2</sup>) para 20°C, representando um aumento de 14.3% da potência de aquecimento necessária, com o aumento de 2°C da temperatura do ar.

Para a temperatura de ar interior de 18 °C, a introdução de ar novo através de ventilação mecânica representa o maior impacto no balanço térmico, representando 91.8% (265.7 kW) das trocas de calor no espaço. As perdas de calor por infiltração e as trocas pela envolvente aparecem num segundo nível representando 4.3% (12.4 kW) e 3.9% (11.3 kW) das trocas de calor.

Relativamente à temperatura de ar interior de 20 °C, como expectável, verifica-se um aumento geral das perdas térmicas em todos os níveis avaliados, comparativamente à outra temperatura analisada. A introdução de ar novo através da ventilação mecânica apresenta um aumento de 12.4%, representando 90.3% (298.7 kW) do total das trocas de calor. Seguem-se as perdas pela envolvente com um aumento de 61.1% (6.9 kW), verificando-se uma diminuição de 80.00% dos ganhos de calor pelo pavimento, passando a contribuir com 1.1 kW de calor para o espaço, e as perdas de calor por infiltração com um aumento de 12.1% (1.5 kW).

#### 3.4.1.2 Pavilhão 3

Relativamente ao P3, na tabela 3.32 são apresentados em detalhe, os resultados obtidos para o balanço térmico deste espaço, para as temperaturas de ar interior 18°C e 20°C.

Tabela 3.32 - Resultados detalhados da simulação para o pavilhão 3, na estação de aquecimento

| <b>Pavilhão 3</b>                      |                       |           |       |
|--|-----------------------|-----------|-------|
| <b>Temperatura do ar (°C)</b>          | <b>18</b>             | <b>20</b> |       |
| <b>Temperatura Média Radiante (°C)</b> | 16.2                  | 17.2      |       |
| <b>Temperatura operativa (°C)</b>      | 17.1                  | 18.6      |       |
| <b>Trocas pela envolvente</b>          | <b>Paredes (kW)</b>   | -8.3      | -10.3 |
|  | <b>Cobertura (kW)</b> | -8.9      | -9.6  |
|  | <b>Pavimento (kW)</b> | 5.2       | 1.2   |
| <b>Infiltração Exterior (kW)</b>       | -11.7                 | -13.2     |       |
| <b>Ventilação Mecânica (kW)</b>        | -287.7                | -323.4    |       |
| <b>Potência de Aquecimento (kW)</b>    | 311.4                 | 355.3     |       |

Analisando os resultados obtidos, a potência de aquecimento necessária para manter as condições definidas na estação de aquecimento é de 311.4 kW (226.2 W/m<sup>2</sup>) para 18°C e 355.3 kW (258.1 W/m<sup>2</sup>) para 20°C, representando um aumento de 14.1% da potência de aquecimento necessária, com o aumento de 2 °C da temperatura do ar.

À semelhança dos resultados do P2, verifica-se para ambas as temperaturas que as perdas de calor verificadas são, maioritariamente, resultantes da introdução de ar novo no espaço, representando 92.4% (287.7 kW) e 91.0% (323.4 kW) dessas perdas, para os 18 °C e 20 °C, respetivamente.

Verifica-se igualmente a tendência de aumento das restantes perdas de calor com a subida da temperatura, apresentando as perdas pela envolvente um aumento de 55.8% (6.7 kW) e as perdas por infiltração de ar exterior um incremento de 12.8% (1.5 kW).

#### 3.4.1.3 Pavilhão 4

Na tabela 3.33 são apresentados, detalhadamente, as diferentes variáveis do balanço térmico resultante da simulação para o P4, para as temperaturas de 18 °C e 20 °C.

Tabela 3.33 - Resultados detalhados da simulação para o pavilhão 4, na estação de aquecimento

| <b>Pavilhão 4</b>                      |                       |           |       |
|--|-----------------------|-----------|-------|
| <b>Temperatura do ar (°C)</b>          | <b>18</b>             | <b>20</b> |       |
| <b>Temperatura Média Radiante (°C)</b> | 16.1                  | 17.2      |       |
| <b>Temperatura operativa (°C)</b>      | 17.1                  | 18.6      |       |
|  | <b>Paredes (kW)</b>   | -12.5     | -15.2 |
| <b>Trocas pela envolvente</b>          | <b>Cobertura (kW)</b> | -11.8     | -12.8 |
|  | <b>Pavimento (kW)</b> | 7.9       | 2.0   |
| <b>Infiltração Exterior (kW)</b>       | -17.1                 | -19.2     |       |
| <b>Ventilação Mecânica (kW)</b>        | -196.2                | -220.6    |       |
| <b>Potência de Aquecimento (kW)</b>    | 229.7                 | 265.8     |       |

Considerando os valores apresentados na tabela, a energia de aquecimento necessária para manter as condições pretendidas para a estação de aquecimento é de 229.7 kW (105.7 W/m<sup>2</sup>) e de 265.8 kW (122.3 W/m<sup>2</sup>) para 18°C e 20°C, respetivamente, representando um aumento de 15.7% da potência de aquecimento necessária, com o aumento de 2°C da temperatura do ar.

Reforça-se a tendência verificada anteriormente nos outros 2 espaços em análise, de aumento das perdas com a subida da temperatura e, que as perdas de calor verificadas são, maioritariamente, resultantes da introdução de ar novo no espaço, representando 85.4% (196.2 kW) e 83.0% (220.6 kW) dessas perdas, seguindo-se as perdas pela envolvente, com um peso menos significativo.

#### 3.4.1.4 Síntese dos resultados obtidos

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que, o aumento de temperatura tem um impacto aproximadamente igual nas potências de aquecimento dos três espaços analisados, verificando-se adicionalmente que, para as duas temperaturas de ar interior simuladas, as temperaturas operativas obtidas para os diferentes espaços estão dentro do intervalo sugerido pela CIBSE de 16°C a 19°C.

Na tabela 3.34, de forma a resumir a informação obtida na simulação, são apresentados os valores das cargas térmicas de aquecimento para os diferentes pavilhões do edifício da MREF.

Tabela 3.34 - Cargas térmicas de aquecimento para os diferentes pavilhões da MREF

| Espaço | Potência de Aquecimento (kW) |          | Variação com o aumento de temperatura de 2°C (%) |
|--------|------------------------------|----------|--|
|        | T = 18°C                     | T = 20°C |  |
| P1     | 163.0                        | 189.7    | 16.4   |
| P2     | 289.4                        | 330.8    | 14.3   |
| P3     | 311.4                        | 355.3    | 14.1   |
| P4     | 229.7                        | 265.8    | 15.7   |
| P6     | 150.4                        | 173.9    | 15.6   |
| P7     | 189.1                        | 217.4    | 15.0   |

Verifica-se que o P1 tem as menores necessidades de aquecimento, as quais para ambas as temperaturas, podem ser facilmente mitigadas pela UTAN instalada neste espaço, mesmo na ausência de ganhos internos, considerando que esta apresenta uma potência de aquecimento útil de 170 kW.

O P6 e P7, especialmente este último, apresentam maiores necessidades de aquecimento comparativamente ao P1, no entanto, a conjugação da atividade das UTAN's e os ganhos internos que são gerados devido à atividade dos equipamentos inseridos nestes espaços, permitem dar resposta a essas necessidades.

No anexo 6.5, são apresentados os resultados da simulação para a estação de aquecimento para os diferentes pavilhões.

Convém salientar que a metodologia de cálculo das cargas térmicas do EnergyPlus não se adequa devidamente aos espaços de interesse deste estudo, uma vez que, sendo estes dominados por ganhos internos, a não consideração desta componente no balanço térmico, não permite tirar as devidas conclusões sobre verdadeira grandeza das trocas de calor para as condições de projeto na estação de aquecimento.

Observando os valores obtidos para as potências de aquecimento necessárias para os três espaços, e comparando-os com os ganhos internos descritos anteriormente neste estudo, é possível concluir, que devido à sua grandeza, estes facilmente compensam as necessidades de aquecimento, ao ponto de criar nesses espaços, em períodos de intensa atividade produtiva e condições de temperatura exterior não inferiores as 12.6°C, uma necessidade de arrefecimento devido ao seu excesso, reforçando desta forma a dominância que o arrefecimento tem ao nível climatização destas naves fabris.

### 3.4.2 Potência de arrefecimento

O cálculo das necessidades de arrefecimento permite conhecer o valor das cargas térmicas específicas dos diferentes espaços, resultantes do diferencial de temperatura entre o ar exterior, o edifício e as suas cargas internas, e conseqüentemente, determinar a potência térmica necessária para remover essas cargas térmicas, mantendo assim os espaços nas condições interiores definidas. Por conseguinte, é possível definir qual a potência necessária para os equipamentos de arrefecimento responderem às condições climáticas do local em estudo.

Estes cálculos são realizados utilizando o módulo *Cooling Design* do DesignBuilder, assumindo a temperatura exterior constante, ausência de vento, transmissão de calor por convecção e condução entre as zonas com diferentes temperaturas, a ocorrência de ganhos solares através da envolvente envidraçada e pela ventilação natural e ganhos internos de ocupação, iluminação e equipamentos.

O módulo *Cooling Design* simulou as condições dos diferentes espaços para o período compreendido entre Abril e Setembro, tendo o valor máximo da carga térmica de arrefecimento sido atingido às 14:00 h, do dia 10 de Julho, para as condições de temperatura exterior de projeto definida de 30.9°C.

#### 3.4.2.1 Pavilhão 2

Na tabela 3.35 é possível visualizar o balanço térmico do P2, sendo apresentado em detalhe, os valores característicos da simulação para o respetivo instante, para as temperaturas de 26°C e 28°C. O balanço térmico tem como variáveis as perdas pela envolvente, as parcelas correspondentes à ventilação e aos ganhos internos resultantes da ocupação, iluminação e equipamentos, e a energia necessária extrair pelo sistema de AVAC.

Tabela 3.35 - Resultados detalhados da simulação para o pavilhão 2 (14:00h de 10 de Julho)

| <b>Pavilhão 2</b>                              |                          |           |       |
|--|--------------------------|-----------|-------|
| <b>Temperatura do ar (°C)</b>                  | <b>26</b>                | <b>28</b> |       |
| <b>Temperatura Média Radiante (°C)</b>         | 32.9                     | 34.2      |       |
| <b>Temperatura Operativa (°C)</b>              | 29.5                     | 31.1      |       |
| <b>Humidade relativa (%)</b>                   | 42.9                     | 38.3      |       |
| <b>Trocas pela envolvente</b>                  | <b>Paredes (kW)</b>      | -12.9     | -14.8 |
|  | <b>Cobertura (kW)</b>    | 8.4       | 7.8   |
|  | <b>Pavimento (kW)</b>    | -65.8     | -71.6 |
| <b>Ganhos internos</b>                         | <b>Ocupação (kW)</b>     | 1.9       | 1.5   |
|  | <b>Iluminação (kW)</b>   |           | 5.8   |
|  | <b>Equipamentos (kW)</b> |           | 624.5 |
| <b>Infiltração Exterior (kW)</b>               | 3.4                      | 2.0       |       |
| <b>Ventilação Mecânica (kW)</b>                | 77.9                     | 46.0      |       |
| <b>Potência de Arrefecimento Sensível (kW)</b> | -643.2                   | -601.2    |       |
| <b>Potência de Arrefecimento Total (kW)</b>    | -671.5                   | -628.1    |       |

Analisando os dados acima apresentados, para o valor máximo da carga térmica de arrefecimento, a potência total necessária para manter as condições pretendidas no P2 é de 671.5 kW (431.9 W/m<sup>2</sup>), para a temperatura interior de 26°C, correspondendo 643.2 kW (95.8%) dessa potência à fração sensível e, 628.1 kW (403.9 W/m<sup>2</sup>) para a temperatura interior de 28°C, sendo que, 601.2 kW (95.7%) dessa potência constituem a componente sensível.

Em termos gerais, o aumento de 2°C da temperatura do ar neste espaço, resulta numa diminuição de potência de arrefecimento necessária de 6.46% (43.4 kW).

Como seria expectável, o parâmetro que apresenta o maior peso na carga térmica a extrair do espaço é a potência térmica gerada pelos equipamentos. Relativamente às outras variáveis, para a temperatura de 26°C, a ventilação mecânica representa um ganho térmico de 77.9 kW e, a infiltração exterior, iluminação e ocupação apresentam ganhos de 3.4 kW, 5.8 kW e 1.9 kW, respetivamente, não tendo, portanto, um peso significativo na carga térmica, quando comparado com os parâmetros referidos anteriormente. É possível observar, que as trocas de calor pela envolvente, traduzem-se na sua globalidade em perdas de 70.3 kW, comprovando-se que a inércia térmica da envolvente é benéfica, induzindo um efeito de arrefecimento para o espaço em análise.

Para a temperatura de 28°C, a ventilação mecânica contribui para um ganho térmico de 46.0 kW, uma diminuição de 40.9% (31.9 kW) comparativamente à outra temperatura analisada, assim como as trocas de calor por infiltração com uma diminuição de 41.2% (1.4 kW), variações resultantes da redução do diferencial entre a temperatura de ar interior e a temperatura de bolbo seco exterior. O ganho resultante da ocupação apresenta uma diminuição de 21.0% (0.4 kW). No sentido contrário, verifica-se um aumento das trocas de calor pela envolvente, correspondendo a perdas de 78.6 kW, um incremento de 11.8%.

No entanto, se analisarmos as temperaturas operativas estimadas na simulação, verifica-se que apenas para a temperatura de 26°C se verifica uma temperatura ao limite de 30°C estabelecido.

#### 3.4.2.2 Pavilhão 3

Em seguida, na tabela 3.36, são apresentadas as diversas variáveis do balanço térmico resultante da simulação das condições de arrefecimento do P3, para as temperaturas de 26°C e 28°C.

Tabela 3.36 - Resultados detalhados da simulação para o pavilhão 3 (14:00h de 10 de Julho)

| <b>Pavilhão 3</b>                      |           |           |
|--|-----------|-----------|
| <b>Temperatura do ar (°C)</b>          | <b>26</b> | <b>28</b> |
| <b>Temperatura Média Radiante (°C)</b> | 33.3      | 34.6      |
| <b>Temperatura Operativa (°C)</b>      | 29.7      | 31.3      |
| <b>Humidade relativa (%)</b>           | 42.9      | 38.3      |

|  |                                  |        |       |
|--|----------------------------------|--------|-------|
|  | <b>Paredes (kW)</b>              | -11.0  | -13.1 |
| <b>Trocas pela envolvente</b>                  | <b>Cobertura (kW)</b>            | 12.9   | 12.1  |
|  | <b>Pavimento (kW)</b>            | -63.0  | -68.4 |
|  | <b>Ocupação (kW)</b>             | 0.8    | 0.7   |
| <b>Ganhos internos</b>                         | <b>Iluminação (kW)</b>           |        | 4.6   |
|  | <b>Equipamentos (kW)</b>         |        | 590.1 |
|  | <b>Infiltração Exterior (kW)</b> | 3.2    | 1.9   |
| <b>Ventilação Mecânica (kW)</b>                | 84.4                             | 49.9   |       |
| <b>Potência de Arrefecimento Sensível (kW)</b> | -622.0                           | -577.8 |       |
| <b>Potência de Arrefecimento Total (kW)</b>    | -649.6                           | -603.8 |       |

Considerando os dados apresentados, para o valor máximo da carga térmica de arrefecimento, a potência total necessária para manter as condições pretendidas no P3 é de 649.6 kW (471.8 W/m<sup>2</sup>) para os 26°C e, 603.8 kW (438.5 W/m<sup>2</sup>) para os 28°C, correspondendo a uma diminuição de 7.1% da potência de arrefecimento, com o aumento de 2°C das temperatura do ar. Dessas potências, 622.0 kW (95.8%) e 577.8 (95.%) representam, respetivamente, a componente sensível para as temperaturas de 26°C e 28°C.

O parâmetro que representa a maior parcela da carga térmica a extrair do espaço é a potência térmica gerada pelos equipamentos, representando 590.1 kW dessa carga.

Para a temperatura de 26°C, a ventilação mecânica representa um ganho térmico de 84.4 kW, a iluminação e as trocas por infiltração exterior apresentam ganhos de 4.6 kW e 3.2 kW, respetivamente, e as trocas de calor pela envolvente, resultam em perdas de 61.1 kW.

Comparativamente, analisando a temperatura de 28°C, a ventilação mecânica contribui para um ganho térmico de 49.9 kW, correspondendo a uma diminuição de 40.9% (34.5 kW), a infiltração natural de ar exterior com 1.9 kW, uma diminuição de 40.6% (1.3 kW) e, os ganho resultante da ocupação com 0.7 kW, apresentando uma diminuição de

12.5% (0.1 kW). Contrariamente, verifica-se um aumento das trocas de calor pela envolvente, traduzindo-se em perdas de calor de 69.4kW, um incremento de 13.6% (8.3 kW).

Relativamente às temperaturas operativas estimadas na simulação, verifica-se mais uma vez que apenas para a temperatura de 26°C se verifica uma temperatura ao limite de 30°C estabelecido.

### 3.4.2.3 Pavilhão 4

Na tabela 3.37 é apresentado o balanço térmico do P4, sendo apresentado em detalhe, os valores característicos da simulação, para as temperaturas de 26°C e 28°C.

Tabela 3.37 - Resultados detalhados da simulação para o pavilhão 4 (14:00h de 10 de Julho)

| <b>Pavilhão 4</b>                      |                          |           |       |
|--|--------------------------|-----------|-------|
| <b>Temperatura do ar (°C)</b>          | <b>26</b>                | <b>28</b> |       |
| <b>Temperatura Média Radiante (°C)</b> | 28.5                     | 29.3      |       |
| <b>Temperatura Operativa (°C)</b>      | 27.2                     | 28.7      |       |
| <b>Humidade relativa (%)</b>           | 43.1                     | 38.6      |       |
| <b>Trocas pela envolvente</b>          | <b>Paredes (kW)</b>      | -11.8     | -14.0 |
|  | <b>Cobertura (kW)</b>    | 15.6      | 14.8  |
|  | <b>Pavimento (kW)</b>    | -63.8     | -68.9 |
| <b>Ganhos internos</b>                 | <b>Ocupação (kW)</b>     | 2.1       | 1.7   |
|  | <b>Iluminação (kW)</b>   | 6.0       |       |
|  | <b>Equipamentos (kW)</b> | 376.2     |       |
| <b>Infiltração Exterior (kW)</b>       | 4.7                      | 2.8       |       |
| <b>Ventilação Mecânica (kW)</b>        | 57.5                     | 34.0      |       |

|  |        |        |
|--|--------|--------|
| <b>Potência de Arrefecimento Sensível (kW)</b> | -386.5 | -352.6 |
| <b>Potência de Arrefecimento Total (kW)</b>    | -407.6 | -372.3 |

A partir da análise dos resultados obtidos é possível constatar que, a potência total de arrefecimento necessária para manter as condições pretendidas no P4 é, para a temperatura de 26°C de 407.6 kW (187.6 W/m<sup>2</sup>) e para a temperatura de 28°C de 372.3 kW (165.4 W/m<sup>2</sup>), apresentando como seria expectável, uma necessidade de arrefecimento inferior, comparativamente aos restantes espaços analisados. Dessas potências, 386.5 kW (94.8%) e 352.6 kW (94.7%) representam, respetivamente, a componente sensível do arrefecimento para as temperaturas de 26°C e 28°C. Neste caso, o aumento de 2°C da temperatura do ar induz uma diminuição de 8.7% da potência de arrefecimento, confirmando-se a tendência verifica nos restantes espaços.

Semelhante aos dois espaços anteriormente analisados, a potência térmica gerada pelos equipamentos, continua a representar a maior parcela da carga térmica a extrair do espaço, mais especificamente, 376.2 kW dessa carga.

Para a temperatura de 26°C, a ventilação mecânica, causa um ganho térmico de 57.5 kW e, a iluminação e as trocas por infiltração exterior, 6.0 kW e 4.7 kW, respetivamente, e trocas pela envolvente correspondem a perdas de 60.00 kW.

Já na temperatura de 28°C, os resultados estão alinhados com os dados obtidos nos restantes espaços, verificando-se com o aumento da temperatura, uma diminuição considerável dos ganhos decorrentes da atividade de renovação de ar por parte da ventilação mecânica, de 40.9% (23.5 kW) e, uma diminuição de 40.4% (1.9 kW) e 19.0% (0.4 kW) dos ganhos decorrentes das trocas por infiltração e de ocupação, respetivamente. As trocas de calor pela envolvente apresentam um aumento de 13.5% (8.1 kW).

Contrariamente aos restantes espaços analisados anteriormente, o limite de temperatura operativa estabelecido é cumprido para as duas temperaturas de ar interior simuladas.

No anexo 6.6, é possível consultar toda a informação resultante das simulações das diferentes temperaturas na estação de arrefecimento, para os diferentes pavilhões.

#### 3.4.2.4 Conforto térmico

Complementarmente à análise das potências de arrefecimento, do ponto de vista do conforto térmico expectável para as temperaturas do ar de 26°C e 28°C, verifica-se que os valores de humidade relativa observados se encontram dentro do intervalo de 38-44%, os quais estão na faixa de valores considerados aceitáveis de 30-70%. No entanto, a simulação das condições de funcionamento e atividade das diversas máquinas de

impressão não é possível de ser realizada no software de simulação, podendo o nível de humidade relativa verificado no contexto real desses espaços ser diferente, pelo que os valores obtidos não devem ser tomados em consideração, reforçando todavia que, este parâmetro só tem influência no conforto térmico quando conjugadas altas temperaturas e altos índices de humidade relativa, condições não expectáveis nestes espaços.

Devem-se salientar, no entanto, as temperaturas médias radiantes estimadas nas diferentes simulações, as quais são significativamente superiores à temperatura do ar interior, no P2 e P3, incrementam o valor da temperatura operativa para valores superiores ao limite estabelecido de 30°C para a temperatura do ar interior de 28°C.

Na tabela 3.38 é apresentada uma síntese das temperaturas médias radiantes e temperaturas operativas, obtidas para as diferentes temperaturas de ar interior simuladas para os espaços em análise.

Tabela 3.38 - Temperaturas médias radiantes e temperaturas operativas, obtidas para as diferentes temperaturas de ar interior

|  | P2       |          | P3       |          | P4       |          |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|  | T = 26°C | T = 28°C | T = 26°C | T = 28°C | T = 26°C | T = 28°C |
| <b>Temperatura Média Radiante (°C)</b> | 32.9     | 34.2     | 33.3     | 34.6     | 28.5     | 29.3     |
| <b>Temperatura Operativa (°C)</b>      | 29.5     | 31.1     | 29.7     | 31.3     | 27.2     | 28.7     |

Através destes dados é possível constatar que o aumento de 2°C da temperatura do ar interior resulta no aumento, em média, de 5.2% da temperatura operativa. Observa-se que no P4, para os dois níveis de temperatura de ar interior simulados, obtém-se uma temperatura operativa inferior ao limite estabelecido. No sentido contrário, no P2 e P3 apenas é garantida uma temperatura operativa inferior a 30°C para a temperatura do ar de 26°C, pelo que para estas duas naves fabris, a temperatura do ar interior nunca deverá ser superior aquela.

Para efeitos comparativos, recorrendo novamente ao módulo *Cooling Design* e parametrizando as condições de simulação do P2 e P3 para o controlo da temperatura operativa, na tabela 3.39 é apresentada uma síntese das temperaturas médias radiantes, temperaturas de ar interior e potências de arrefecimento necessárias para garantir uma temperatura operativa de 28°C.

