



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Modelação numérica do desempenho energético de câmaras de conservação para produtos alimentares

João Pedro Marques Gonçalves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho da Silva
Coorientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar

Covilhã, outubro de 2014

Dedicatória

Aos meus pais, por tudo!

*“With your mind power, your determination, your instinct,
and the experience as well, you can fly very high.”*

Ayrton Senna, 1991

Agradecimentos

A presente dissertação é resultado do contributo e incentivo de diversas pessoas a quem aproveito para deixar a minha gratidão.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Pedro Dinho da Silva, pelo apoio científico na orientação deste trabalho. Sem a sua disponibilidade, conselhos e motivação, esta dissertação não seria realizada.

Gostaria, ainda, de deixar uma palavra de apreço ao meu coorientador, o Professor Pedro Dinis Gaspar, pela preocupação e conhecimentos transmitidos no decorrer do trabalho.

Quero agradecer, também, ao Professor José Nunes pelos dados que me facultou.

Por outro lado, agradeço aos meus pais, não só pelo meu percurso académico, mas por tudo o que fizeram por mim ao longo da minha vida, sem eles era impossível ter chegado onde cheguei. A eles, devo-lhes tudo!

À minha irmã agradeço o apoio, amizade e amor que sempre me presenteou.

À Rita estou-lhe grato pelo apoio e a compressão, por me escutar, motivar e aconselhar.

A todos os meus amigos, eles sabem bem quem são, quero agradecer as palavras de ânimo, a amizade, a entreaajuda e o companheirismo.

Quero agradecer ao meu avô e tio-avô e a toda a minha família por me terem acompanhado até aqui.

Por fim, agradeço a todos o que contribuíram pelo sucesso desta dissertação.

Resumo

Nos dias atuais, os sistemas de frio industrial desempenham um papel determinante para a sustentabilidade alimentar da sociedade mundial, dado que inibem o desenvolvimento microbiano nos alimentos, prevenindo e retardando a deterioração destes. A utilização do frio para a conservação dos produtos alimentares requer grandes consumos de energia elétrica, assim, é crucial minimizar o consumo de energia dos sistemas de refrigeração. Com recurso a ferramentas computacionais podemos analisar soluções que minimizem os consumos de energia de uma forma rápida e económica. Neste trabalho foram modelados três casos reais no EnergyPlus, sendo realizada uma validação empírica dos modelos. Os resultados obtidos demonstram que as cargas térmicas por transmissão através dos elementos construtivos são as que mais afetam o desempenho energético das câmaras de refrigeração. Para o caso A, caso B e caso C, estas cargas térmicas representaram 77 %, 66 % e 85 %, respetivamente, da necessidade de refrigeração das empresas. O chão é o elemento construtivo por onde ocorrem maiores ganhos térmicos e a melhoria do isolamento deste elemento poderá trazer ganhos económicos para estas empresas. O desvão por cima das câmaras é outro ponto que merece algum cuidado, uma vez que esta zona é adjacente às câmaras e a amplitude térmica é significativa. A utilização de materiais com um coeficiente de transferência de calor reduzido na cobertura por cima das câmaras apresenta-se como uma solução para garantir temperaturas mais baixas nessa zona.

Palavras-chave

Eficiência energética, Racionalização de energia, Modelação numérica, EnergyPlus/DesignBuilder, Câmaras de refrigeração

Abstract

Currently, the industrial cooling systems perform a crucial role in food sustainability of worldwide society, since they inhibit the microbial growth, preventing and delaying food deterioration. The cold use in food products conservation requires large electrical energy consumption, thus it is necessary to minimize the energy consumption of refrigeration systems. Using computational tools is possible to analyse solutions that minimize energy consumption in a fast and economical way. In this dissertation were modelled three real cases in EnergyPlus and was made an empirical validation of the models. The results show that thermal loads by transmission through building elements are those that most affect the energy performance of refrigerated rooms. Those thermal loads represent 77 %, 66 % and 85 %, for case A, B and C, respectively, of the establishment refrigeration needs. The floor is the constructive element through which occur the larger thermal gains. The floor isolation improvement could bring economic gains for these companies. The loft above the refrigeration rooms is another point that deserves some attention, once this zone is adjacent with the cameras, and the thermal amplitude between these two zones is significant. Using materials with a low overall heat transfer coefficient in the roof over the refrigeration rooms is presented as a solution to ensure a lower temperature in this zone.