Tabela 3.39 - Temperaturas médias radiantes, temperaturas do ar interior e potências de arrefecimento para a temperatura operativa de 28°C

|   | <b>P2</b>                | <b>P3</b>                |
|---|--------------------------|--------------------------|
|   | $T_o = 28^\circ\text{C}$ | $T_o = 28^\circ\text{C}$ |
| <b>Temperatura Média Radiante (<math>^\circ\text{C}</math>)</b> | 31.9                     | 32.2                     |
| <b>Temperatura do ar (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>          | 24.1                     | 23.8                     |
| <b>Potência de Arrefecimento Total (kW)</b>                     | 713.8                    | 702.9                    |

Após a análise dos resultados obtidos, verifica-se que a diminuição das temperaturas operativas observadas para 28°C, exigiria a diminuição da temperatura do ar interior do P2 para 24.1°C e 23.8°C no P3, podendo-se concluir que, a obtenção de temperaturas operativas a esse nível para as condições de projeto estabelecidas, requereria a obtenção de níveis de temperatura de ar dificilmente praticáveis no ambiente industrial da MREF, atendendo às potências de arrefecimento das unidades de tratamento de ar afetas a esses espaços.

#### 3.4.2.5 Determinação das necessidades energéticas em arrefecimento

O ponto de vista energético, especialmente tratando-se de um edifício industrial caracterizado por grandes necessidades a esse nível, é de crucial importância, pelo que as possíveis poupanças energéticas resultantes da manutenção da temperatura do ar interior a uma temperatura superior podem ser significativas.

Na tabela 3.40 são apresentadas as necessidades energéticas anuais de arrefecimento simuladas, recorrendo ao módulo de simulação *Hourly Weather Data Simulation* do *DesignBuilder*, para as temperaturas de ar interior de 26°C e 28°C, nas diferentes naves fabris. A análise efetuada tem apenas em consideração as necessidades energéticas de arrefecimento a fornecer pelo sistema de ventilação e climatização, não sendo contabilizadas as eficiências dos diferentes equipamentos desse sistema.

Tabela 3.40 - Necessidades energéticas anuais de arrefecimento, em kWh

|  |                 | <b>P2</b> | <b>P3</b> | <b>P4</b> |
|--|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Necessidades energéticas de Arrefecimento (kWh)</b> | <b>T = 26°C</b> | 3 482 588 | 3 199 918 | 1 914 875 |
|  | <b>T = 28°C</b> | 3 414 138 | 3 143 365 | 1 838 330 |

É possível observar que as necessidades energéticas para arrefecimento no P4 são consideravelmente inferiores às verificadas no P2 e P3, as quais se encontram a um nível aproximado. Como seria expectável, as necessidades energéticas de arrefecimento são superiores para a temperatura de 26°C, verificando-se uma redução da energia necessária com o aumento de temperatura para 28°C, de 2.0% (68450 kWh) no P2, 1.8% (56 553 kWh) no P3 e 4.0% (76 545 kWh) no P4.

Adicionalmente, na tabela 3.41 é realizada a comparação das necessidades energéticas anuais de arrefecimento simuladas para obter uma temperatura operativa de 28°C no P2 e P3, com as necessidades energéticas para uma temperatura de ar interior de 26°C.

Tabela 3.41 - Análise comparativa entre as necessidades energéticas anuais de arrefecimento, em kWh, para a temperatura operativa de 28°C e para a temperatura de ar interior de 26°C

|                             | <b>P2</b>  | <b>P3</b>  |
|-----------------------------|------------|------------|
|                             | <b>kWh</b> | <b>kWh</b> |
| <b>T<sub>o</sub> = 28°C</b> | 3 510 622  | 3 220 547  |
| <b>T = 26°C</b>             | 3 482 588  | 3 199 918  |
| <b>Diferença</b>            | 28 034     | 20 629     |

As necessidades energéticas de arrefecimento são superiores para garantir uma temperatura operativa de 28°C, verificando-se um aumento da energia necessária com a inerente diminuição das temperaturas do ar para garantir essa temperatura operativa, de 0.8% (28 034 kWh) no P2 e 0.6% (20 629 kWh) no P3.

Considerando que a energia térmica de arrefecimento necessária para os diferentes espaços é obtida através de água refrigerada, a qual é um subproduto do processo de produção de energia elétrica na central de cogeração da MRI, esta empresa não estabelece qualquer custo para a sua distribuição à MREF, conseqüentemente, não será

realizada qualquer análise económica à variação das necessidades energéticas em arrefecimento com o aumento da temperatura.

No anexo 6.7, é possível consultar os resultados das simulações das necessidades energéticas resultante das simulações das diferentes temperaturas na estação de arrefecimento, para os diferentes pavilhões.

#### 3.4.2.6 Discussão dos resultados obtidos

Na tabela 3.42 é apresentado um resumo da informação obtida na simulação, sendo apresentados os valores de potência total de arrefecimento e as respetivas temperaturas operativas para os diferentes pavilhões do edifício da MREF.

Tabela 3.42 - Potência total de arrefecimento para os diferentes pavilhões do edifício da MREF

| Espaço | Potência total de Arrefecimento (kW) |          | Temperatura Operativa |          |
|--------|--------------------------------------|----------|-----------------------|----------|
|        | T = 26°C                             | T = 28°C | T = 26°C              | T = 28°C |
| P1     | 1.5                                  | 1.5      | 25.4                  | 25.4     |
| P2     | 671.6                                | 628.1    | 29.5                  | 31.1     |
| P3     | 649.6                                | 603.8    | 29.7                  | 31.3     |
| P4     | 407.6                                | 372.3    | 27.2                  | 28.7     |
| P6     | 100.8                                | 74.8     | 25.1                  | 26.5     |
| P7     | 214.6                                | 186.5    | 26.4                  | 27.9     |

Verifica-se que o P1, para as duas temperaturas analisadas, não apresenta qualquer necessidade de arrefecimento, mantendo uma temperatura operativa próxima dos 25°C, unicamente através das trocas pela envolvente e dos reduzidos ganhos térmicos resultantes da iluminação e da baixa taxa de ocupação.

O P6 tem a menor carga térmica de arrefecimento das naves fabris de produção, a qual pode ser facilmente mitigada pela UTAN instalada neste espaço, considerando que esta apresenta uma potência de arrefecimento total de 215 kW, conseguindo manter temperaturas operativas a rondar os 26°C. Relativamente ao P7, tendo em conta que a UTAN afeta a este espaço tem uma potência útil de arrefecimento de 209.9 kW, a temperatura de ar interior de 26°C não pode ser garantida, contudo, a temperatura de

ar de 28°C, garante uma temperatura operativa inferior a 28°C, valor bastante satisfatório e dentro das capacidades de arrefecimento da UTAN.

No entanto, é preciso considerar que o detalhe da parametrização destes espaços não foi tão rigoroso como para os espaços críticos de análise, especificamente, na estimação dos ganhos internos, logo podem existir uma ligeira discrepância dos resultados obtidos quando comparados com a situação real destes espaços.

Na tabela 3.43 é realizada uma análise comparativa entre a potência de arrefecimento instalada atualmente, a potência com a solução proposta e a potência necessária para as temperaturas do ar interior de 26°C e 28°C, no P4.

Tabela 3.43 - Análise comparativa entre as potências de arrefecimento da solução proposta e necessária para o P4, para as temperaturas do ar interior de 26°C e 28°C

| Pot. de arref. inst. (kW) | Renov. de ar por hora | Pot. de arref. solução proposta (kW) | Recirc. de ar por hora | Tar (°C) | Pot. de arref. necessária (kW) | Dif. (kW) |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|----------|--------------------------------|-----------|
| 639.9                     | 4.60                  | 424.9                                | 3.07                   | 26       | 407.6                          | 17.3      |
|                           |                       |                                      |                        | 28       | 372.3                          | 52.6      |

Relativamente ao P4, para ambas as temperaturas de ar simuladas são obtidas temperaturas operativas inferiores ao limite de 30°C e verifica-se um excedente de potência de arrefecimento de 17.3 kW para 26°C e 52.6 kW para 28°C, pelo que a solução proposta para esta nave fabril é válida.

Por último, na tabela 3.44 é realizada uma análise comparativa entre a potência de arrefecimento instalada atualmente, a potência com a solução proposta e a potência necessária para as temperaturas do ar interior de 26°C para o P2 e P3, sendo desprezada a temperatura de 28°C, uma vez que esta não garante uma temperatura operativa inferior ao limite de 30°C.

Tabela 3.44 - Análise comparativa entre as potências de arrefecimento da solução proposta e necessária para o P2 e P3 para a temperatura do ar interior de 26°C

| Espaço | Pot. de arref. inst. (kW) | Renov. de ar por hora | Pot. de arref. solução proposta (kW) | Recirc. de ar por hora | Pot. de arref. necessária (kW) | Dif. (kW) |
|--------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------|
| P2     | 645                       | 6.43                  | 645                                  | 6.43                   | 671.6                          | -26.6     |
| P3     | 430                       | 4.84                  | 645                                  | 7.26                   | 649.6                          | -4.6      |

A partir da análise dos dados presente na tabela anterior, verifica-se um défice da potência de arrefecimento necessária de 26.6 kW para o P2 e 4.6kW para o P3, quando comparada a potência de arrefecimento da solução proposta e a potência necessária resultante da simulação. Convém ainda mencionar o défice de 219.6 kW que se verifica

na instalação atual do P3, justificando desta forma a proposta de instalação de uma unidade de tratamento de ar adicional neste espaço.

Pode-se concluir com estes resultados, que o sistema de climatização da solução proposta para estes espaços, com base nas características de arrefecimento das UTAN atualmente instaladas, não teria capacidade para fazer face às necessidades significativas de remoção das cargas térmicas decorrentes do processo produtivo para as condições simuladas, sendo necessário, adicionalmente, proceder à instalação de baterias de arrefecimento com uma maior potência de arrefecimento nas UTA's A e B.

Recorrendo ao software de modelação SystemAir CAD, na figura 3.19 é apresentado o esquema de instalação tipo para as unidades de tratamento de ar propostas, sendo estabelecido pelo software, com base nas características das unidades atualmente instaladas, um limite de 260.5 kW de potência total para as baterias de arrefecimento, valor este que será assumido para a proposta de solução, considerando que a climatização destes espaços é de crucial importância e sobrepõe-se à climatização de outros espaços com menores necessidades e, adicionalmente, compensar possíveis variações que poderão existir entre a simulação e a contexto real destes espaços e, a crescente tendência de ocorrência de condições de calor extremas resultante das alterações climáticas.

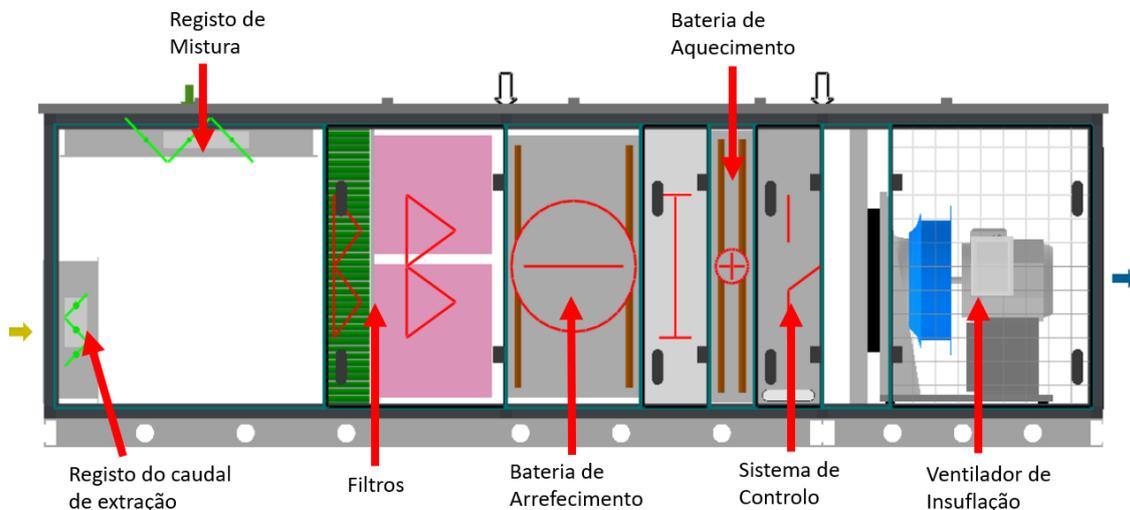


Figura 3.19 - Esquema de instalação das UTA's A, B e C

Na tabela 3.45 é realizada novamente, uma análise comparativa entre a potência de arrefecimento com o dimensionamento das baterias de arrefecimento proposto e a potência necessária para as temperaturas do ar interior de 26°C para o P2 e P3.

Tabela 3.45 - Análise comparativa entre as potências de arrefecimento da solução proposta e necessária para o P2 e P3 para a temperatura do ar interior de 26°C

| <b>Espaço</b> | <b>Pot. de arref. solução proposta (kW)</b> | <b>Recirc. de ar por hora</b> | <b>Pot. de arref. necessária (kW)</b> | <b>Dif. (kW)</b> |
|---------------|---|-------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| P2            | 690.5                                       | 6.43                          | 671.6                                 | 18.9             |
| P3            | 690.5                                       | 7.26                          | 649.6                                 | 40.9             |

A partir da análise dos dados presentes na tabela anterior, observa-se um excedente de potência de arrefecimento 18.9 kW no P2 e 40.9 kW no P3, garantindo assim a capacidade do sistema proposto para assegurar as condições de temperatura do ar interior que permitem respeitar o limite de temperatura operativa estabelecido de 30°C. Confirma-se igualmente que, as potências de arrefecimento necessárias para garantir uma temperatura operativa máxima de 28°C nestes espaços, não são possíveis de alcançar, sendo necessário uma reconfiguração total do dimensionamento destas unidades, resultando na necessidade de insuflação de um caudal de ar maior, condição esta não aceitável.

Com base em projeções após consulta com a SystemAir, esta proposta de solução resultaria num investimento necessário de aproximadamente 80 000 €, não sendo contabilizado o custo de instalação das condutas de retorno e todos os elementos estruturais complementares, o que representaria um investimento superior a 100 000 €, pelo que é necessário ponderar por parte da MREF se este investimento necessário se enquadra com os objetivos futuros da empresa e dos seus colaboradores.

No anexo 6.8, é possível consultar as informações gerais das UTA's modeladas no software SystemAir CAD.

### 3.5 Admissão Direta de Ar para as Máquinas de Impressão

Decorrente das análises realizadas anteriormente, neste subcapítulo é estudada uma possível medida alternativa a implementar com vista à otimização do sistema de climatização, nomeadamente, a admissão direta de ar para as máquinas de impressão.

Recordando a análise ao balanço dos caudais de ar nos diferentes espaços de interesse neste estudo, verificou-se que existe um défice considerável de insuflação de ar pelas UTAN's no P3, não sendo dada resposta às necessidades de caudal de ar das diferentes máquinas de impressão presentes nesse espaço.

Uma alternativa interessante para colmatar este problema, seria a possibilidade de as máquinas de impressão extraírem diretamente do exterior e efetuar o tratamento do ar necessário para a secagem dos filmes de plástico. Com o auxílio da empresa EVAC, foi

realizado um estudo de uma solução construtiva que, permitiria dotar as máquinas de impressão dessa capacidade.

Assumindo como base deste estudo a máquina de impressão C6, localizada no P3, a solução proposta consistiria numa unidade de tratamento de ar novo linear com montagem exterior, baseada no modelo de unidade instalado na MREF (UTA 50D Plus 50) e cujo esquema representativo pode ser visualizado na figura 3.20.

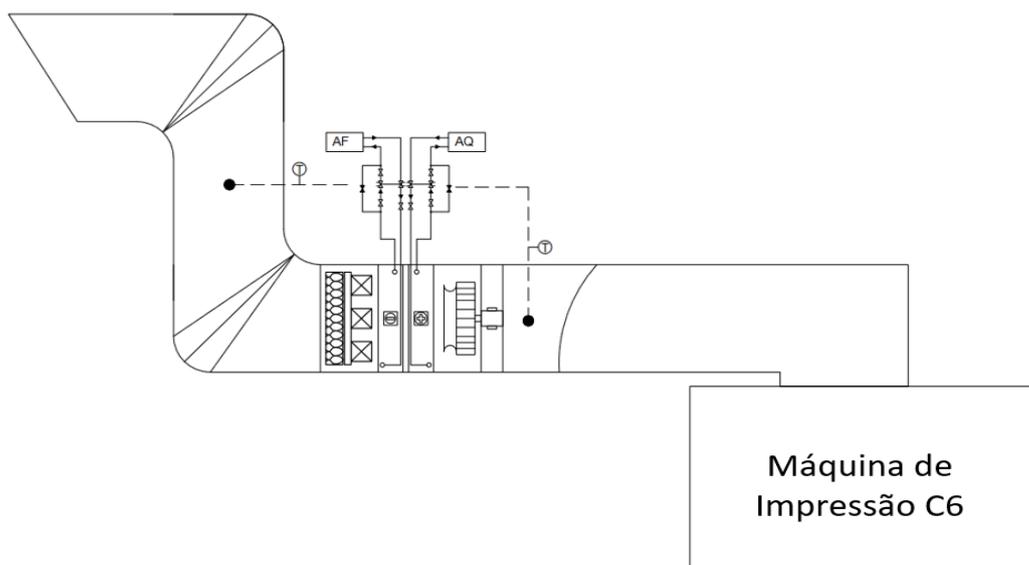


Figura 3.20 - Esquema representativo da solução de captação de ar exterior para a máquina de Impressão C6

Considerando as temperaturas exteriores que se verificam no Porto, já referenciadas anteriormente, esta unidade seria dotada de uma bateria de aquecimento, um reforço do nível de filtragem, comparativamente às unidades base ( G4 + M5 + F7), registos de caudal nas entradas e saídas da unidade (admissão de ar novo e insuflação) e sondas de temperatura e humidade. Possuiria adicionalmente, uma secção de humedificação dotada de lança difusora de vapor e humidificador a vapor de eléctrodos, com uma capacidade de humedificação de 65 kgv/h e uma potência elétrica de 50 kW.

As diferentes características desta unidade podem ser consultadas na tabela 3.46.

Tabela 3.46 - Características da unidade de tratamento de ar proposta

| <b>Modelo</b>                         | <b>EVAC UTA 50D Plus 50</b> |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Localização /Montagem                 | Exterior                    |
| Tipo                                  | Horizontal                  |
| Caudal Insuflação (m <sup>3</sup> /h) | 15 000                      |
| Caudal Extração (m <sup>3</sup> /h)   | 0                           |
| Filtros Plano /Saco                   | G4 + M5 + F7                |
| Recuperação Calor                     | Não                         |

|   |                |
|---|----------------|
| Humidificação   | Sim            |
| <b>Bateria Aquecimento</b>                              |                |
| Entrada – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %) | 3 / 80         |
| Saída – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %)   | 23.3 / 21      |
| Temp. Fluido in/out (°C)                                | 80 / 60        |
| Caudal Fluido Primário (l/h)                            | 4 392          |
| Potência Útil (kW)                                      | 99.98          |
| <b>Secção Humidificador</b>                             |                |
| Entrada – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %) | 20 / 26        |
| Saída – Temp. Bolbo Seco / Humidade Relativa (°C / %)   | 20.5 / 51      |
| Temp. água in/out (°C)                                  | 7 / 12         |
| Caudal de vapor (kg/h)                                  | 65             |
| <b>Motor Elétrico Insuflação</b>                        |                |
| Quantidade  | 2              |
| Potência (kW)   | 3.5            |
| Eficiência  | C              |
| Tensão (V)  | 400            |
| <b>Dimensões Unidade</b>                                |                |
| Comp/Largura/Alt (mm)                                   | 2960x2382x1100 |
| Peso (kg)   | 850            |

Em termos de materiais construtivos, a sua estrutura seria constituída por aço galvanizado plastificado no exterior e chapa de aço AZ185 no interior, apresentando uma proteção nas alhetas da bateria de forma a capacitar esta unidade de resistência a ambientes corrosivos.

Considerando as grandes variações de temperatura e humidade relativa do ar no Porto, ao longo do ano, na figura 3.21 é apresentada, a título de exemplo, a evolução psicométrica estimada para esta solução, para o regime de inverno, para dias de temperaturas baixas e nos quais se verifica a necessidade de se efetuar uma humidificação do ar captado.

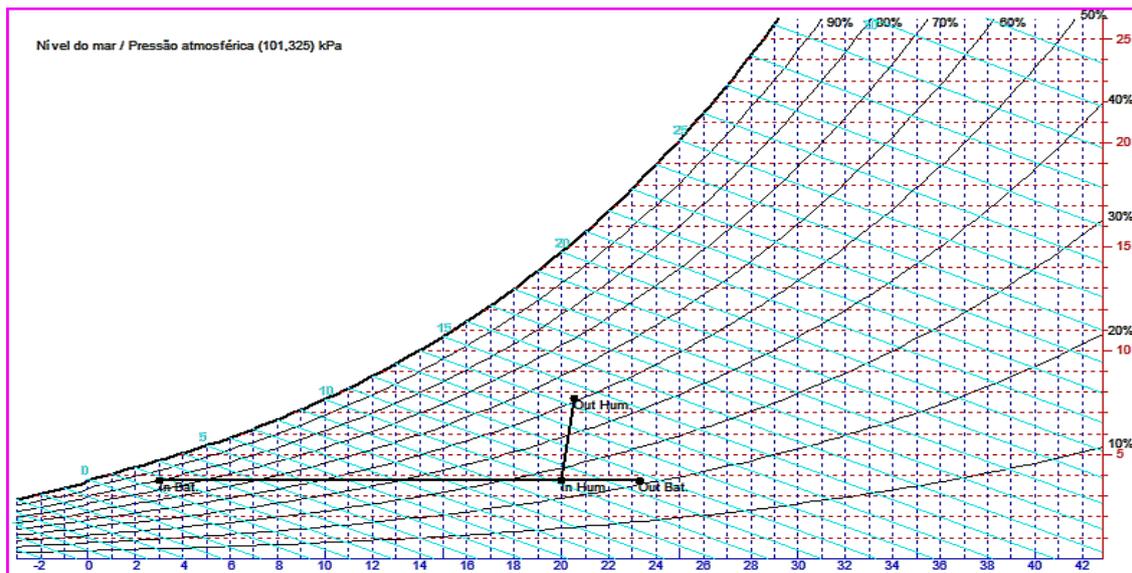


Figura 3.21 - Diagrama psicrométrico associado à solução proposta

Pode-se observar na figura que, para as condições estimadas, o ar seria captado do exterior a uma temperatura de 3°C e uma humidade relativa aproximada de 25% e após passagem na secção de aquecimento e humidificação da unidade de tratamento de ar, entraria na máquina de impressão a uma temperatura a ronda os 23.5°C, e teria uma humidade relativa próxima dos 50%.

Relativamente ao caudal de insuflação, esta unidade teria um caudal máximo de 15 000 m<sup>3</sup>/h, que comparado com o caudal de extração de ar medido para esta máquina de 14 314 m<sup>3</sup>/h, torna esta solução satisfatória.

Na tabela 3.47, é apresentado o balanço de caudais para o P3, considerando a implementação desta solução.

Tabela 3.47 - Balanço de caudais do P3, considerando a implementação da solução proposta

| Espaço | UTAN's | In                | Out               | dif.              | f.<br>simult. | Out               | dif.              |
|--------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|
|        |        | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h |               | m <sup>3</sup> /h | m <sup>3</sup> /h |
| P3     | 5, 7   | 40 000            | 76 642            | -36 642           | 0.6           | 45 985            | -5 985            |

Analisando os resultados obtidos, continuaria a existir um défice significativo de ar neste espaço, embora consideravelmente menor ao verificado na realidade, sendo consequentemente, necessária a instalação de uma outra unidade numa das restantes máquinas de impressão ou o aumento da capacidade de ventilação, de forma a garantir o nível de subpressão obtido na proposta de solução previamente analisada, pelo que o investimento necessário para colmatar as necessidades do espaço seria significativo. Em termos de custo, esta unidade representaria um investimento aproximado de 18 000€, ao qual tem de se acrescentar o custo de instalação das condutas e todos os elementos estruturais complementares, necessários à instalação da unidade, perfazendo um custo aproximado de 25 000 €.

Em suma, comparando esta solução com a alternativa de instalação de uma UTA adicional dedicada exclusivamente ao P3, tendo em conta o défice de potência de arrefecimento confirmado para esse espaço e, considerando que a unidade apenas estaria equipada para proceder ao aquecimento de ar, podendo a sua atividade contribuir para um aumento adicional das cargas térmicas verificadas, em termos de resultados e em termos económicos, esta solução não apresenta os mesmos benefícios, sendo claramente mais vantajoso a instalação da UTA adicional.

# CONCLUSÕES

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de Trabalhos Futuros



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

Esta tese debruçou-se, essencialmente, na análise das carências de insuflação, aquecimento e arrefecimento dos espaços que apresentam uma elevada necessidade de tratamento de ar e remoção das cargas térmicas decorrentes da atividade produtiva, nomeadamente, os pavilhões 2, 3 e 4.

Primeiramente, através da análise do balanço de caudais de insuflação de ar pelas UTAN's e de extração de ar pelas máquinas de impressão, verificou-se a existência de um défice de ar no P3, de 14 573 m<sup>3</sup>/h, confirmando que a insuflação de ar nesse espaço não satisfaz as necessidades das diferentes máquinas produtivas induzindo uma subpressão excessiva. Para os restantes espaços, verificou-se que o sistema de insuflação de ar tem capacidade de resposta para as necessidades de extração das máquinas de impressão, apresentando um excedente de ar de 6 547 m<sup>3</sup>/h no P2 e 13 736 m<sup>3</sup>/h no P4, resultando em níveis de subpressão excessivos e não desejáveis.

Como o objetivo de reduzir os desequilíbrios observados e simultaneamente criar no P2 e no P3 uma ligeira subpressão que limite a migração do ar dessas naves fabris para as restantes divisões do edifício, foram propostas as seguintes medidas:

- substituição da UTAN 1 do P2 por uma UTA A com recirculação, estabelecendo como ponto de funcionamento para essa unidade, a admissão de um caudal de ar constituído por 13 000 m<sup>3</sup>/h (65.0%) de ar novo e 7 000 m<sup>3</sup>/h (35.0%) de ar de recirculação;
- instalação de uma UTA B com recirculação no P3, estabelecendo como ponto de funcionamento para essa unidade, a admissão de um caudal de ar constituído por 14 000 m<sup>3</sup>/h (70.0%) de ar novo e 6 000 m<sup>3</sup>/h (30.0%) de ar de recirculação;

No caso do P4, sendo necessário adicionalmente considerar a influência da migração de ar do P6 para o P4, resultante da abertura permanente sem possibilidade de fecho entre estes espaços, e com o objetivo de obter a subpressão do P4 relativamente ao P6, seguiu-se a tendência das soluções anteriores, sendo proposto a instalação de uma UTA C com recirculação, estabelecendo como ponto de funcionamento para essa unidade a admissão de um caudal de ar constituído por 8 264 m<sup>3</sup>/h (41.3%) de ar novo e 11 736 m<sup>3</sup>/h (58.7%) de ar de recirculação, e na remoção das UTAN 6 e 8.

O novo balanço de caudais de ar com a aplicação destas propostas resulta num défice de ar de 453 m<sup>3</sup>/h no P2 e 574 m<sup>3</sup>/h no P3 e 18 000 m<sup>3</sup>/h no P4, correspondendo aos objetivos estabelecidos.

Contudo, embora a análise efetuada seja fundamental para obter informação sobre os níveis adequados de ventilação, considerou-se que esta seria bastante simplista ao contabilizar apenas as necessidades de ar das máquinas, ignorando outros parâmetros imprescindíveis para a criação de condições de conforto térmico minimamente aceitáveis, motivando a necessidade de recorrer a um software de simulação dinâmica para obter uma análise mais abrangente.

Considerando os possíveis efeitos da variação de temperatura do ar de um espaço no desempenho dos ocupantes e estabelecendo como limite máximo admissível uma temperatura operativa 30°C, para efeitos comparativos, foram definidas para simulação as temperaturas de 18°C e 20°C para o período de aquecimento e, as temperaturas de 26°C e 28°C para o período de arrefecimento.

Uma das grandes decisões deste estudo foi claramente a utilização do software DesignBuilder como ferramenta de simulação, tendo sido necessário um estudo exaustivo para utilização deste software. Do ponto de vista de simulação, o interface gráfico deste software é bastante apelativo permitindo ter uma perceção mais real do edifício. Deve ser salientado, no entanto que, esta ferramenta apresenta limitações comuns a outros softwares, nomeadamente a incapacidade da simulação exata do sistema de climatização instalado na Monteiro Ribas, acreditando, no entanto, que os resultados obtidos são uma boa aproximação à realidade.

Outra limitação que deve ser referida, é a não adequação da metodologia de cálculo de cargas térmicas no período de aquecimento do EnergyPlus, aos espaços de interesse deste estudo, uma vez que, sendo estes dominados por ganhos internos, ao não considerar esta componente no balanço térmico, não permite tirar as devidas conclusões sobre verdadeira grandeza das trocas de calor para as condições de projeto na estação de aquecimento. Comparando os valores obtidos para as potências de aquecimento necessárias para os três espaços de interesse, com os ganhos internos associados a estes, foi possível concluir, que devido à sua grandeza, estes facilmente compensariam as necessidades de aquecimento, ao ponto de criar nesses espaços, em períodos de intensa atividade produtiva e condições de temperatura exterior não inferiores as 12.6°C, uma necessidade de arrefecimento, reforçando a grande importância que o processo de arrefecimento tem ao nível da climatização destas naves fabris.

Decorrente da análise subsequente das necessidades de arrefecimento, verificou-se que no P4, para ambas as temperaturas de ar simuladas são obtidas temperaturas operativas inferiores ao limite de 30°C, observando-se um excedente de potência de arrefecimento instalada de 17.3 kW para 26°C e 52.6 kW para 28°C relativamente à potência necessária, validando a solução proposta para esta nave fabril. Adicionalmente, do

ponto de vista energético constatou-se que a manutenção deste espaço a uma temperatura de 28°C resulta numa redução das necessidades energéticas anuais para arrefecimento de 76 545 kWh (4.0%).

No sentido contrário, no P2 e P3, apenas para temperaturas de ar interior de 26°C se obtém temperaturas operativas inferiores ao limite estabelecido de 30°C. Contudo, para esta temperatura observa-se um défice da potência de arrefecimento necessária de 26.6 kW para o P2 e 4.6 kW para o P3, quando comparada a potência de arrefecimento da solução proposta e a potência necessária resultante da simulação. Como tal, o sistema de climatização proposto para estes espaços não teria capacidade para fazer face às necessidades significativas de remoção das cargas térmicas decorrentes do processo produtivo para as condições simuladas, sendo necessário, adicionalmente, proceder à instalação de baterias de arrefecimento com uma maior potência de arrefecimento nas UTA's A e B.

Com recurso ao software SystemAir CAD foram modeladas as UTA's idealizadas nas propostas apresentadas, sendo estabelecido para o P2 e para o P3, unidades com uma potência de arrefecimento total de 260.5 kW, que se traduz num excedente de potência de arrefecimento 18.9 kW no P2 e 40.9 kW no P3, garantindo assim a capacidade do sistema proposto para assegurar as condições de temperatura do ar interior que permitem respeitar o limite de temperatura operativa estabelecido de 30°C.

Por último, é analisada uma proposta alternativa de otimização do sistema de climatização, nomeadamente, a admissão direta de ar para as máquinas de impressão do P3, com o objetivo de diminuir o nível de subpressão inicialmente verificado.

No que se refere a esta alternativa, considerando apenas o défice de ar, foi apresentada uma solução que consistiria numa unidade de admissão direta de ar para as máquinas de impressão. Quando comparada esta solução com a alternativa de instalação de uma UTAN adicional no P3, tendo em conta o défice de potência de arrefecimento confirmado para esse espaço e, considerando que a unidade apenas estaria equipada para proceder ao aquecimento de ar, podendo contribuir para um aumento adicional das cargas térmicas verificadas, em termos de resultados e em termos económicos, esta solução não apresenta os mesmos benefícios, sendo claramente mais vantajoso a instalação da UTA adicional.

Em suma, com base neste estudo, o melhor nível de otimização do sistema de climatização dos espaços analisados, em termos de resposta às exigências do processo produtivo e obtenção de um nível de conforto térmico minimamente aceitável para as condições simuladas, é alcançado com a instalação de uma UTA B adicional no P3, substituição da UTAN 1 por uma UTA A no P2 e na instalação de uma UTA C e remoção das UTAN 6 e 8 no P4, tendo todas estas novas unidades como característica fundamental a capacidade de recirculação de ar e, mantendo-se uma temperatura do ar interior inferior a 26°C no P2 e P3 e inferior a 28°C no P4.

O desenvolvimento desta dissertação foi uma jornada repleta de desafios, mas extremamente interessante de percorrer, que exigiu um grande esforço para se atingir os objetivos, podendo-se assumir, de uma forma geral, que os objetivos traçados para esta dissertação foram cumpridos.

#### 4.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Para continuidade do trabalho realizado ao longo desta dissertação, seria interessante a abordagem dos seguintes temas:

- Análise da possibilidade de implementação de outros sistemas AVAC, analisando o impacto destes ao nível da melhoria das condições de conforto térmico, especialmente, na possível redução das temperaturas operativas;
- Diagnóstico do possível impacto das altas temperaturas de ar interior, nos ocupantes do P2, P3 e P4, investigando o possível efeito da alteração do regime de laboração dos diferentes ocupantes, reduzindo as horas de trabalho contínuo quando se verificam essas condições de temperatura;
- Estudo aprofundado da instalação do sistema de *free-cooling* nas UTAN's dos diferentes espaços, analisando detalhadamente o impacto que esta solução teria ao nível da melhoria das condições eficiência energética, sugerindo possíveis proposta de otimização do desempenho deste sistema;
- Diagnóstico da qualidade de ar interior, fazendo uma avaliação das concentrações de poluentes nos diferentes espaços, nomeadamente a concentração de COV's, analisando, adicionalmente, os fluxos de migração de ar entre os diferentes pavilhões e o impacto que podem ter nessas concentrações.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

Roriz, Luís, 2007. *Climatização – Conceção, Instalação e condução de sistemas*, 2ª Edição. Amadora: Edições Orion

ASHRAE, 2019. 2019 ASHRAE Handbook -HVAC Applications:ASHRAE.

Grundfos, s.d Enciclopédia Grundfos [Online] Available at: <https://pt.grundfos.com/servico/encyclopedia-search/cooling-ceiling.html> [Acedido em 30 12 2019].

Silva, A. V. & Costa, P. M. P., 2017. Cogeração e Trigeriação - Um caso prático. Neutro à Terra, pp. 47-53.

COGEN , 2011. COGEN - Associação Portuguesa para a Eficiência Energética e Promoção da Cogeração. [Online] Available at: [https://www.cogenportugal.com/docs/v/126/8f1293\\_brochura\\_cogeracao\\_\\_final.pdf](https://www.cogenportugal.com/docs/v/126/8f1293_brochura_cogeracao__final.pdf) [Acedido em 15 Dezembro 2019].

COGEN, 2020. COGEN - Associação Portuguesa para a Eficiência Energética e Promoção da Cogeração. [Online] Available at: [https://www.cogenportugal.com/docs/v/768/94afba\\_cogen\\_bol\\_cogeracao\\_2sem19\\_vf.pdf](https://www.cogenportugal.com/docs/v/768/94afba_cogen_bol_cogeracao_2sem19_vf.pdf) [Acedido em 12 Fevereiro 2020].

Portal da energia, s.d Portal da Energia [Online] Available at: <https://www.portal-energia.com/wp-content/uploads/thumbs/esquema-cogeracao-de-energia.jpg> [Acedido em 19 Novembro 2019]

Lamberts, R., 2011. Conforto e Stress Térmico. Florianópolis, Brasil: s.n.

Morgado, M. F., 2014. Ergonomia ocupacional em contexto industrial: estudo do ambiente térmico. Aveiro: s.n.

Meles, B. A., 2012. Ergonomia Industrial e Conforto Térmico em postos de trabalho. Aveiro: s.n.

I. Sarmiento, “Apontamentos Climatização,” em Mestrado em Engenharia Mecânica Energia, ISEP, 2019-2020

Pereira, António José Dias de Castro Pereira.2012. Tese de Mestrado - Análise de Fiabilidade de Permutadores de Calor de Unidade de Tratamento de Ar. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

EDP. Soluções de Eficiência PME: Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, (versão PDF descarregada em 09/10/2019)

Jesus, M. & Lapa, P., 2016. Unidades de Tratamento de Ar, (versão PDF descarregada em 07/01/2020)

ISO-7730: 2005, 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. Switzerland: International Organization for Standardization

EN 15221:2006, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Bélgica: Comité Europeu de Normalização

ASHRAE, 2017. ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, pp. 2-58.

Wang, S. K., 2001. Handbook of Air Conditioning and Refrigeration, 2nd Edition. McGraw-Hill Companies, Inc.

Stoecker, W. F. & Jones, J. W., 1983. Refrigeration and Air Conditioning, 2nd Edition. s.l.:McGraw-Hill, Inc.

Johnson Controls, 2019. Air-Cooled Self-Contained Units D-Series, Horizontal and Vertical.

Henriques, F. M. A., 2016. Comportamento Higrotérmico de Edifícios. Lisboa: FCT/UNL.

EN 13053:2019, Ventilação para Edifícios – Unidades de Tratamentos de Ar – Classificação e Performance para Componentes e Secções. Bélgica: Comité Europeu de Normalização

EN 13779:2007, Ventilation for non-residential buildings — Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems. Bélgica: Comité Europeu de Normalização

DesignBuilder Software Ltd, 2019. DesignBuilder v6 Simulation Documentation. [Online] Available at: <https://designbuilder.co.uk/download/documents/407-designbuilder-printable-documentation-v6-a4-pages/file> [Acedido em 21 Fevereiro 2020]

U.S. Department of Energy, 2018. EnergyPlus. [Online] Available at: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v8.9.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.9.0/EngineeringReference.pdf) [Acedido em 15 Março 2020].

CIBSE, 2006. Environmental design - CIBSE Guide A. 7ª ed. Londres: CIBSE Publications.

CIBSE, 2005. Heating, ventilating, air conditioning and refrigeration - CIBSE Guide B. Londres: CIBSE Publications.

Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013, de 3 de Dezembro de 2013: Diário da República, 234, Série II.

Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, de 3 de Dezembro de 2013: Diário da República, 234, Série II.

Despacho n.º 17-A/2016, de 4 de Fevereiro de 2016: Diário da República, 378, Série II.

Silva, S. L., 2009. Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

# ANEXOS

- 6.1 Planta do Sistema de Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN)
- 6.2 Esquema da Instalação do Sistema de Triggers da MRI
- 6.3 Datasheets dos Modelos das Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN)
- 6.4 Cálculo da Inércia Térmica
- 6.5 Resultados da Simulação para a Estação de Aquecimento
- 6.6 Resultados da Simulação para a Estação de Arrefecimento
- 6.7 Necessidades Energéticas Anuais de Arrefecimento Simuladas para o P2, P3 e P4
- 6.8 Datasheets dos Modelos das Unidades de Tratamento de Ar (UTA) da Proposta de Solução

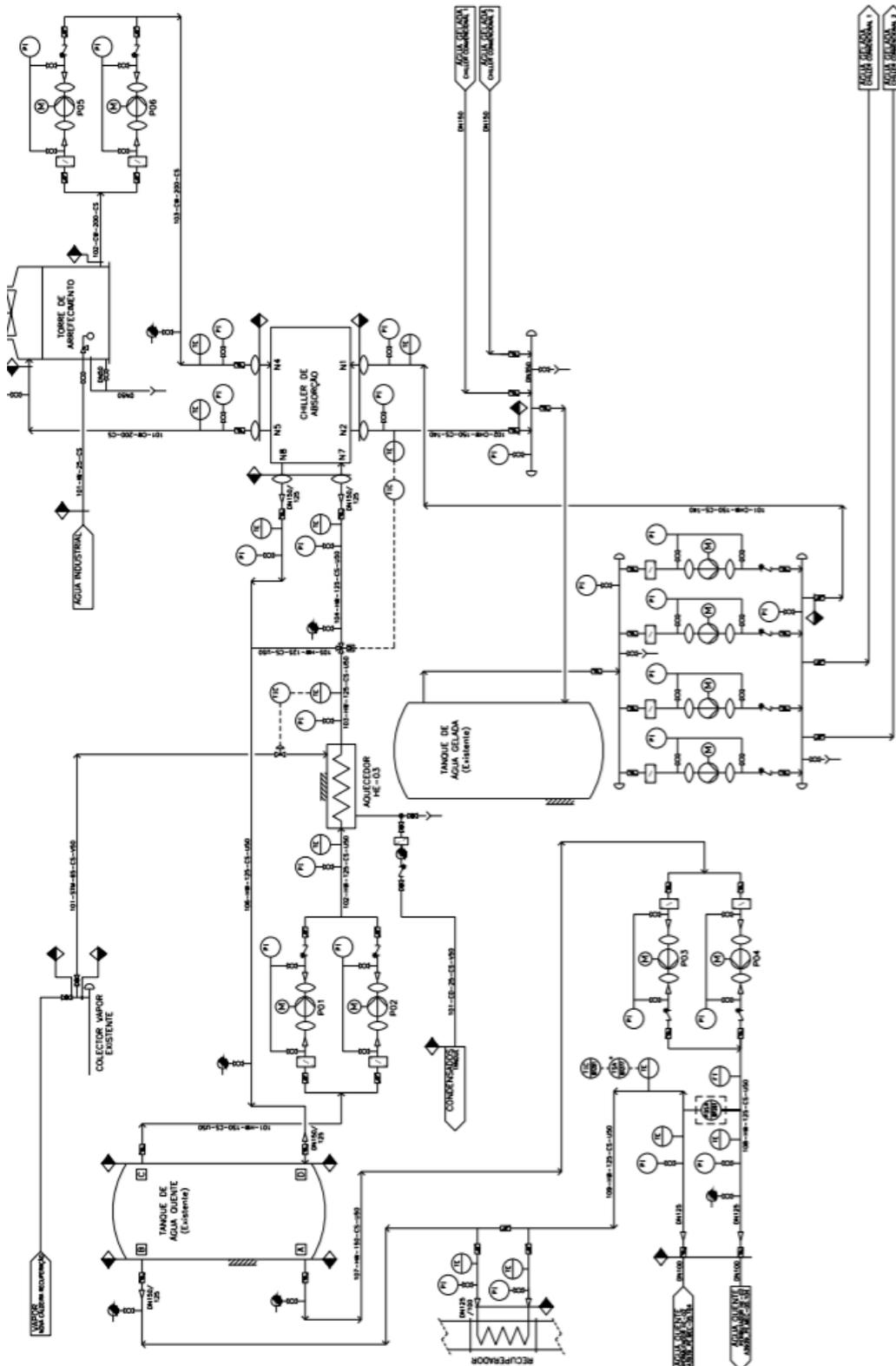


## 6 ANEXOS

### 6.1 Planta do Sistema de Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN)



## 6.2 Esquema da Instalação do Sistema de Trigeração da MRI



## 6.3 Datasheets dos Modelos das Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN)

# CIAT

## MODELO AIRTECH300

Quadro 5 – Unidades de tratamento de ar

| Referência                           |      | UTA 1/2/3/4/5/6  | UTAN ESC         | UTA 7/8    |
|--------------------------------------|------|------------------|------------------|------------|
| Localização                          |      | Cobertura        | Cobertura        | Cobertura  |
| Tipo                                 |      | Horizontal       | Horizontal       | Horizontal |
| Função                               |      | Aq./Arr./A.N.    | Aq./Arr./A.N. ✓  | Aq./A.N.   |
| Caudal de ar insuflado               | m³/h | 20 000           | 5 250 ✓          | 20 000     |
| Pressão disponível na insuflação     | Pa   | 200              | 200              | 200        |
| Caudal nominal de ar novo            | %    | 100              | 100              | 10-100     |
| Caudal de ar de retorno              | m³/h | -                | 4025 ✓           | 19 000     |
| Caudal de ar Rejeitado               | %    | -                | 100              | 10-100     |
| Pressão disponível no retorno        | Pa   |                  |                  |            |
| N.º de velocidades                   |      | Variador         | Variador         | Variador   |
| Transmissão                          |      | directa          | directa ✓        | directa    |
| Secção Admissão/Mistura              |      | Sim / Não        | Sim / Não        | Sim / Sim  |
| Filtro plano / Filtro de saco        |      | G 4 / F 7        | G 4 / F 7 ✓      | G 4 / F 7  |
| Recuperador de calor / Recuperação   | %    | Não              | Sim ✓            | Não        |
| Secção de humidificação              |      | Não              | Não ✓            | Não        |
| <u>Bateria de água quente</u>        |      |                  |                  |            |
| Temperatura da água (Entrada/Saída)  | °C   | 80/60            | 80/60 ✓          | 80/60      |
| Potência útil de aquecimento total   | kW   | 170              | 28.3 ✓           | 170        |
| Caudal de água quente                | l/h  | 7 } 7 310        | 1 } 1250         | 7 310      |
| <u>Bateria de água refrigerada</u>   |      |                  |                  |            |
| Temperatura da água (Entrada/Saída)  | °C   | 7/12             | 7/12             |            |
| Potência útil de arrefecimento total | kW   | 215 ✓            | 17 ✓             |            |
| Potência sensível total              | kW   |                  |                  |            |
| Caudal de água refrigerada           | l/h  | 370 } 36 980     | 30 } 2950        |            |
| Potência do(s) motor(es) - Ins./Ret. | kW   | 7.5 / -          | 2.2/1.1 ✓        |            |
| Alimentação                          | V    | 400              | 400              | 400        |
| Comprimento / Largura / Altura       | mm   | 2980/ 2172/ 1666 | 3500/ 1200/ 2000 |            |
| Peso                                 | Kg   | 1 205 ✓          | 750 ✓            |            |


**EVAC - EQUIPAMENTOS DE VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO S.A.**
[www.evac.pt](http://www.evac.pt)

|      |  |        |                     |
|------|--|--------|---------------------|
| DE   | EVAC S.A. - Miguel Jesus                       | MODELO | UTA 50D plus 50     |
| OBRA | Monteiro Ribas - Expansão Embalagens Flexíveis | REF.   | UTAN (V3) - Cantina |

**1. Implementação da diretiva 2009/125/EC - Regulamento 1253/2014 (requisitos Ecodesign)**

|   |                         | Insuflação | Extracção | NRVU - UVU |                  |
|---|-------------------------|------------|-----------|------------|------------------|
| Sist. transmissão de vártas vel. ou velocidade variável                       |                         |            |           |            |                  |
| Potência eléctrica absorvida  | Pel abs                 | 5,76       | -         |            | kW               |
| Rendimento estático global - grupo ventilador                                 | $\eta_{sys}$            | 66,6       | -         |            | %                |
| Perda de carga interna - ecodesign  | $\Delta P$              | 91         | -         |            | Pa               |
| Specific Fan Power - ecodesign  | SFP <sub>int.</sub>     | 137        |           |            | J/m <sup>3</sup> |
| Specific Fan Power máximo - ecodesign   | SFP <sub>int.máx.</sub> | 230        |           |            | J/m <sup>3</sup> |
| Taxa máxima de fuga externa -400 Pa   | (o)                     | 0,3        |           |            | %                |
| Taxa máxima de fuga externa +400 Pa   | (o)                     | 0,4        |           |            | %                |
| Consumo energético anual dos filtros<br>(Base cálculo documento 420 EUROVENT) | (p)                     | 10511      |           |            | kWh              |

**A unidade está em conformidade com o regulamento, parâmetros 2018.**
**2. Especificações Construtivas**

Estrutura de 50 em alumínio tratado. Calhas interiores em Aluzinc/Epoxy. Painéis de dupla chapa com isolamento de poliuretano com densidade 44 kg/m<sup>3</sup>.  
Chapa exterior em aço galvanizado plastificada de cor cinza.  
Chapa interior em Aluzinc (AZ185)

Tendo em consideração as recomendações da norma: EN 13053  
Classificação segundo a Norma EN 1886:2007: D1(M) / L1(M) / G1-F9 / T3 / TB3

**3. Especificações Gerais**

|                                    | Insuflação | Extracção | Ar novo |                    |
|------------------------------------|------------|-----------|---------|--------------------|
| Caudal Ar                          | 20.000     |           | 20.000  | Nm <sup>3</sup> /h |
| Densidade: 1,204 kg/m <sup>3</sup> | 6,689      |           | 6,689   | kg/s               |
| Pressão estática requerida         | 250        |           |         | Pa                 |
| Condições do ar - Inverno / Verão  |            |           |         |                    |
| Temperatura bolbo seco             |            |           | 8 / 35  | °C                 |
| Humidade relativa                  |            |           | 90 / 35 | %                  |

**4. Esquisso**

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
|                         | H = 1.095 ± 100      |
|                         | B = 2.382            |
|                         | L = 3.910 ± 5%       |
|                         | a = 1.200    b = 995 |
| c = 995    d = 2.282    |                      |
| Nº Módulos : 4          |                      |
| Peso maior: 585 kg ± 5% |                      |
| Peso total: 823 kg ± 5% |                      |

**5. UTA - Classificação da eficiência energética**

|   |             | Insuflação | Extracção |                   |
|---|-------------|------------|-----------|-------------------|
| Temperatura de projecto Inverno                     | TODA        | 6          |           | °C                |
| Factor: Perda carga Sist. Recup. Calor/eficiência   | $\eta_{pe}$ | 3,23       |           | Pa/%              |
| Velocidade referência                               | Vs          | 2,35       |           | m/s               |
| Perda de carga Interna                              | DPS-Interno | 441        | 0         | Pa                |
| Pressão de correcção devido à velocidade            | DPx         | 89         | 0         | Pa                |
| Pressão de correcção devido à perda de carga do SRC | DPy         | -190       | 0         | Pa                |
| Pressão de correcção devido à eficiência do SRC     | DPz         | 220        | 0         | Pa                |
| Razão de ar de retorno                              | mr          | 0          |           | %                 |
| Potência de ventilação referência                   | Pref        | 5,83       | 0         | kW                |
| Caudal Ar   | qv          | 5,56       | 0         | m <sup>3</sup> /s |
| Factor de potência absorvida                        | fs-Pref     | 0,99       |           |                   |



A EVAC reserva-se o direito de alterar as "performances" e dimensões sem aviso prévio.