Keywords

Energy efficiency, Energy rationalization, Numerical modeling, EnergyPlus/DesignBuilder, Refrigeration rooms

Índice

Dedicatória	i
Agradecimentos	iii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas	x
Nomenclatura	xxi
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1. Perspetiva geral.....	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	4
1.3. Revisão bibliográfica	6
1.3.1. Estudos numéricos	7
1.3.2. Estudos experimentais	10
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação.	10
1.5. Visão geral e organização da dissertação	11
Capítulo 2.....	13
2. Fundamentos teóricos.....	13
2.1 Introdução	13
2.2 Cálculo das cargas térmicas	17
2.2.1 Carga térmica por transmissão de calor	18
2.2.2 Carga dos produtos	19
2.2.3 Cargas internas	19
2.2.4 Carga térmica por infiltração	21
2.2.5 Cargas do equipamento de refrigeração	24
2.2.6 Carga total	25
2.3 Métodos numéricos	25
2.4 Nota conclusiva	28
Capítulo 3.....	29
3. Ferramenta computacional	29
3.1 EnergyPlus	29

3.2 DesignBuilder	31
3.2.1 Barra de ferramentas.....	32
3.2.2 Aba de dados de modelação	32
3.2.3 Painel de navegação.....	43
3.2.4 Ecrã de edição	43
3.2.5 Painel de informação	43
3.2.6 Abas de cálculos.....	44
3.3 Nota conclusiva	48
Capítulo 4.....	49
4. Estudo de casos: Câmaras de refrigeração	49
4.1 Caso A.....	49
4.1.1 Modelação do caso A	50
4.1.2 Análise e discussão dos resultados	57
4.1.3 Potencial de melhoria	63
4.2 Caso B.....	66
4.2.1 Modelação do caso B.....	67
4.2.2 Análise e discussão dos resultados	73
4.2.3 Potencial de melhoria	78
4.3 Caso C.....	80
4.3.1 Modelação do caso C	80
4.3.2 Análise e discussão dos resultados	87
4.3.3 Potencial de melhoria	92
Capítulo 5.....	95
5. Conclusão	95
5.1. Recapitulação	95
5.2. Sugestões para trabalho futuros	96
Referências bibliográficas.....	97

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Desagregação do consumo de energia elétrica, por grupo consumidor, numa instalação refrigerada típica (Lekov <i>et al.</i> , 2009).	3
Figura 1.2 - Evolução do Saldo Importador de Produtos Energéticos (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2014).	5
Figura 2.1 - Exemplo da constituição de uma câmara em alvenaria.	14
Figura 2.2 - Esquema de um exemplo de uma câmara pré-modular (Ambiente Gelado, 2009).	15
Figura 2.3 - Exemplo de uma placa de painel sandwich (PERFILNORTE, 2014).	16
Figura 2.4 - Perfil das infiltrações de ar após abertura da porta.	22
Figura 2.5 - Diagrama utilizado para o cálculo da carga de calor sensível por infiltração de ar.	23
Figura 2.6 - Esquema ilustrativo do balanço energético das cargas térmicas numa zona (Cúmano, 2009).	27
Figura 3.1 - Dados de entrada e de saída no EnergyPlus.	30
Figura 3.2 - Diagrama da estrutura de funcionamento do EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2013b).	30
Figura 3.3 - Ambiente de trabalho do DesignBuilder.	32
Figura 3.4 - <i>Slider bar</i> de caracterização do horário de ocupação no modo <i>Timing</i>	34
Figura 3.5 - Calendário de caracterização do horário de ocupação no modo <i>Schedules</i>	34
Figura 3.6 - Histograma do período de ocupação diária, em intervalos de 15 minutos.	35
Figura 3.7 - Convenção utilizada pelo DB para definir os diferentes elementos construtivos (Martins, 2012).	37
Figura 3.8 Esquema dos tipos de luminárias disponíveis no DesignBuilder (DesignBuilder, 2014).	39
Figura 3.9 - Exemplificação do funcionamento do controlo do tipo linear.	40
Figura 3.10 - Exemplificação do funcionamento do controlo por degraus.	41
Figura 3.11 - Hierarquia de navegação do DesignBuilder.	43
Figura 3.12 - Ambiente de trabalho do DesignBuilder quando o modo “learning” está desativo.	44
Figura 3.13 - Exemplo da utilização de uma “virtual partition”. À esquerda o aspeto do edifício na “área de modelação” e à direita o aspeto real do edifício no menu “visualise”.	45
Figura 3.14 - <i>Rendering</i> do exemplo de uma habitação construída no DesignBuilder.	45
Figura 4.1 - Perspetiva da fachada da empresa A.	50
Figura 4.2 - Perspetiva da fachada da empresa A modelada no DesignBuilder.	50
Figura 4.3 - Planta da modelação da empresa do caso A.	51
Figura 4.4 - Período de ocupação diária definido para a “Zona de receção”.	55
Figura 4.5 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona de receção”.	55
Figura 4.6 - Período de ocupação diária definido para a “Zona das câmaras”.	55
Figura 4.7 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona das câmaras”.	56
Figura 4.8 - Período de ocupação diária definido para a “Zona de armazenamento”.	56
Figura 4.9 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona de armazenamento”.	56
Figura 4.10 - Período de ocupação diária definido para as câmaras 1 e 2.	57
Figura 4.11 - Horário de ocupação anual definido para as câmaras 1 e 2.	57
Figura 4.12 - Comparação do consumo de energia, total e parcial, do caso real e da simulação, durante a auditoria.	58
Figura 4.13 - Valores de temperatura da câmara 1 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.	59
Figura 4.14 - Valores de temperatura da câmara 2 (azul claro) e de bolbo seco do exterior (azul escuro) no DB.	59
Figura 4.15 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 1, numa semana.	60
Figura 4.16 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 2, numa semana.	60
Figura 4.17 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, numa semana.	61
Figura 4.18 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, numa semana.	61
Figura 4.19 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso A, numa semana.	62