Versão : 4.8.2.11

Data de Impressão : 18-04-2019



A EVAC pertence ao Programa de Certificação de Unidades de Tratamento de Ar EUROVENT.  
A gama UTA está certificada sob o nº 00 05 012, e apresentada no Directório de Unidades de Tratamento de Ar Certificadas.

 Pg. 1  
(cont.)


**EVAC - EQUIPAMENTOS DE VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO S.A.**
[www.evac.pt](http://www.evac.pt)

OBRA: Monteiro Ribas - Expansão Embalagens Flexíveis

MODELO: UTA 50D plus 50

REF.: UTAN (V3) - Cantina

**6. Secção de entrada - Insuflação**

Gola flexível para ligação à conduta

**7. Secção de filtragem inicial - Insuflação**

|  | Eficiência | Perda carga |       |         | Pa |
|--|------------|-------------|-------|---------|----|
|  |            | Inicial     | Final | Cálculo |    |
| Filtro Plano                                       | G4 (EN779) | 50          | 150   | 100     | Pa |
| Filtro Saco (535 mm)                               | F7 (EN779) | 91          | 200   | 146     | Pa |
| Extras:  |            |             |       |         |    |
| Pressostato diferencial: Filtro Plano, Filtro Saco |            |             |       |         |    |

**8. Secção térmica - Bateria de Arrefecimento / Bateria de Aquecimento**

Permutador compacto com alhetas em alumínio e tubo em cobre.

Tabuleiro de recolha de condensados em aço inox 304L.

|  |           |           |        |  |
|--|-----------|-----------|--------|--|
| Fiadas   | 8         | 2         |        |  |
| Ligação  | 3"        | 1,5"      |        |  |
| Condições do ar                                      |           |           |        |  |
| Caudal   | 20.000    | 20.000    | m³/h   |  |
| Velocidade facial no alhetado                        | 2,94      | 2,94      | m/s    |  |
| Perda carga (seca/húmida)                            | 117/168   | 49        | Pa     |  |
| Temperatura bolbo seco / Humidade relativa - Entrada | 35 / 35   | 0,8 / 90  | °C / % |  |
| Temperatura bolbo seco / Humidade relativa - Saída   | 12,6 / 93 | 30,3 / 13 | °C / % |  |
| Fluido primário - Água/Glicol                        |           |           |        |  |
| Caudal   | 0         | 0         | %(kg)  |  |
| Potência total                                       | 36.100    | 9.346     | L/h    |  |
| Temperatura - Entrada / Saída                        | 209,87    | 212,75    | kW     |  |
| Perda carga  | 7 / 12    | 80 / 60   | °C     |  |
| Volume Interno                                       | 28,1      | 25,4      | kPa    |  |
|  | 62,7      | 15,8      | L      |  |
| projectado para condições secas                      |           |           |        |  |
| Separador de Gotas                                   |           |           |        |  |

**9. Secção do ventilador - Insuflação**

Ventilador centrífugo de simples aspiração, pás recuadas, concebido para o uso sem envolvente "Plug Fan".

|                          |              |          |                             |             |    |
|--------------------------|--------------|----------|-----------------------------|-------------|----|
| Modelo                   | 2 x P5601ECM |          |                             |             |    |
| Caudal                   | 20.000       | Nm³/h    | Pressão estática disponível | 250         | Pa |
| Vel. Rotação             | 1.502        | rpm      | Pressão estática total      | 691         | Pa |
| Potência no veio         | 5,21         | kW       | Pressão dinâmica            | 44          | Pa |
| SFP (Class 3)            | 889          | W/(m³/s) | Pressão total               | 735         | Pa |
| SFPv / SFPe              | 889 / 1.072  | W/(m³/s) |                             |             |    |
| Motor Eficiência EC      |              |          |                             |             |    |
| Potência nominal         | 2 x 3,53     | kW       | Potência absorvida          | 5,76        | kW |
| Número de polos          | -            |          | Classe protecção/isolamento | IP54/I      |    |
| Vel. rotação nominal     | 1610         | rpm      | Tensão nominal              | 3~ 380..480 | V  |
| Frequência funcionamento | 46,8         | Hz       | Corrente nominal            | 2 x 5,4     | A  |

O efeito do sistema no ventilador é tido em conta no seu desempenho.

Extras:

Interruptor motor eléctrico

**10. Secção de saída - Insuflação**

Gola flexível para ligação à conduta

**11. Espectro Acústico**

|                       | LWS      | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k | Hz |
|-----------------------|----------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| Insuflação - Descarga | 83 dB(A) | 69 | 72  | 81  | 76  | 78 | 76 | 75 | 74 | dB |
| Insuflação - Admissão | 70 dB(A) | 61 | 65  | 71  | 68  | 67 | 54 | 42 | 34 | dB |
| Insuflação - Exterior | 72 dB(A) | 60 | 62  | 69  | 71  | 68 | 65 | 48 | 38 | dB |

A EVAC reserva-se o direito de alterar as 'performances' e dimensões sem aviso prévio.

Versão : 4.8.2.11

Data de Impressão : 16-04-2019



AEVAC pertence ao Programa de Certificação de Unidades de Tratamento de Ar EUROVENT.  
A gama UTA está certificada sob o nº 00 05 012, e apresentada no Directório de Unidades de Tratamento de Ar Certificadas.

Pg. 2  
(cont.)


**EVAC - EQUIPAMENTOS DE VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO S.A.**
[www.evac.pt](http://www.evac.pt)

|      |  |        |                        |
|------|--|--------|------------------------|
| DE   | EVAC S.A. - Miguel Jesus                       | MODELO | UTA 50D plus 50        |
| OBRA | Monteiro Ribas - Expansão Embalagens Flexíveis | REF.   | UTAN (V3) - Plataforma |

**1. Implementação da diretiva 2009/125/EC - Regulamento 1253/2014 (requisitos Ecodesign)**

|   |                         | Insuflação | Extracção | NRVU - UVU |                  |
|---|-------------------------|------------|-----------|------------|------------------|
| Sist. transmissão de várias vel. ou velocidade variável                       |                         |            |           |            |                  |
| Potência eléctrica absorvida  | Pel abs                 | 5,76       | -         |            | kW               |
| Rendimento estático global - grupo ventilador                                 | $\eta_{sta}$            | 68,6       | -         |            | %                |
| Perda de carga interna - ecodesign  | $\Delta P$              | 91         | -         |            | Pa               |
| Specific Fan Power - ecodesign  | SFP <sub>int.</sub>     |            | 137       |            | J/m <sup>3</sup> |
| Specific Fan Power máximo - ecodesign   | SFP <sub>int,máx.</sub> |            | 230       |            | J/m <sup>3</sup> |
| Taxa máxima de fuga externa -400 Pa   | (o)                     |            | 0,2       |            | %                |
| Taxa máxima de fuga externa +400 Pa   | (o)                     |            | 0,3       |            | %                |
| Consumo energético anual dos filtros<br>(Base cálculo documento 420 EUROVENT) | (p)                     |            | 10511     |            | kWh              |

**A unidade está em conformidade com o regulamento, parâmetros 2018.**
**2. Especificações Construtivas**

Estrutura de 50 em alumínio tratado. Calhas interiores em Aluzinc/Epoxy. Painéis de dupla chapa com isolamento de poliuretano com densidade 44 kg/m<sup>3</sup>.  
Chapa exterior em aço galvanizado plastificada de cor cinza.  
Chapa interior em Aluzinc (AZ165)

Tendo em consideração as recomendações da norma: EN 13053  
Classificação segundo a Norma EN 1886:2007: D1(M) / L1(M) / G1-F9 / T3 / TB3

**3. Especificações Gerais**

|                                    | Insuflação | Extracção | Ar novo | Nm <sup>3</sup> /h |
|------------------------------------|------------|-----------|---------|--------------------|
| Caudal Ar                          | 20.000     |           | 20.000  |                    |
| Densidade: 1,204 kg/m <sup>3</sup> | 6,689      |           | 6,689   | kg/s               |
| Pressão estática requerida         | 250        |           |         | Pa                 |
| Condições do ar - Inverno / Verão  |            |           |         |                    |
| Temperatura bolbo seco             |            |           | 8 / 35  | °C                 |
| Humidade relativa                  |            |           | 90 / 35 | %                  |

**4. Esquismo**

|  |                         |
|--|-------------------------|
|  | H = 1.095 + 100         |
|  | B = 2.382               |
|  | L = 3.270 ± 5%          |
|  | a = 550      b = 2.282  |
|  | c = 995      d = 2.282  |
|  | Nº Módulos : 2          |
|  | Peso maior: 529 kg ± 5% |
|  | Peso total: 767 kg ± 5% |

**5. UTA - Classificação da eficiência energética**

|   |             | Insuflação | Extracção |                   |
|---|-------------|------------|-----------|-------------------|
| Temperatura de projecto Inverno                     | tODA        | 6          |           | °C                |
| Factor: Perda carga Sist. Recup. Calor/eficiência   | tpe         |            | 3,23      | Pa/%              |
| Velocidade referência                               | Vs          | 2,35       |           | m/s               |
| Perda de carga interna                              | DPs-Interno | 441        | 0         | Pa                |
| Pressão de correcção devido à velocidade            | DPx         | 89         | 0         | Pa                |
| Pressão de correcção devido à perda de carga do SRC | DPy         | -190       | 0         | Pa                |
| Pressão de correcção devido à eficiência do SRC     | DPz         | 220        | 0         | Pa                |
| Razão de ar de retorno                              | mr          | 0          |           | %                 |
| Potência de ventilação referência                   | Pref        | 5,83       | 0         | kW                |
| Caudal Ar   | qv          | 5,56       | 0         | m <sup>3</sup> /s |
| Factor de potência absorvida                        | ts-Pref     |            | 0,99      |                   |



A EVAC reserva-se o direito de alterar as 'performances' e dimensões sem aviso prévio.

Versão: 4.8.2.11

Data de Impressão: 18-04-2019



A EVAC participa no Programa de Certificação de Unidades de Tratamento de Ar EUROVENT.  
A gama UTA está certificada sob o nº 90 05 012, e apresentada no Directório de Unidades de Tratamento de Ar Certificadas.

 Pg. 1  
(cont.)


**EVAC - EQUIPAMENTOS DE VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO S.A.**
[www.evac.pt](http://www.evac.pt)

OBRA: Monteiro Ribas - Expansão Embalagens Flexíveis

MODELO: UTA 50D plus 50

REF: UTAN (V3) - Plataforma

**6. Secção de entrada - Insuflação**

Gola flexível para ligação à conduta

**7. Secção de filtragem inicial - Insuflação**

|                      | Eficiência | Perda carga |       |         |    |
|----------------------|------------|-------------|-------|---------|----|
|                      |            | Inicial     | Final | Cálculo |    |
| Filtro Plano         | G4 (EN779) | 50          | 150   | 100     | Pa |
| Filtro Saco (535 mm) | F7 (EN779) | 91          | 200   | 146     | Pa |

Extras:  
Pressostato diferencial: Filtro Plano, Filtro Saco

**8. Secção térmica - Bateria de Arrefecimento / Bateria de Aquecimento**

|   |  |           |  |           |        |
|---|--|-----------|--|-----------|--------|
| Permutador compacto com alhetas em alumínio e tubo em cobre.<br>Tabuleiro de recolha de condensados em aço inox 304L. |  |           |  |           |        |
| Fiadas  |  | 8         |  | 2         |        |
| Ligação   |  | 3"        |  | 1,5"      |        |
| <b>Condições do ar</b>  |  |           |  |           |        |
| Caudal  |  | 20.000    |  | 20.000    | m³/h   |
| Velocidade facial no alhetado   |  | 2,94      |  | 2,94      | m/s    |
| Perda carga (seca/húmida)   |  | 117/168   |  | 49        | Pa     |
| Temperatura bolbo seco / Humidade relativa - Entrada  |  | 35 / 35   |  | 0,8 / 90  | °C / % |
| Temperatura bolbo seco / Humidade relativa - Saída  |  | 12,6 / 93 |  | 30,3 / 13 | °C / % |
| <b>Fluido primário - Água/Glicol</b>  |  |           |  |           |        |
| Caudal  |  | 0         |  | 0         | %(kg)  |
| Potência total  |  | 38.100    |  | 9.348     | L/h    |
| Temperatura - Entrada / Saída   |  | 209,87    |  | 212,75    | kW     |
| Perda carga   |  | 7 / 12    |  | 80 / 60   | °C     |
| Volume Interno  |  | 28,1      |  | 25,4      | kPa    |
|   |  | 62,7      |  | 15,8      | L      |

projectado para condições secas  
Separador de Gotas

**9. Secção do ventilador - Insuflação**

|   |              |          |                             |            |    |
|---|--------------|----------|-----------------------------|------------|----|
| Ventilador centrífugo de simples aspiração, pás recuadas, concebido para o uso sem envolvente "Plug Fan". |              |          |                             |            |    |
| Modelo  | 2 x P5601ECM |          |                             |            |    |
| Caudal  | 20.000       | Nm³/h    | Pressão estática disponível | 250        | Pa |
| Vel. Rotação  | 1.502        | rpm      | Pressão estática total      | 691        | Pa |
| Potência no veio  | 5,21         | kW       | Pressão dinâmica            | 44         | Pa |
| SFP (Class 3)   | 889          | W/(m³/s) | Pressão total               | 735        | Pa |
| SFPv / SFPe   | 889 / 1.072  | W/(m³/s) |                             |            |    |
| <b>Motor Eficiência EC</b>  |              |          |                             |            |    |
| Potência nominal  | 2 x 3,53     | kW       | Potência absorvida          | 5,76       | kW |
| Número de polos   | -            |          | Classe protecção/isolamento | IP54/I     |    |
| Vel. rotação nominal  | 1610         | rpm      | Tensão nominal              | 3~ 380.480 | V  |
| Frequência funcionamento  | 46,8         | Hz       | Corrente nominal            | 2 x 5,4    | A  |

O efeito do sistema no ventilador é tido em conta no seu desempenho.  
Extras:  
Interruptor motor eléctrico

**10. Secção de saída - Insuflação**

Gola flexível para ligação à conduta

**11. Espectro Acústico**

|                       | LWS      | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k | Hz |
|-----------------------|----------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| Insuflação - Descarga | 83 dB(A) | 69 | 72  | 81  | 78  | 78 | 76 | 75 | 74 | dB |
| Insuflação - Admissão | 70 dB(A) | 61 | 65  | 71  | 68  | 67 | 54 | 42 | 34 | dB |
| Insuflação - Exterior | 72 dB(A) | 60 | 62  | 69  | 71  | 68 | 65 | 48 | 38 | dB |

A EVAC reserva-se o direito de alterar as 'performances' e dimensões sem aviso prévio.

Versão : 4.8.2.11

Data de Impressão : 16-04-2019



A EVAC participa no Programa de Certificação de Unidades de Tratamento de Ar EUROVENT.  
A gama UTA está certificada sob o nº 90 05 012, e apresentada no Directório de Unidades de Tratamento de Ar Certificadas.

Pg. 2  
(cont.)

## 6.4 Cálculo da Inércia Térmica

Tabela 6.1- Cálculo da Inércia Térmica P2

| Elemento        | Tipo | Materiais            | Massa                 | Esp.  | $M_{si}$ máx          | $M_{si}$              | $M_{si}$ total        | $M_{si}$ efetivo      | $S_i$          | $r_i$ | $M_{si} * S_i * r_i$ | $I_t$                 |
|-----------------|------|----------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------|----------------------|-----------------------|
|                 |      |                      | kg/<br>m <sup>3</sup> | m     | kg/<br>m <sup>2</sup> | kg/<br>m <sup>2</sup> | kg/<br>m <sup>2</sup> | kg/<br>m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> | -     | kg                   | kg/<br>m <sup>2</sup> |
| Cobertura       | EL1  | Policarbonato        | 1200                  | 0.001 | 150                   | 1.2                   | 1.2                   | 0.6                   | 798            | 1     | 478.8                | 198.93                |
|                 |      |                      | 35                    | 0.03  | 150                   | 1.05                  | 1.05                  | 0.525                 | 1735.95        | 0     | 0                    |                       |
| Cobertura       | EL1  | Painel Sanduiche DID | 1200                  | 0.001 | 150                   | 1.2                   | 1.2                   | 0.6                   | 798            | 1     | 478.8                | 198.93                |
|                 |      |                      | 35                    | 0.03  | 150                   | 1.05                  | 1.05                  | 0.525                 | 1735.95        | 0     | 0                    |                       |
| Parede interior | EL1  | Reboco               | 1800                  | 0.02  | 150                   | 36                    | 36                    | 0.6                   | 769.04         | 1     | 57678                | 198.93                |
|                 |      | Tijolo de alvenaria  | 625                   | 0.15  | 150                   | 93.75                 | 165.75                | 75                    | 769.04         | 1     | 57678                |                       |
|                 |      | Reboco               | 1800                  | 0.02  | 150                   | 36                    | 36                    | 0.6                   | 769.04         | 1     | 57678                |                       |
|                 |      | Tijolo de alvenaria  | 625                   | 0.15  | 150                   | 93.75                 | 165.75                | 75                    | 769.04         | 1     | 57678                |                       |
| Parede exterior | EL1  | Reboco               | 1800                  | 0.02  | 150                   | 36                    | 36                    | 0.6                   | 238.96         | 1     | 17922                | 198.93                |
|                 |      | Tijolo de alvenaria  | 625                   | 0.15  | 150                   | 93.75                 | 165.75                | 75                    | 238.96         | 1     | 17922                |                       |
|                 |      | Reboco               | 1800                  | 0.02  | 150                   | 36                    | 36                    | 0.6                   | 238.96         | 1     | 17922                |                       |
|                 |      | Tijolo de alvenaria  | 625                   | 0.15  | 150                   | 93.75                 | 165.75                | 75                    | 238.96         | 1     | 17922                |                       |
| Pavimento       | EL2  | Betão                | 2300                  | 0.4   | 150                   | 920                   | 920                   | 150                   | 1554.97        | 1     | 233245.5             | 198.93                |
|                 |      |                      | 1800                  | 0.02  | 150                   | 36                    | 36                    | 0.6                   | 769.04         | 1     | 57678                |                       |

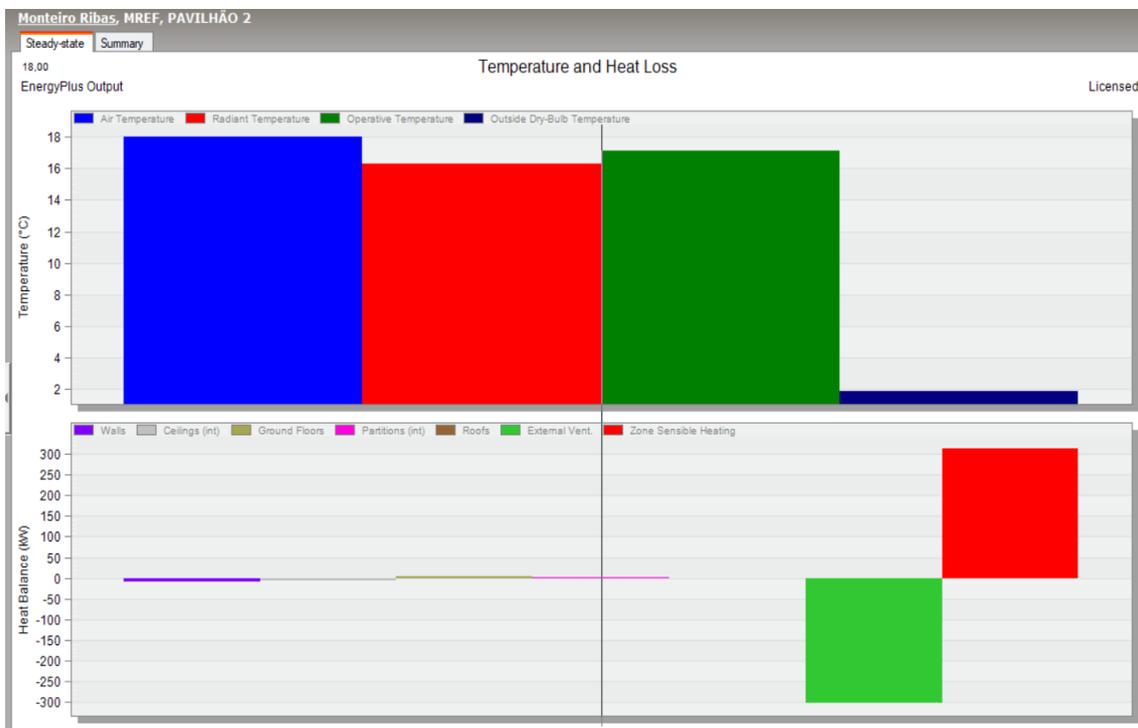
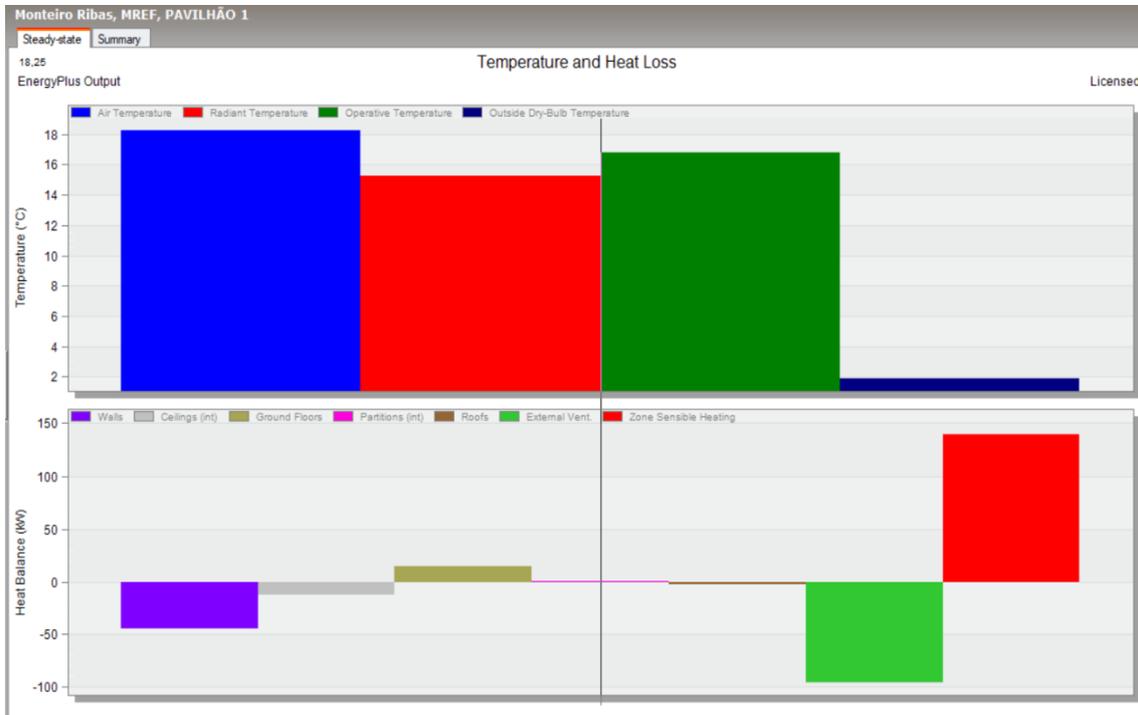
Tabela 6.2 - Cálculo da Inércia Térmica P3

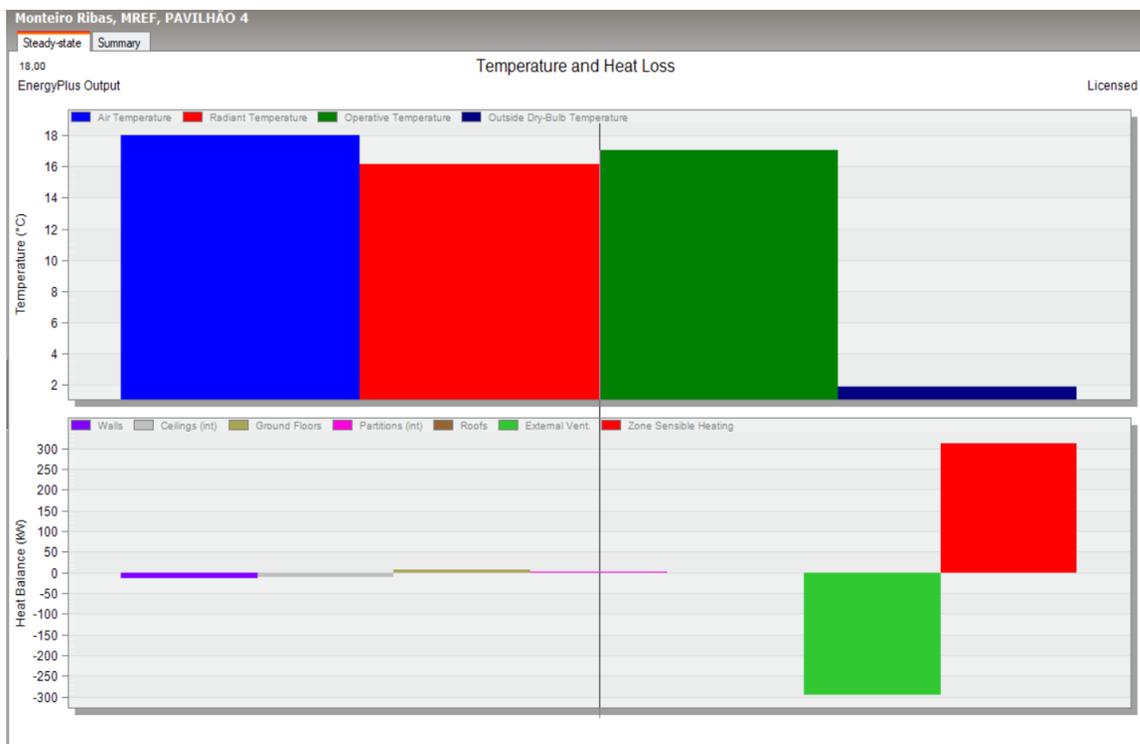
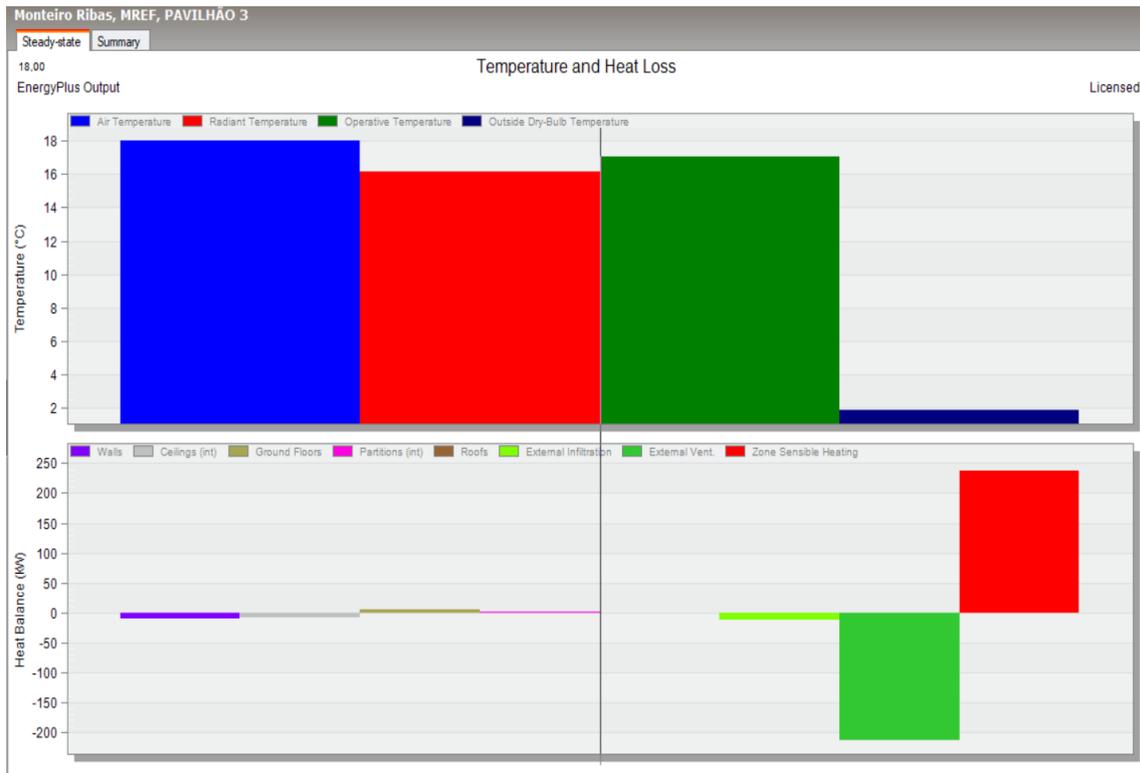
| Elemento        | Tipo | Materiais              | Massa                 | Esp. | $M_{si} \text{ máx}$  | $M_{si}$              | $M_{si} \text{ total}$ | $M_{si} \text{ efetivo}$ | $S_i$          | $r_i$ | $M_{si} * S_i * r_i$ | $I_t$                 |
|-----------------|------|------------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|----------------|-------|----------------------|-----------------------|
|                 |      |                        | kg/<br>m <sup>3</sup> | m    | kg/<br>m <sup>2</sup> | kg/<br>m <sup>2</sup> | kg/<br>m <sup>2</sup>  | kg/<br>m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup> | -     | kg                   | kg/<br>m <sup>2</sup> |
| Pavimento       | EL2  | Betão                  | 2300                  | 0.4  | 150                   | 920                   | 920                    | 150                      | 1376.82        | 1     | 206523               |                       |
| Parede exterior | EL1  | Reboco                 | 1800                  | 0.02 |                       |                       |                        |                          |                |       |                      |                       |
|                 |      | Tijolo de alvenaria    | 625                   | 0.15 | 150                   | 93.75                 | 165.75                 | 75                       | 260.971        | 1     | 19572.83             |                       |
|                 |      | Reboco                 | 1800                  | 0.02 |                       | 36                    |                        |                          |                |       |                      |                       |
| Parede interior | EL1  | Reboco                 | 1800                  | 0.02 |                       |                       |                        |                          |                |       |                      |                       |
|                 |      | Tijolo de alvenaria    | 625                   | 0.15 | 150                   | 93.75                 | 165.75                 | 75                       | 512.677        | 1     | 38451                |                       |
|                 |      | Reboco                 | 1800                  | 0.02 |                       | 36                    |                        |                          |                |       |                      |                       |
| Cobertura       | EL1  | Poliestireno Extrudido | 35                    | 0.03 | 150                   | 1.05                  | 1.05                   | 0.525                    | 1621.719       | 0     | 0                    |                       |
|                 |      |                        |                       |      |                       |                       |                        |                          |                |       |                      |                       |
|                 |      |                        |                       |      |                       |                       |                        |                          |                |       |                      |                       |
|                 |      |                        |                       |      |                       |                       |                        |                          |                |       | 192.14               |                       |

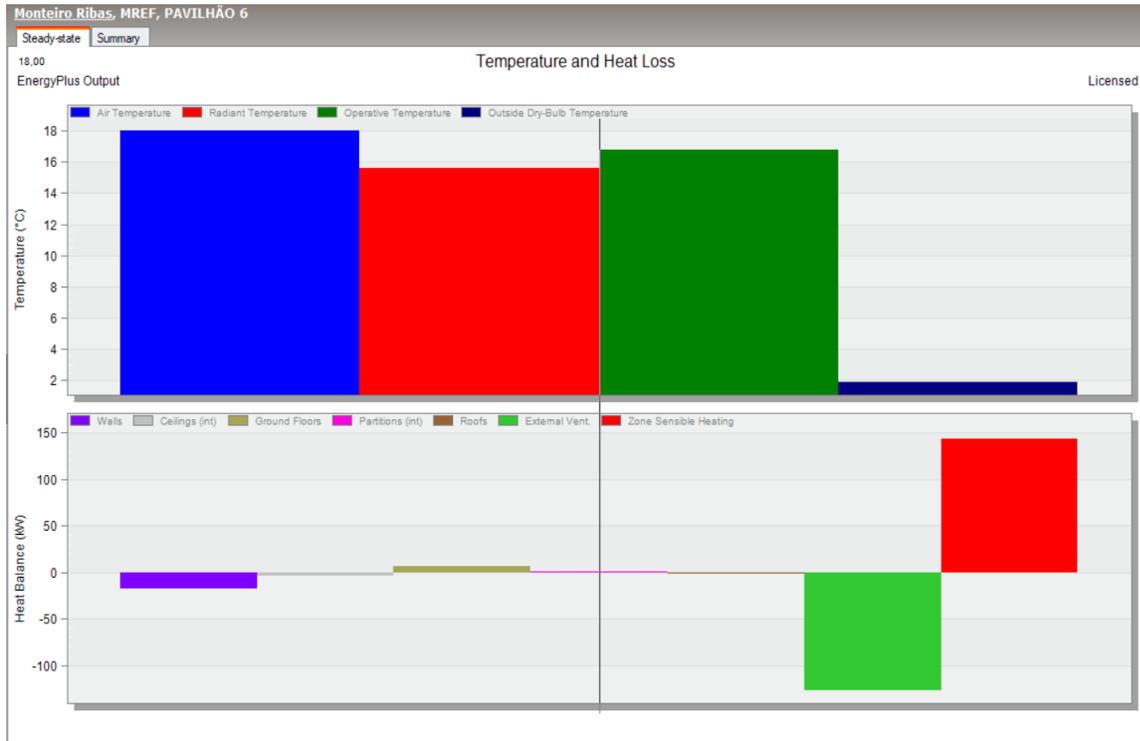


## 6.5 Resultados da Simulação para a Estação de Aquecimento

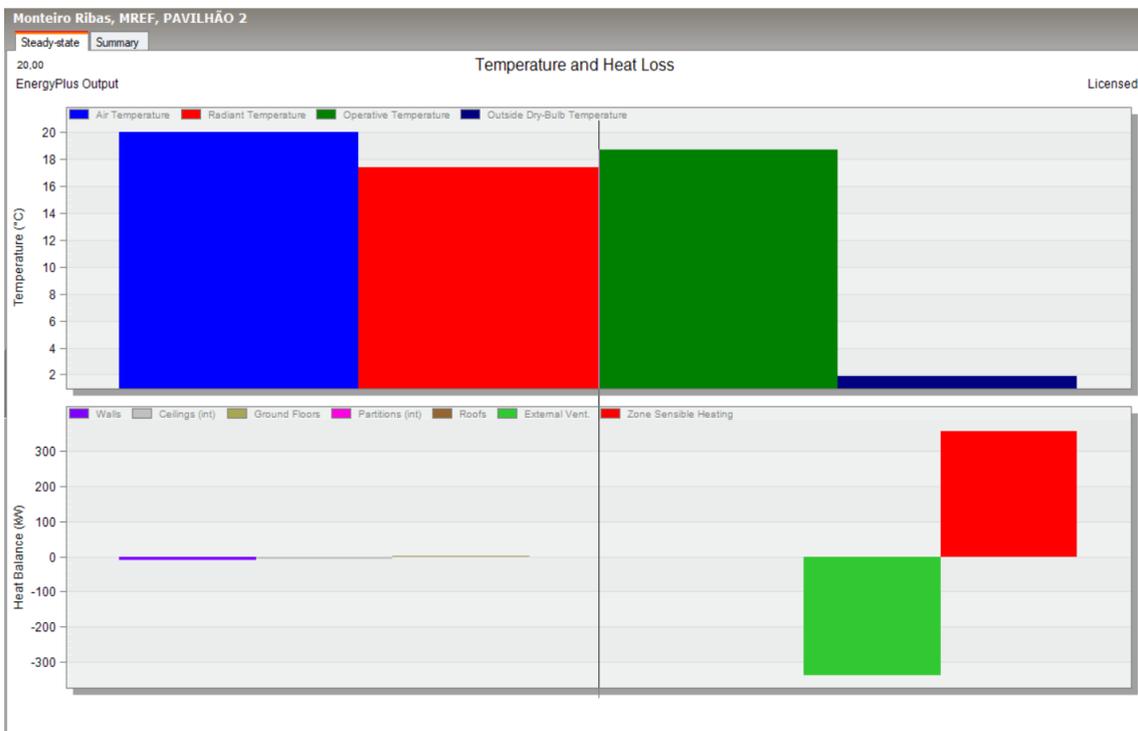
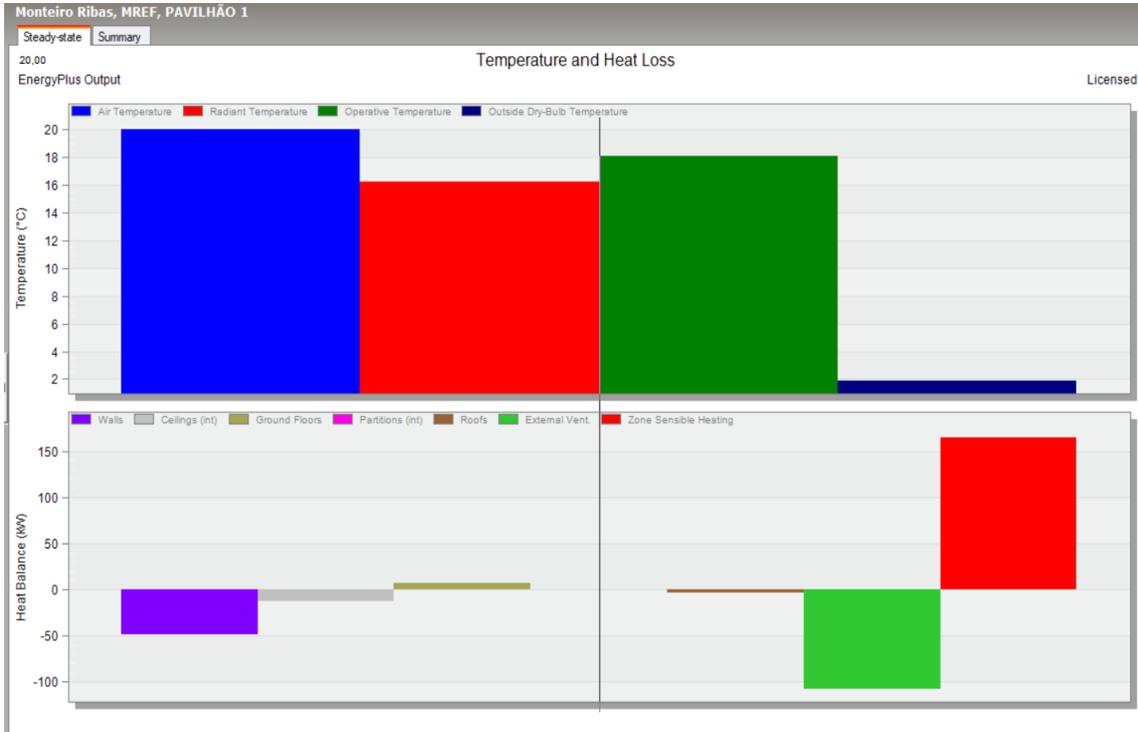
- Temperatura de ar interior de 18°C

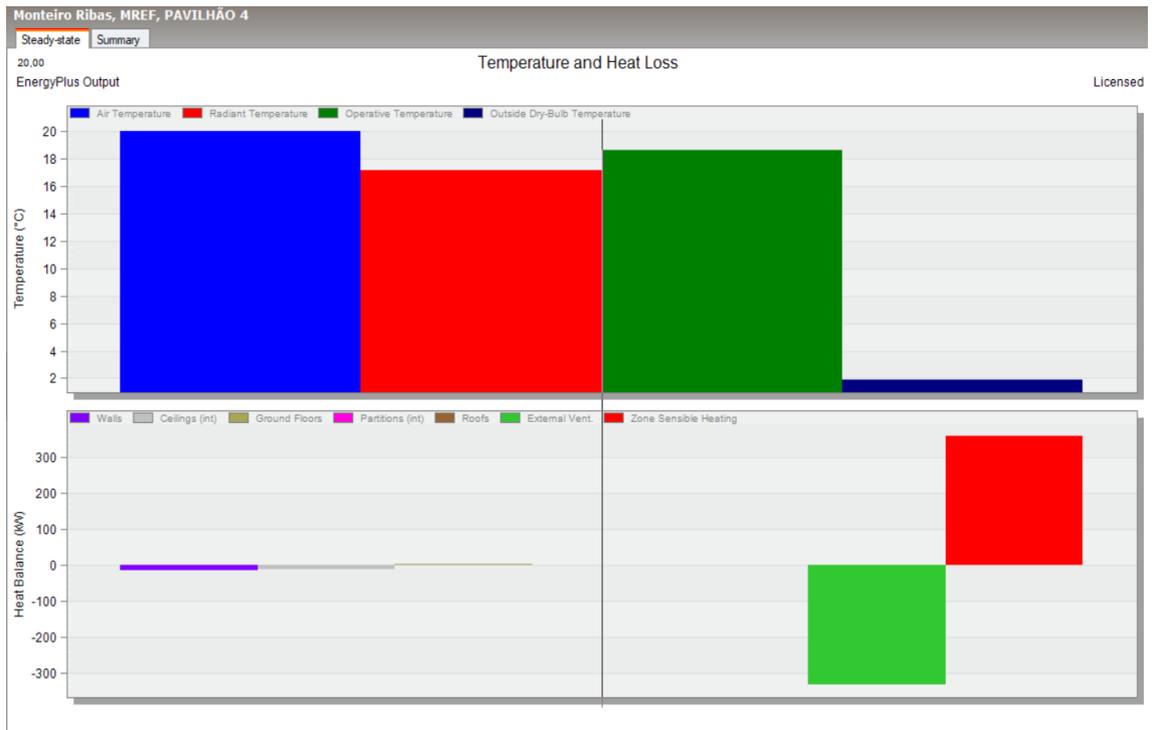
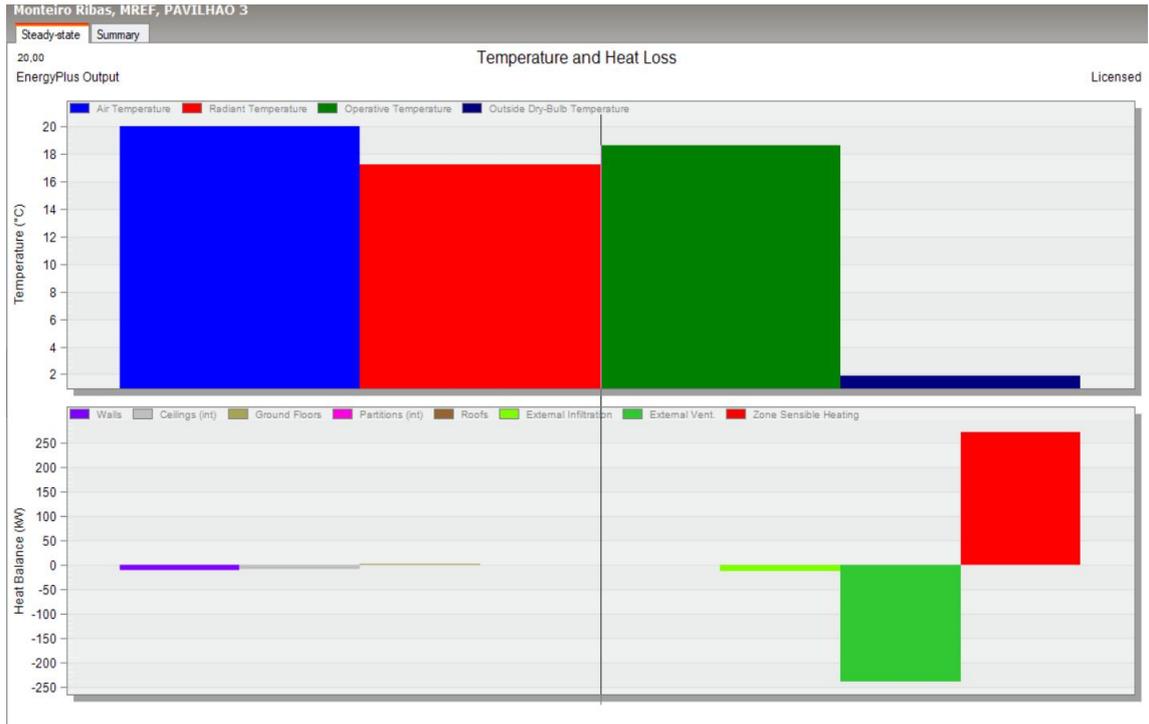


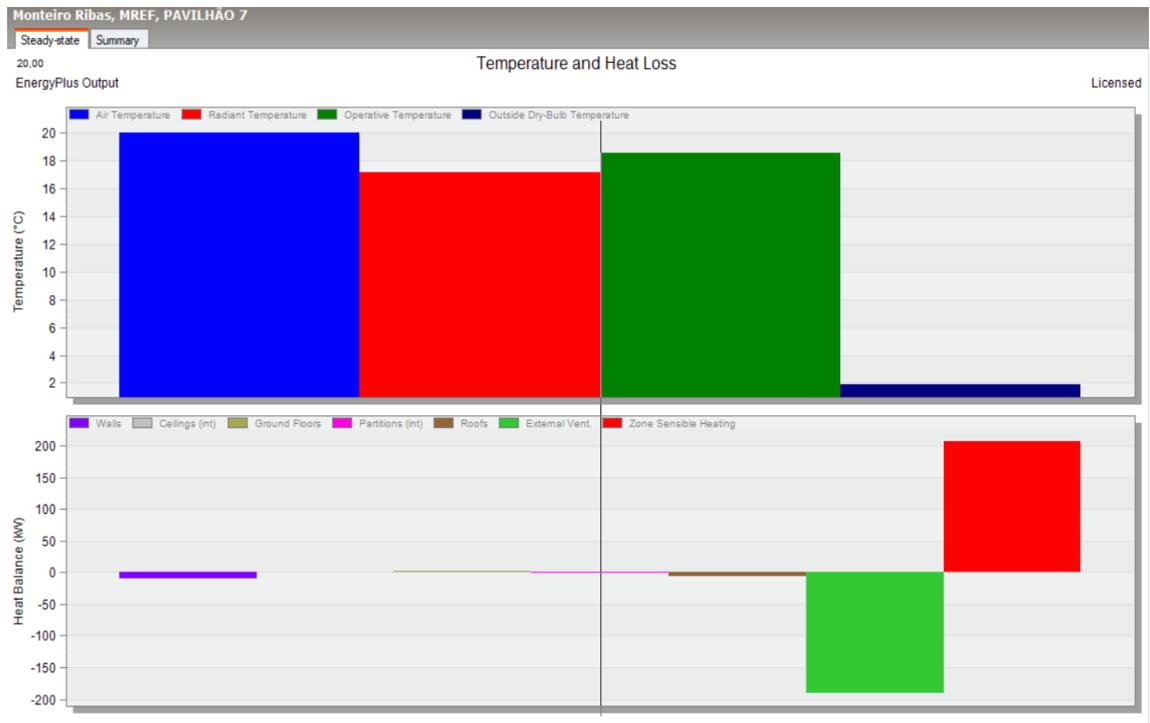
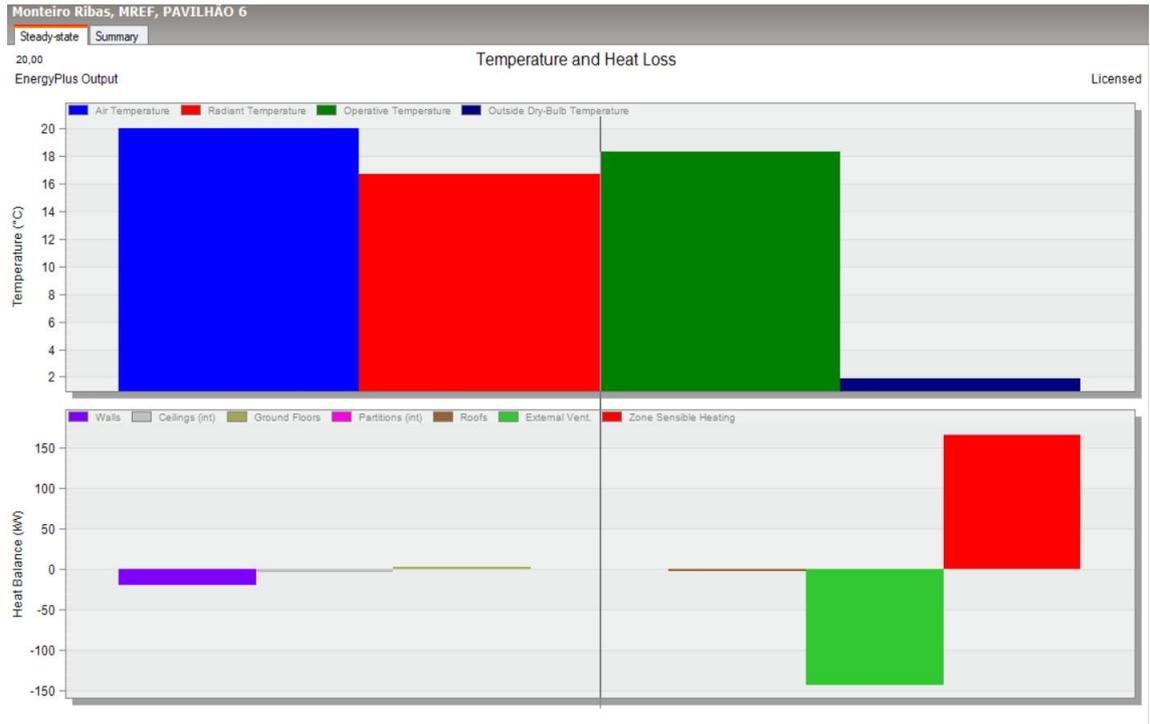




- Temperatura de ar interior de 20°C

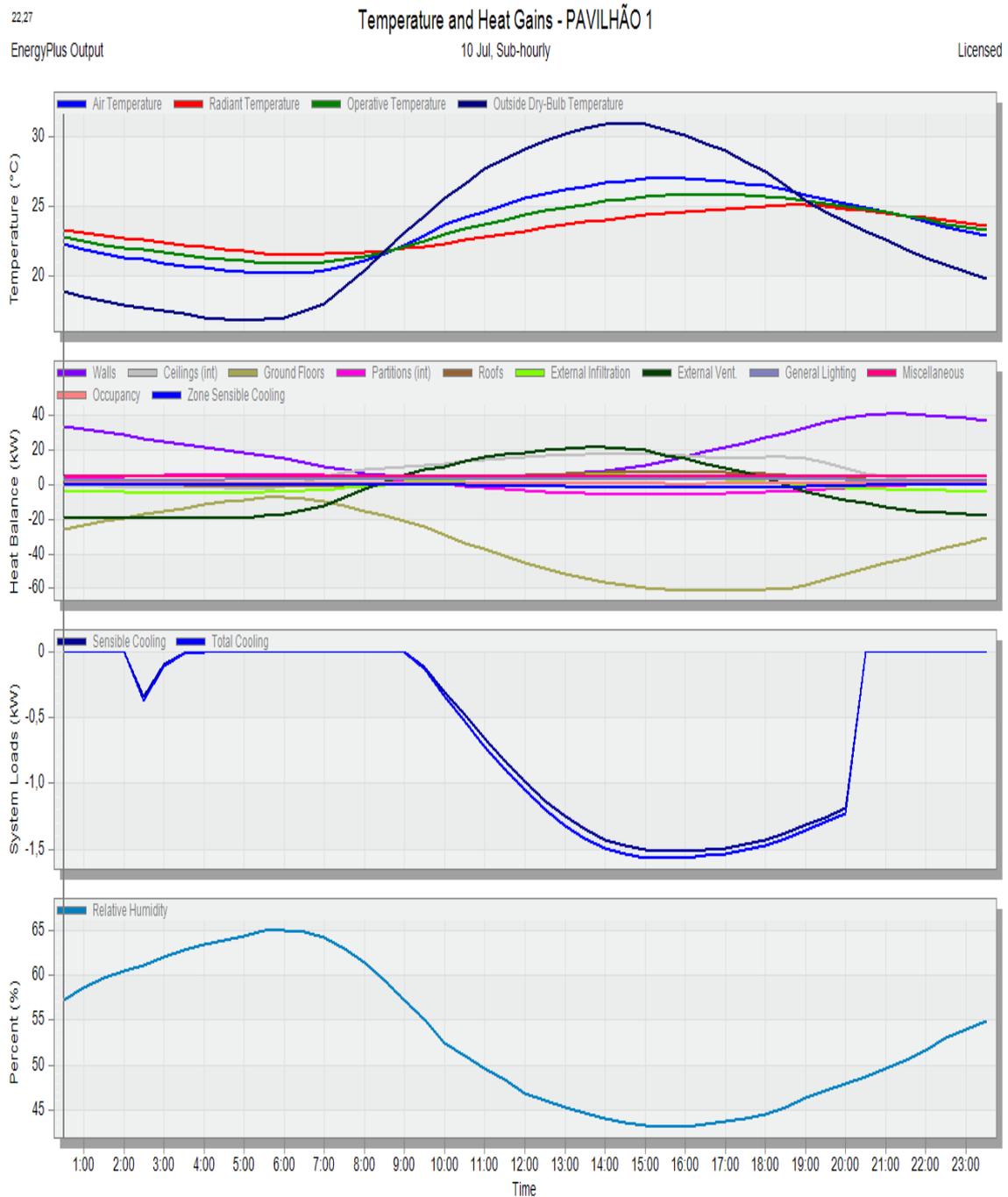






## 6.6 Resultados da Simulação para a Estação de Arrefecimento

- Temperatura de ar interior de 26°C



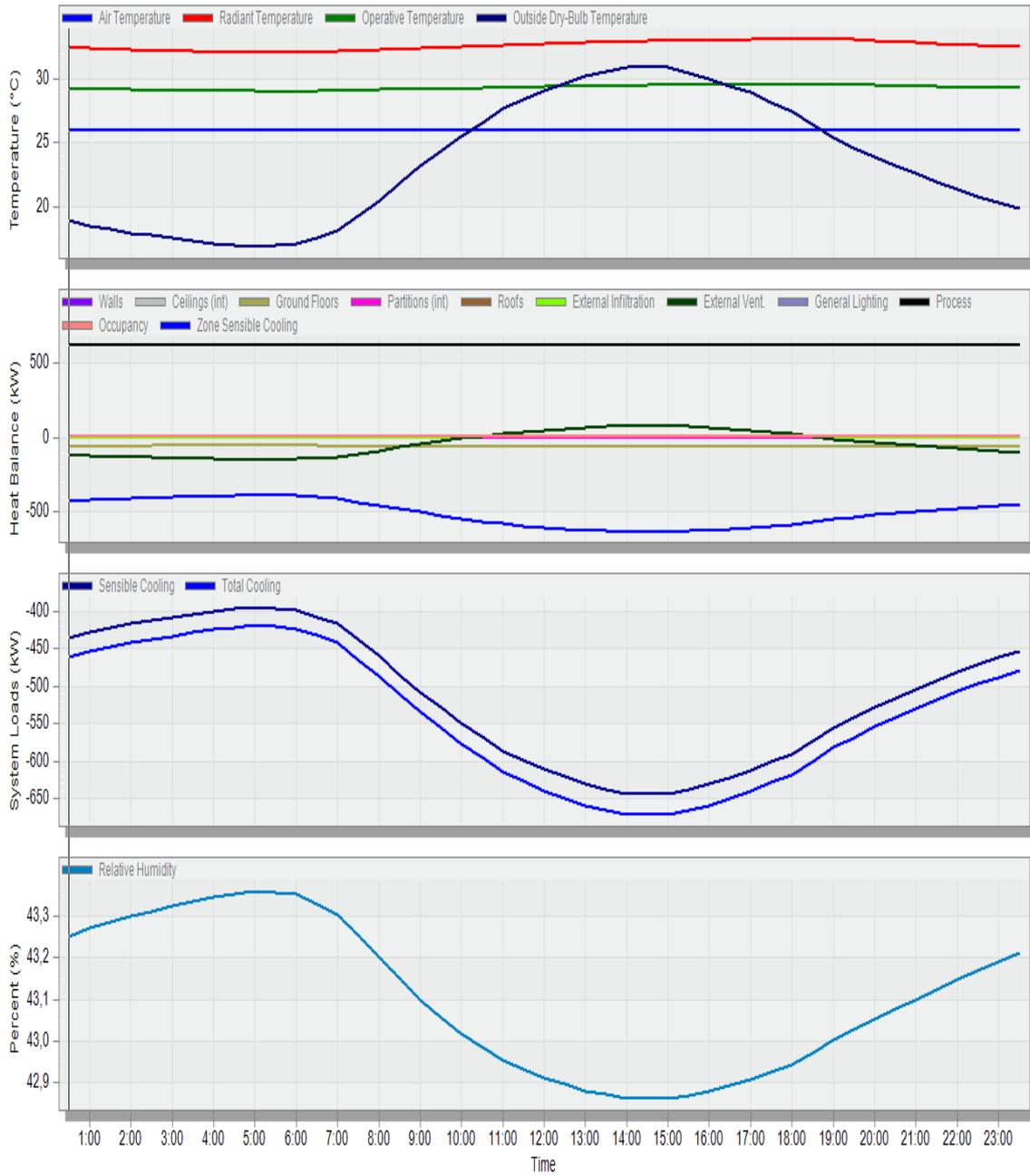
28.00

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 2

EnergyPlus Output

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



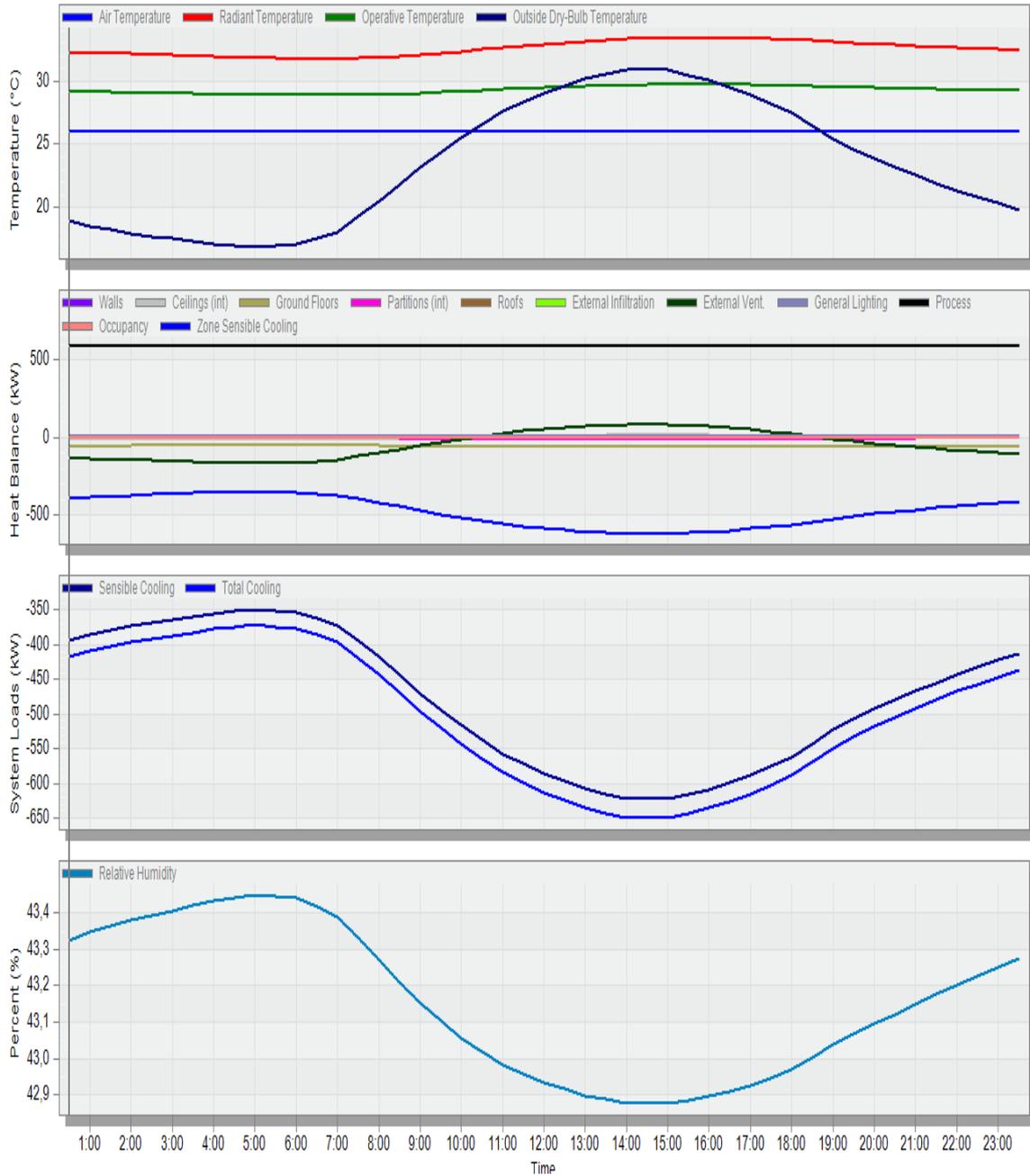
28.00

EnergyPlus Output

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 3

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



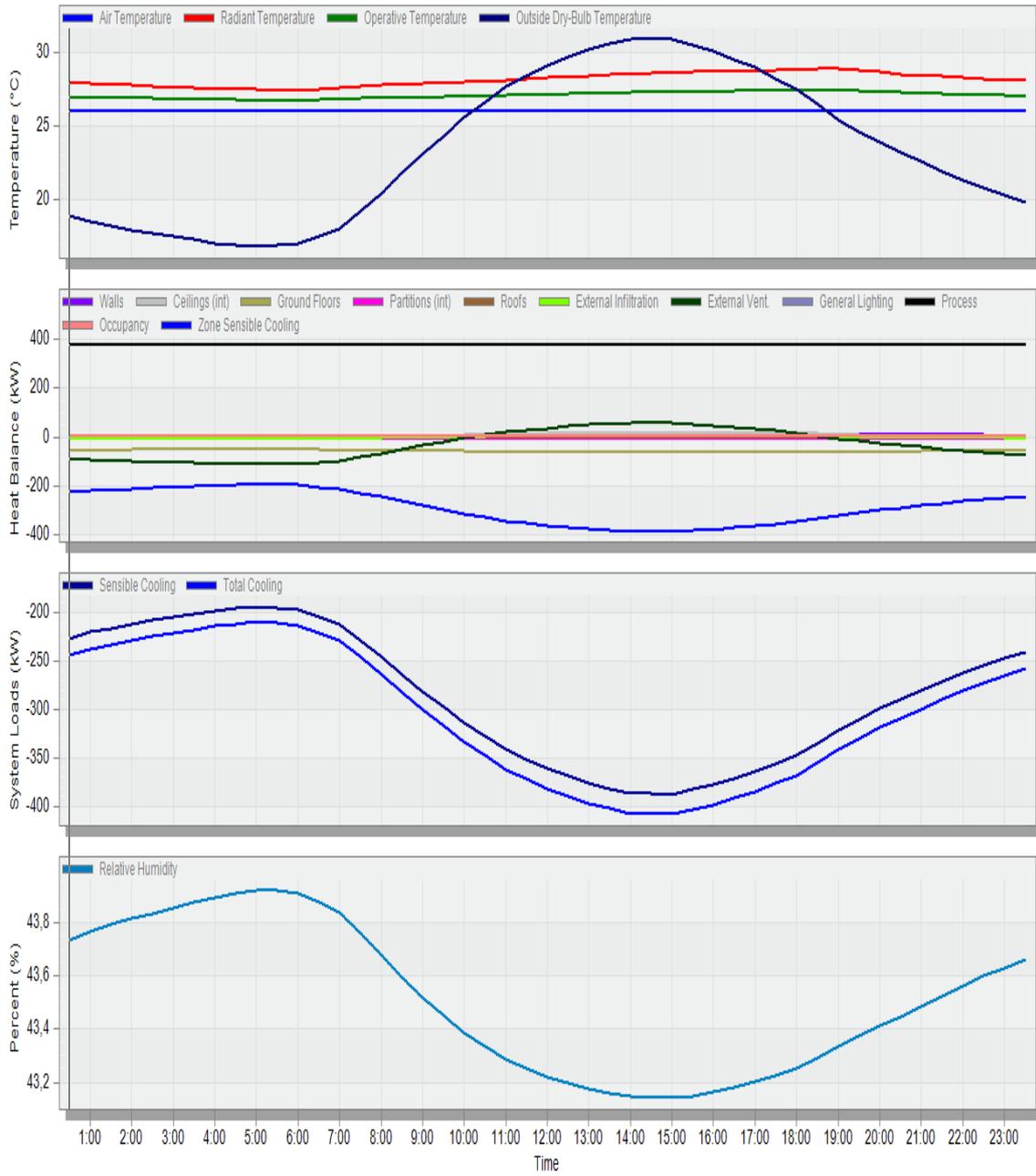
28.00

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 4

EnergyPlus Output

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



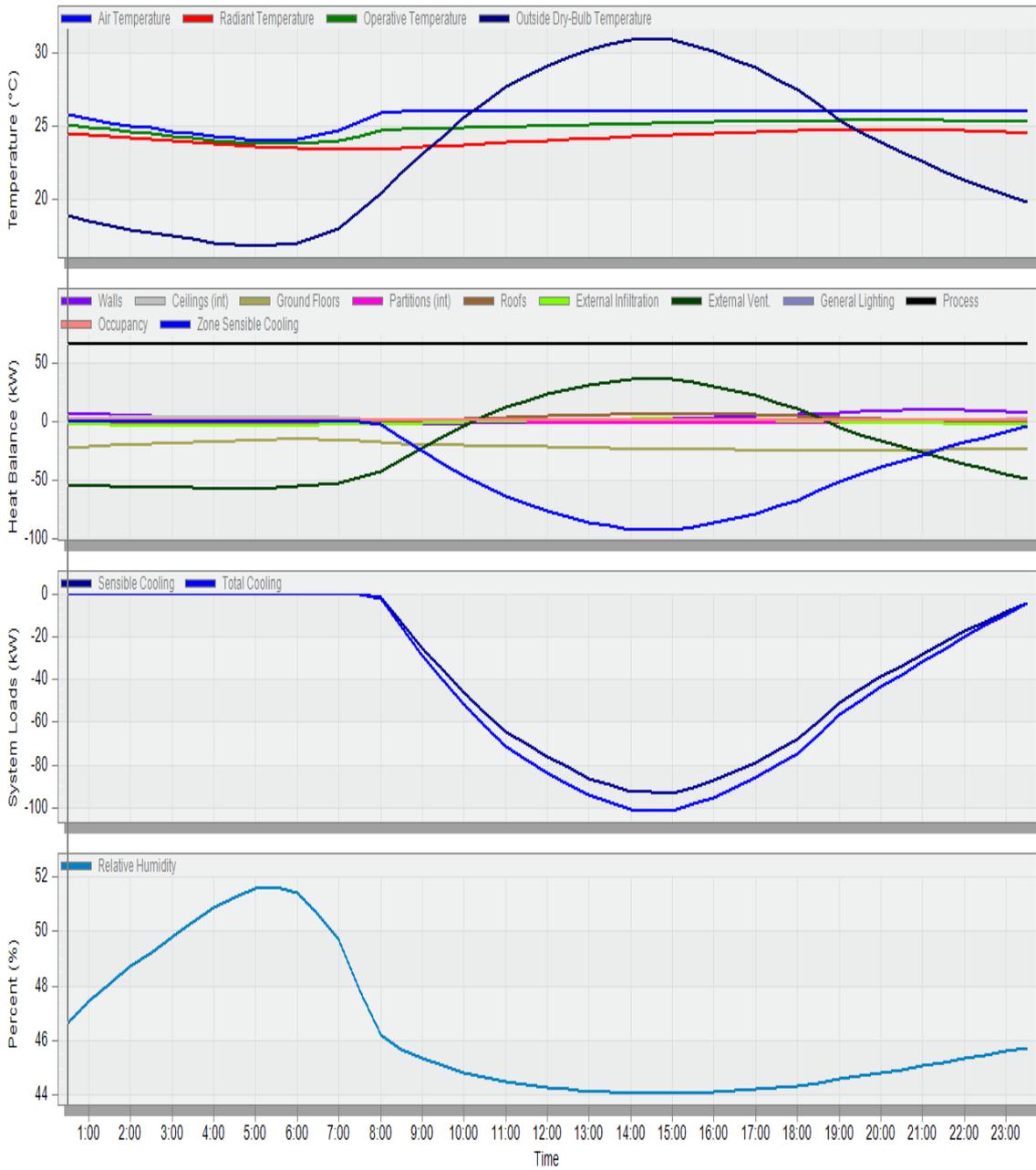
25,76

EnergyPlus Output

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 6

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



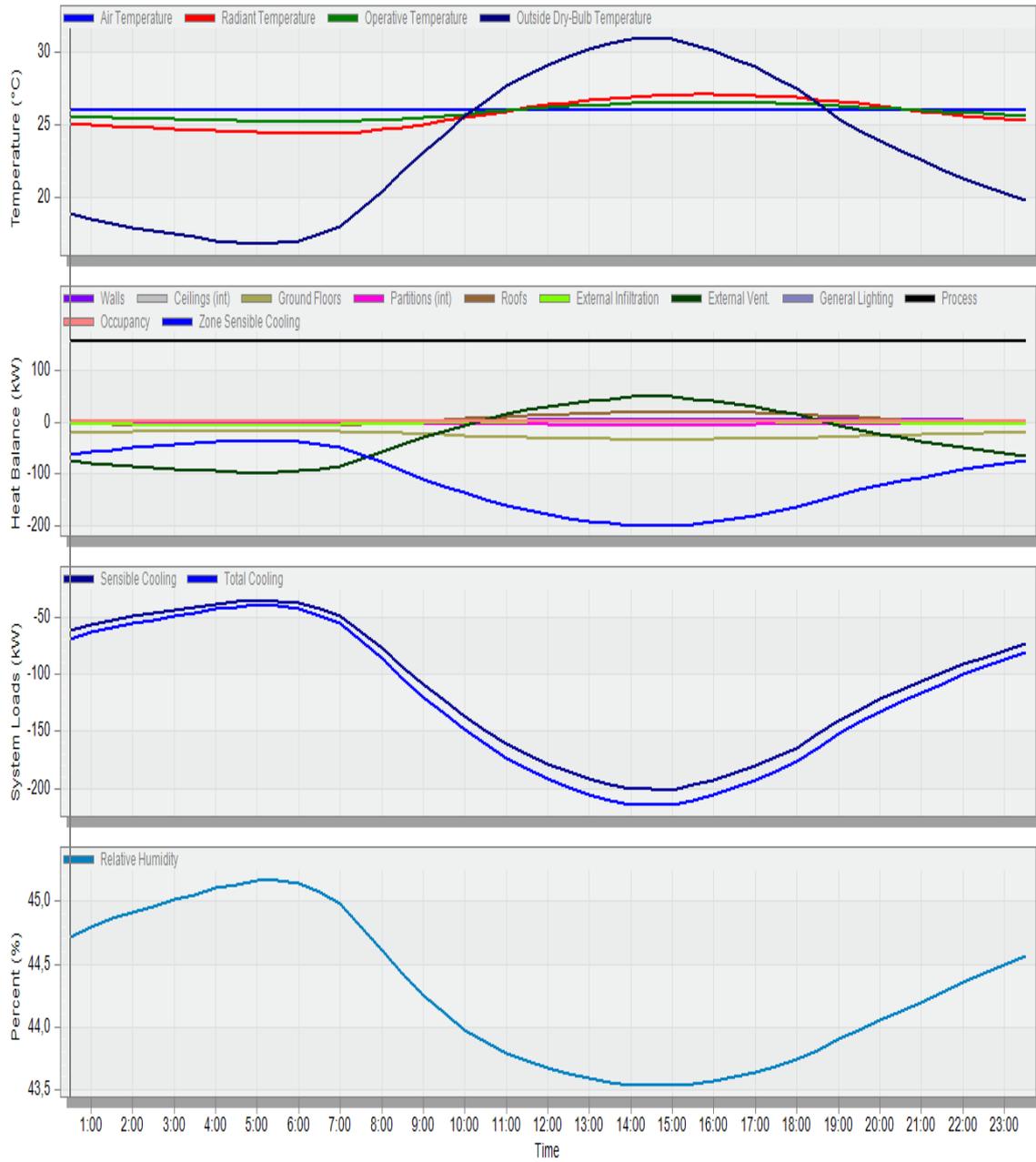
28.00

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 7

EnergyPlus Output

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



- Temperatura de ar interior de 28°C

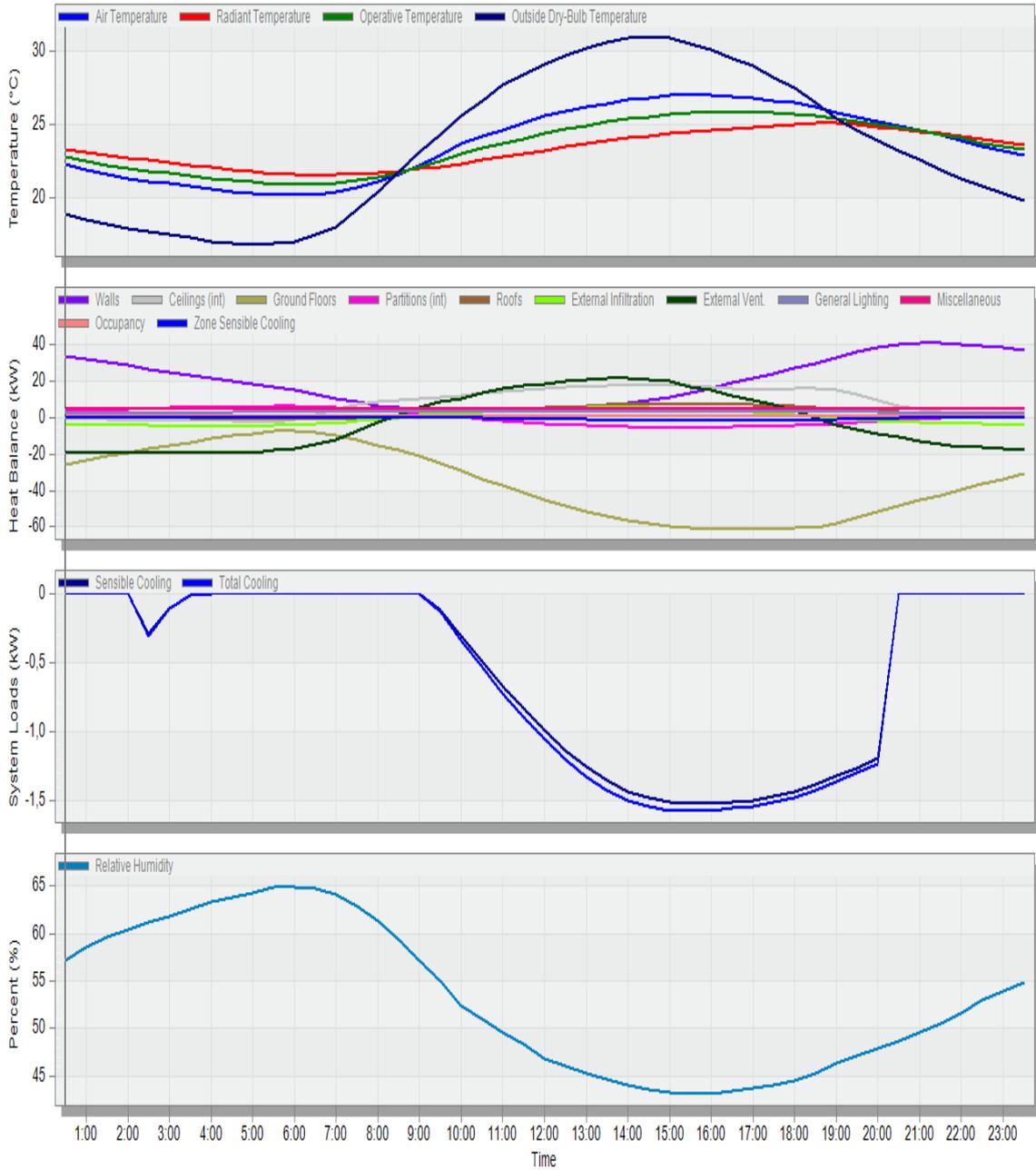
22.27

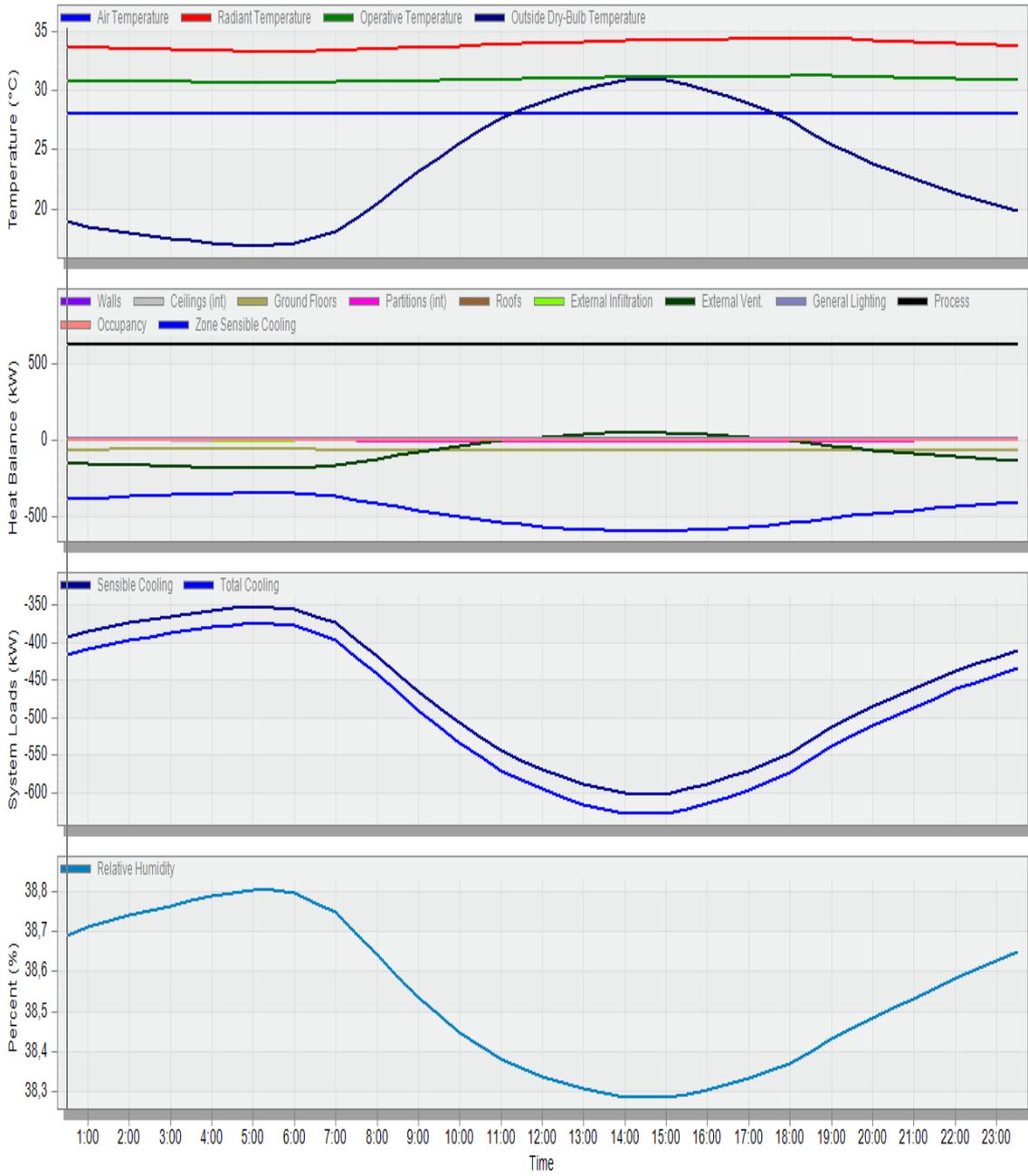
Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 1

EnergyPlus Output

10 Jul, Sub-hourly

Licensed





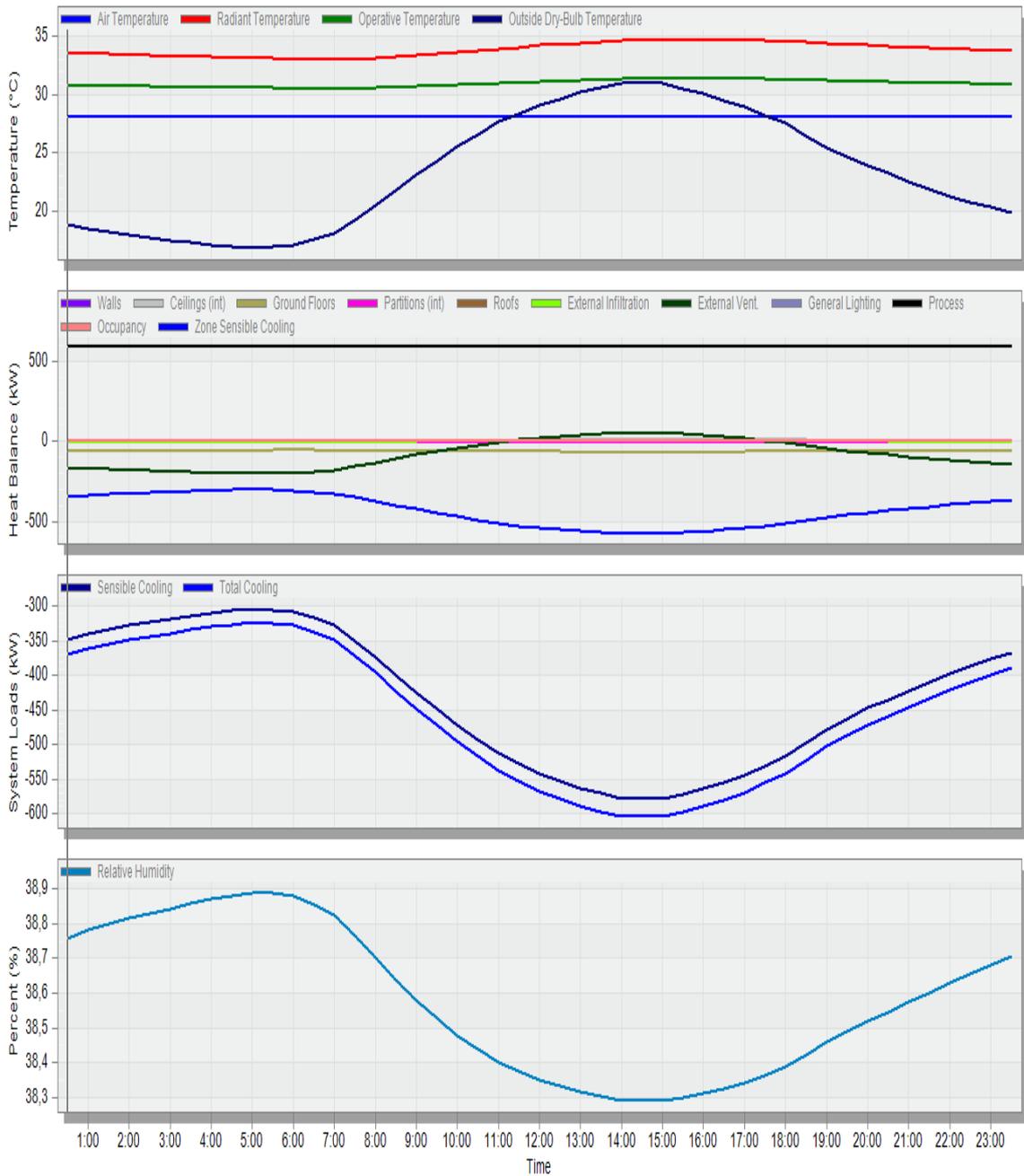
28.00

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 3

EnergyPlus Output

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



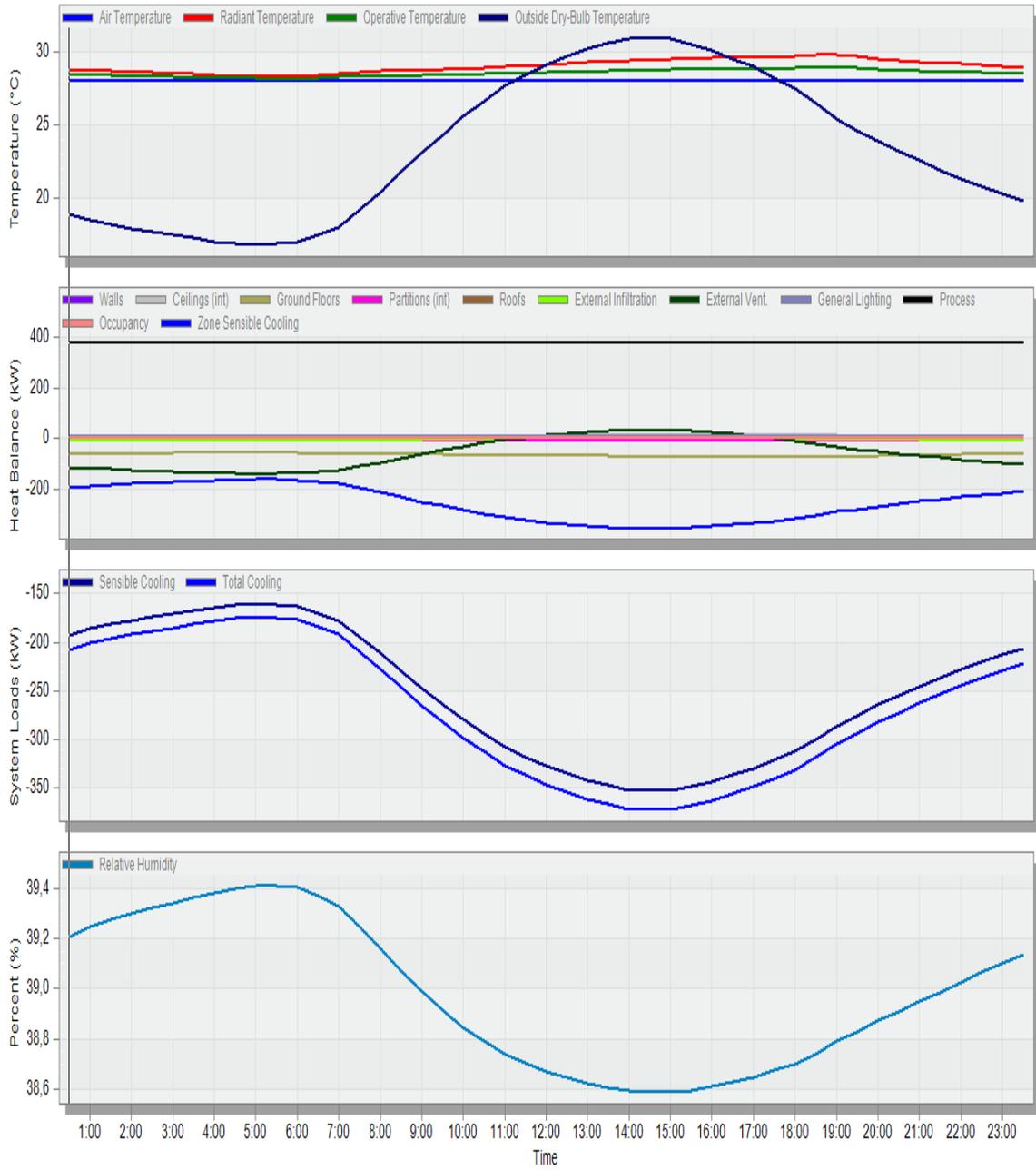
28.00

EnergyPlus Output

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 4

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



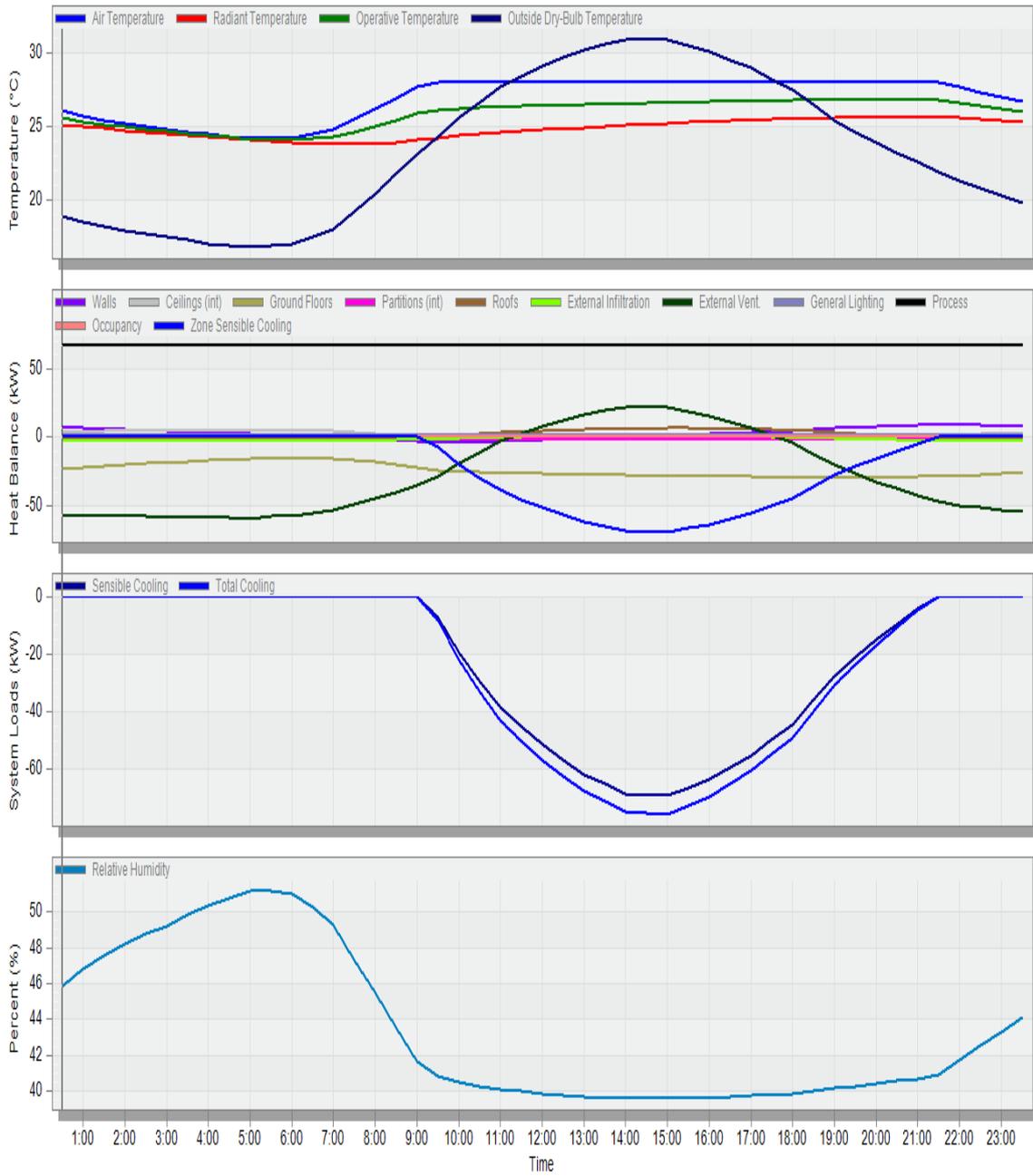
28.04

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 6

EnergyPlus Output

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



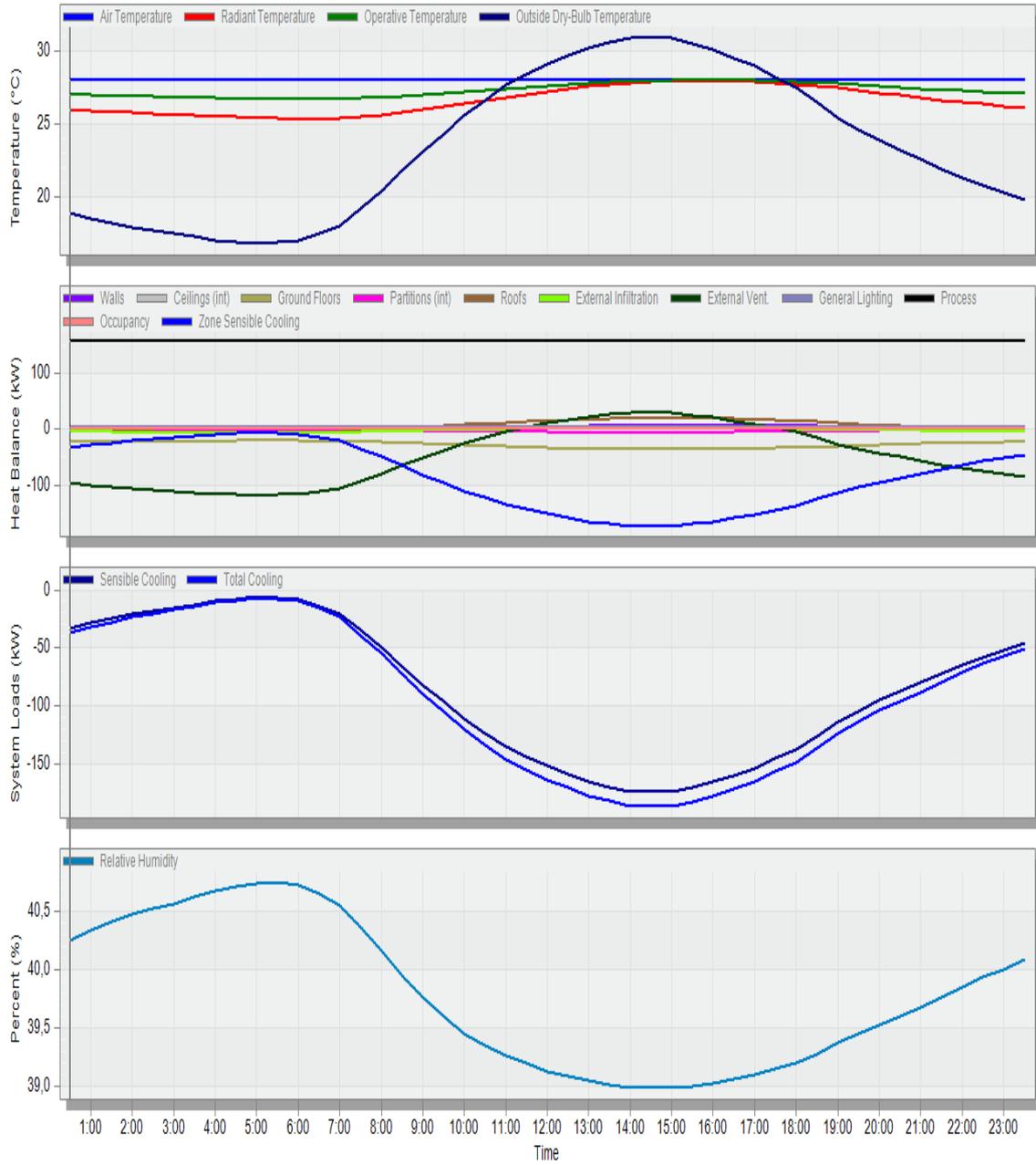
28.00

### Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 7

EnergyPlus Output

10 Jul, Sub-hourly

Licensed



## 6.7 Necessidades Energéticas Anuais de Arrefecimento Simuladas para o P2, P3 e P4

- **Temperatura de ar interior de 26°C**

| EnergyPlus Output |                                   | Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 2 |             | Licensed |  |
|-------------------|-----------------------------------|---|-------------|----------|--|
|                   |                                   | 1 Jan - 31 Dec, Run period              |             | Year     |  |
|                   | Air Temperature (°C)              |   | 24,97       |          |  |
|                   | Radiant Temperature (°C)          |   | 28,77       |          |  |
|                   | Operative Temperature (°C)        |   | 26,87       |          |  |
|                   | Outside Dry-Bulb Temperature (°C) |   | 14,32       |          |  |
|                   | Walls (kWh)                       |   | -74228,18   |          |  |
|                   | Ceilings (int) (kWh)              |   | -164614,95  |          |  |
|                   | Ground Floors (kWh)               |   | -418666,50  |          |  |
|                   | Partitions (int) (kWh)            |   | -74460,56   |          |  |
|                   | Roofs (kWh)                       |   | -6559,88    |          |  |
|                   | External Infiltration (kWh)       |   | -69803,78   |          |  |
|                   | External Vent. (kWh)              |   | -1339278,50 |          |  |
|                   | General Lighting (kWh)            |   | 38687,64    |          |  |
|                   | Process (kWh)                     |   | 4156405,75  |          |  |
|                   | Occupancy (kWh)                   |   | 12763,73    |          |  |
|                   | Zone Sensible Heating (kWh)       |   | 279,57      |          |  |
|                   | Zone Sensible Cooling (kWh)       |   | -2143309,25 |          |  |

| EnergyPlus Output |                                   | Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 3 |             | Licensed |  |
|-------------------|-----------------------------------|---|-------------|----------|--|
|                   |                                   | 1 Jan - 31 Dec, Run period              |             | Year     |  |
|                   | Air Temperature (°C)              |   | 24,43       |          |  |
|                   | Radiant Temperature (°C)          |   | 26,05       |          |  |
|                   | Operative Temperature (°C)        |   | 25,24       |          |  |
|                   | Outside Dry-Bulb Temperature (°C) |   | 14,32       |          |  |
|                   | Walls (kWh)                       |   | -65076,83   |          |  |
|                   | Ceilings (int) (kWh)              |   | -273860,66  |          |  |
|                   | Ground Floors (kWh)               |   | -309824,28  |          |  |
|                   | Partitions (int) (kWh)            |   | -34689,91   |          |  |
|                   | Roofs (kWh)                       |   | -52,35      |          |  |
|                   | External Infiltration (kWh)       |   | -62808,32   |          |  |
|                   | General Lighting (kWh)            |   | 30934,32    |          |  |
|                   | Process (kWh)                     |   | 3927905,25  |          |  |
|                   | Occupancy (kWh)                   |   | 5531,03     |          |  |
|                   | Zone Sensible Heating (kWh)       |   | 0,81        |          |  |
|                   | Zone Sensible Cooling (kWh)       |   | -3208051,75 |          |  |

## Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 4

EnergyPlus Output

1 Jan - 31 Dec, Run period

Licensed

|                                   | Year       |
|-----------------------------------|------------|
| Air Temperature (°C)              | 24,50      |
| Radiant Temperature (°C)          | 23,97      |
| Operative Temperature (°C)        | 24,24      |
| Outside Dry-Bulb Temperature (°C) | 14,32      |
| Walls (kWh)                       | -56072,71  |
| Ceilings (int) (kWh)              | -102987,02 |
| Ground Floors (kWh)               | -323493,31 |
| Partitions (int) (kWh)            | -75537,84  |
| Roofs (kWh)                       | -108,12    |
| External Infiltration (kWh)       | -91928,29  |
| External Vent. (kWh)              | -982799,13 |
| General Lighting (kWh)            | 39678,97   |
| Process (kWh)                     | 2504253,50 |
| Occupancy (kWh)                   | 13979,43   |
| Zone Sensible Heating (kWh)       | 608,62     |
| Zone Sensible Cooling (kWh)       | -932075,50 |

- Temperatura de ar interior de 28°C

## Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 2

EnergyPlus Output

1 Jan - 31 Dec, Run period

Licensed

|                                   | Year        |
|-----------------------------------|-------------|
| Air Temperature (°C)              | 26,57       |
| Radiant Temperature (°C)          | 29,42       |
| Operative Temperature (°C)        | 28,00       |
| Outside Dry-Bulb Temperature (°C) | 14,32       |
| Walls (kWh)                       | -78615,87   |
| Ceilings (int) (kWh)              | -172620,73  |
| Ground Floors (kWh)               | -447460,06  |
| Partitions (int) (kWh)            | -81442,77   |
| Roofs (kWh)                       | -6980,61    |
| External Infiltration (kWh)       | -80178,32   |
| External Vent. (kWh)              | -1564651,88 |
| General Lighting (kWh)            | 38687,64    |
| Process (kWh)                     | 4156405,75  |
| Occupancy (kWh)                   | 10236,24    |
| Zone Sensible Heating (kWh)       | 280,65      |
| Zone Sensible Cooling (kWh)       | -1849485,63 |

## Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 3

EnergyPlus Output

1 Jan - 31 Dec, Run period

Licensed

|                                   | Year        |
|-----------------------------------|-------------|
| Air Temperature (°C)              | 24,77       |
| Radiant Temperature (°C)          | 26,28       |
| Operative Temperature (°C)        | 25,52       |
| Outside Dry-Bulb Temperature (°C) | 14,32       |
| Walls (kWh)                       | -66347,52   |
| Ceilings (int) (kWh)              | -274873,34  |
| Ground Floors (kWh)               | -317738,22  |
| Partitions (int) (kWh)            | -30170,50   |
| Roofs (kWh)                       | -53,44      |
| External Infiltration (kWh)       | -64888,93   |
| External Vent. (kWh)              | -1448870,00 |
| General Lighting (kWh)            | 30934,32    |
| Process (kWh)                     | 3927905,25  |
| Occupancy (kWh)                   | 5557,37     |
| Zone Sensible Heating (kWh)       | 171,02      |
| Zone Sensible Cooling (kWh)       | -1751047,75 |

## Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 4

EnergyPlus Output

1 Jan - 31 Dec, Run period

Licensed

|                                   | Year        |
|-----------------------------------|-------------|
| Air Temperature (°C)              | 25,97       |
| Radiant Temperature (°C)          | 24,56       |
| Operative Temperature (°C)        | 25,27       |
| Outside Dry-Bulb Temperature (°C) | 14,32       |
| Walls (kWh)                       | -62133,52   |
| Ceilings (int) (kWh)              | -115818,47  |
| Ground Floors (kWh)               | -355747,03  |
| Partitions (int) (kWh)            | -84724,09   |
| Roofs (kWh)                       | -114,99     |
| External Infiltration (kWh)       | -105025,32  |
| External Vent. (kWh)              | -1136381,50 |
| General Lighting (kWh)            | 39678,97    |
| Process (kWh)                     | 2504253,50  |
| Occupancy (kWh)                   | 11432,88    |
| Zone Sensible Heating (kWh)       | 564,36      |
| Zone Sensible Cooling (kWh)       | -701948,75  |

- **Temperatura operativa de 28°C**

| EnergyPlus Output                 | Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 2 | 1 Jan - 31 Dec, Run period | Year        | Licensed |
|-----------------------------------|---|----------------------------|-------------|----------|
| Air Temperature (°C)              |   |                            | 24,97       |          |
| Radiant Temperature (°C)          |   |                            | 28,77       |          |
| Operative Temperature (°C)        |   |                            | 26,87       |          |
| Outside Dry-Bulb Temperature (°C) |   |                            | 14,32       |          |
| Walls (kWh)                       |   |                            | -74228,18   |          |
| Ceilings (int) (kWh)              |   |                            | -164614,95  |          |
| Ground Floors (kWh)               |   |                            | -418666,50  |          |
| Partitions (int) (kWh)            |   |                            | -74460,56   |          |
| Roofs (kWh)                       |   |                            | -6559,88    |          |
| External Infiltration (kWh)       |   |                            | -69803,78   |          |
| External Vent. (kWh)              |   |                            | -1339278,50 |          |
| General Lighting (kWh)            |   |                            | 38687,64    |          |
| Process (kWh)                     |   |                            | 4156405,75  |          |
| Occupancy (kWh)                   |   |                            | 12763,73    |          |
| Zone Sensible Heating (kWh)       |   |                            | 279,57      |          |
| Zone Sensible Cooling (kWh)       |   |                            | -2143309,25 |          |

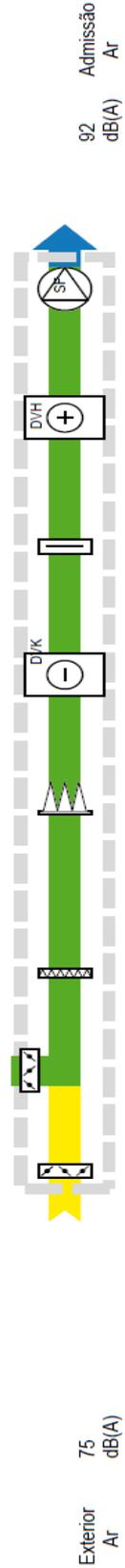
| EnergyPlus Output                 | Temperature and Heat Gains - PAVILHÃO 3 | 1 Jan - 31 Dec, Run period | Year        | Licensed |
|-----------------------------------|---|----------------------------|-------------|----------|
| Air Temperature (°C)              |   |                            | 24,05       |          |
| Radiant Temperature (°C)          |   |                            | 25,91       |          |
| Operative Temperature (°C)        |   |                            | 24,98       |          |
| Outside Dry-Bulb Temperature (°C) |   |                            | 14,32       |          |
| Walls (kWh)                       |   |                            | -64063,14   |          |
| Ceilings (int) (kWh)              |   |                            | -270752,28  |          |
| Ground Floors (kWh)               |   |                            | -304492,41  |          |
| Partitions (int) (kWh)            |   |                            | -37067,78   |          |
| Roofs (kWh)                       |   |                            | -51,52      |          |
| External Infiltration (kWh)       |   |                            | -60474,64   |          |
| General Lighting (kWh)            |   |                            | 30934,32    |          |
| Process (kWh)                     |   |                            | 3927905,25  |          |
| Occupancy (kWh)                   |   |                            | 5788,01     |          |
| Zone Sensible Heating (kWh)       |   |                            | 1,93        |          |
| Zone Sensible Cooling (kWh)       |   |                            | -3220547,25 |          |

## 6.8 Datasheets dos Modelos das Unidades de Tratamento de Ar (UTA) da Proposta de Solução

- **UTA A e B**

| Dados ventilador                       | Insuflação   |  | Unidades |
|--|--|--|----------|
| Caudal de ar (1,205 kg/m³)             | 20000  |  | m³/h     |
| Vel. de passagem na secção             | 2.06   |  | m/s      |
| Pressão externa                        | 350  |  | Pa       |
| Velocidade ventilador                  | 1768   |  | r.p.m.   |
| Motor; Tensão; Corrente, Amp., nominal | 11.00; 3x400; 20.44  |  | kW/VA    |
| Ruído radiado                          | 65 dB(A)   |  |          |
| Alimentação eléctrica                  | L1 + L2 + L3 + N + PE (3x400V) 50 Hz                                       |  |          |
| Corrente consumida                     | 23.4 A   |  |          |
| Filtro Admissão / Extração             | G4 - Coarse 65% + F7 - ePM1 60% /  |  |          |
| Aquecimento, água                      | 167.6 kW ; 7.5/32.5°C  |  |          |
|  | Fluido 80/60°C ; 34.2 kPa ; 2.09 l/s ; 1 1/2" / 1 1/2" Ligações da tubagem |  |          |
| Bateria água fria                      | 260.5 kW ; 35.0/9.4°C  |  |          |
|  | Fluido 7/12°C ; 96.8 kPa ; 12.49 l/s ; 4" / 4" Ligações da tubagem         |  |          |

| Energia   | Dimensionamento | Médio          | Ventilador [kWh/ano<br>8760 horas] |
|---|-----------------|----------------|------------------------------------|
| SFP, filtros limpos incluindo o variador              | 1.46 kW/(m³/s)  | 1.46 kW/(m³/s) | 70820 kW                           |
| SFPe with dimensional filter press. incl. freq. conv. | 1.56 kW/(m³/s)  | 1.56 kW/(m³/s) | 76146 kW                           |
| SFPe with dimensional filter press. excl. freq. conv. | 1.49 kW/(m³/s)  | 1.49 kW/(m³/s) | 72339 kW                           |
|   | 2018            |                |                                    |
| Ecodesign aprovado                                    | Sim             |                |                                    |

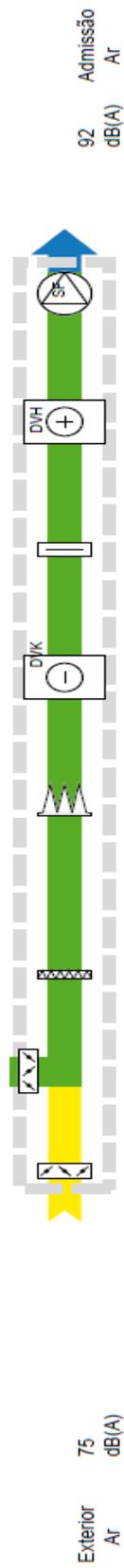


|                            | 0.8  | 7.5  | 7.5  | 7.5                    | 7.5                  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5       | 32.5 | 32.5 | 32.5 | 32.5                  |
|----------------------------|------|------|------|------------------------|----------------------|------|------|------|-----------|------|------|------|-----------------------|
| Inverno                    |      |      |      |                        |                      |      |      |      |           |      |      |      |                       |
| Temperatura antes (°C)     | 0.8  | 7.5  | 7.5  | 7.5                    | 7.5                  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5       | 32.5 | 32.5 | 32.5 | 32.5                  |
| Humidade após (%)          | 90   | 68   | 68   | 68                     | 68                   | 68   | 68   | 68   | 68        | 14   | 14   | 14   | 14                    |
| Perda de carga (Pa)        | 100  | 9    | 2    | 51                     | 110                  | 291  | -272 | -597 | -616      | 19   | 72   | 250  | 250                   |
| Pressão após elemento (Pa) | -100 | -111 | -102 | -162                   | -272                 | -594 | -597 | -597 | -616      | 19   | 72   | 250  | -                     |
|                            |      |      |      | G4 - Coarse 65% Filtro | F7 - ePM1 60% Filtro |      |      |      | 167.56 kW |      |      |      |                       |
|                            |      |      |      |                        |                      |      |      |      |           |      |      |      | Eficiência 79.0% (Pt) |
| Verão                      |      |      |      |                        |                      |      |      |      |           |      |      |      |                       |
| Temperatura antes (°C)     | 35.0 | 32.5 | 32.5 | 32.5                   | 32.5                 | 32.5 | 32.5 | 32.5 | 32.5      | 9.4  | 9.4  | 9.4  | 9.4                   |
| Humidade após (%)          | 35   | 37   | 37   | 37                     | 37                   | 100  | 100  | 100  | 100       | 100  | 100  | 100  | 100                   |
|                            |      |      |      |                        |                      |      |      |      |           |      |      |      | 260.55 kW             |

- **UTA C**

| Dados ventilador                       | Insuflação   |  | Unidades |
|--|--|--|----------|
| Caudal de ar (1,205 kg/m³)             | 20000  |  | m³/h     |
| Vel. de passagem na secção             | 2.06   |  | m/s      |
| Pressão externa                        | 350  |  | Pa       |
| Velocidade ventilador                  | 1727   |  | r.p.m.   |
| Motor; Tensão; Corrente, Amp., nominal | 11.00; 3x400; 20.44  |  | KW/V/A   |
| Ruído radiado                          | 65 dB(A)   |  |          |
| Alimentação eléctrica                  | L1 + L2 + L3 + N + PE (3x400V) 50 Hz                                       |  |          |
| Corrente consumida                     | 23.4 A   |  |          |
| Filtro Admissão / Extração             | G4 - Coarse 65% + F7 - ePM1 60% /  |  |          |
| Aquecimento, água                      | 167.6 kW ; 7.5/32.5°C  |  |          |
|  | Fluido 80/60°C ; 34.2 kPa ; 2.09 l/s ; 1 1/2" / 1 1/2" Ligações da tubagem |  |          |
| Bateria água fria                      | 209.7 kW ; 35.0/12.6°C   |  |          |
|  | Fluido 7/12°C ; 42.9 kPa ; 10.06 l/s ; 3" / 3" Ligações da tubagem         |  |          |

| Energia   | Dimensionamento | Médio          | Ventilador [kWh/ano<br>8760 horas] |
|---|-----------------|----------------|------------------------------------|
| SFP, filtros limpos incluindo o variador              | 1.31 kW/(m³/s)  | 1.31 kW/(m³/s) | 63656 kW                           |
| SFPe with dimensional filter press. incl. freq. conv. | 1.42 kW/(m³/s)  | 1.42 kW/(m³/s) | 69078 kW                           |
| SFPe with dimensional filter press. excl. freq. conv. | 1.35 kW/(m³/s)  | 1.35 kW/(m³/s) | 65624 kW                           |
|   | 2018            |                |                                    |
| Ecodesign aprovado                                    | Sim             |                |                                    |



|         |                            |      |      |                        |                      |      |      |      |           |                      |      |      |
|---------|----------------------------|------|------|------------------------|----------------------|------|------|------|-----------|----------------------|------|------|
| Inverno | Temperatura antes (°C)     | 0.8  | 7.5  | 7.5                    | 7.5                  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5       | 32.5                 | 32.5 | 32.5 |
|         | Humidade após (%)          | 90   | 68   | 68                     | 68                   | 68   | 68   | 68   | 68        | 14                   | 14   | 14   |
|         | Perda de carga (Pa)        | 100  | 9    | 2                      | 51                   | 110  | 175  | 3    | 19        | 72                   | 250  | 250  |
|         | Pressão após elemento (Pa) | -100 | -111 | -102                   | -162                 | -272 | -477 | -480 | -499      | 250                  | -    | -    |
|         |                            |      |      | G4 - Coarse 65% Filtro | F7 - ePM1 60% Filtro |      |      |      | 167.56 kW | Eficiência 77.7% (Pr |      |      |
| Verão   | Temperatura antes (°C)     | 35.0 | 32.5 | 32.5                   | 32.5                 | 32.5 | 32.5 | 32.5 | 32.5      | 12.6                 | 12.6 | 12.6 |
|         | Humidade após (%)          | 35   | 37   | 37                     | 37                   | 37   | 99   | 99   | 99        | 99                   | 99   | 99   |
|         |                            |      |      |                        |                      |      |      |      | 209.67 kW |                      |      |      |