Figura 4.20 - Temperatura no desvão na “Zona das câmaras” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho).....	62
Figura 4.21 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 1.....	63
Figura 4.22 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2.....	63
Figura 4.23 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso A, numa semana, após a melhoria do chão das câmaras.	64
Figura 4.24 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes da câmara 2.	64
Figura 4.25 - Temperatura no desvão na “Zona das câmaras” após a melhoria na cobertura (preto).	65
Figura 4.26 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações na câmara 1, após a melhoria da cobertura da “Zona das câmaras”.	65
Figura 4.27 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações na câmara 1, após a melhoria da cobertura da “Zona das câmaras”.	65
Figura 4.28 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso A, numa semana, após a melhoria das superfícies envidraçadas.	66
Figura 4.29 - Perspetiva da fachada da empresa B.	67
Figura 4.30 - Perspetiva da fachada da empresa B modelada no DesignBuilder.	67
Figura 4.31 - Planta da modelação da empresa do caso B.	68
Figura 4.32 - Período de ocupação diária definido para a zona “Diversos”.	71
Figura 4.33 - Horário de ocupação anual definido para a zona “Diversos”.	71
Figura 4.34 - Período de ocupação diária definido para a “Zona das câmaras”.	72
Figura 4.35 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona das câmaras”.	72
Figura 4.36 - Período de ocupação diária definido para as câmaras 1 e 2.	72
Figura 4.37 - Horário de ocupação anual definido para as câmaras 1 e 2.	73
Figura 4.38 - Comparação do consumo de energia, total e parcial, do caso real e da simulação, durante a auditoria.	74
Figura 4.39 - Valores de temperatura da câmara 1 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB	74
Figura 4.40 - Valores de temperatura da câmara 2 (azul claro) e de bolbo seco do exterior (azul escuro) no DB.	74
Figura 4.41 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 1, numa semana.	75
Figura 4.42 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 2, numa semana.	75
Figura 4.43 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, numa semana.....	76
Figura 4.44 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 2, numa semana.....	76
Figura 4.45 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso B, numa semana.	77
Figura 4.46 - Temperatura na zona “Diversos” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho).	77
Figura 4.47 - Temperatura no desvão na “Zona das câmaras” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho).....	78
Figura 4.48 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 1.....	78
Figura 4.49 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2.....	79
Figura 4.50 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes da câmara 2.	79
Figura 4.51 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão e das paredes da câmara 2.	80
Figura 4.52 - Perspetiva da fachada da empresa C	80
Figura 4.53 - Perspetiva da fachada da empresa C modelada no DesignBuilder	81
Figura 4.54 - Planta da modelação da empresa do caso C	81
Figura 4.55 - Período de ocupação diária definido da zona “Diversos”	85
Figura 4.56 - Horário de ocupação anual definido para a zona “Diversos”	85
Figura 4.57 - Período de ocupação diária definido da “Zona das câmaras”	85
Figura 4.58 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona das câmaras”	86

Figura 4.59 - Período de ocupação diária definido para as câmaras 1, 2 e 3.....	86
Figura 4.60 - Horário de ocupação anual definido para as câmaras 1, 2 e 3	86
Figura 4.61 - Comparação do consumo de energia, total e parcial, do caso real e da simulação, durante a auditoria.	87
Figura 4.62 - Valores médios mensais da temperatura da câmara 1 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.	88
Figura 4.63 - Valores médios mensais da temperatura da câmara 2 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.	88
Figura 4.64 - Valores médios mensais da temperatura da câmara 3 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.	88
Figura 4.65 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 1, num ano.	89
Figura 4.66 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 2, num ano.	89
Figura 4.67 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 3, num ano.	90
Figura 4.68 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, num ano.	90
Figura 4.69 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 2, num ano.	91
Figura 4.70 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 3, num ano.	91
Figura 4.71 - Temperatura médias mensais no desvão na “Zona das câmaras” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho)	91
Figura 4.72 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 1, num ano.	92
Figura 4.73 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2, num ano.	92
Figura 4.74 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2, num ano.	93
Figura 4.75 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes e do teto da câmara 1.	93
Figura 4.76 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes e do teto da câmara 2.	93
Figura 4.77 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes e do teto da câmara 3.	94
Figura 4.78 - Temperaturas médias mensais no desvão na “Zona das câmaras” após a melhoria na cobertura (preto).	94

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Necessidades de refrigeração e perdas devido à falta de refrigeração, a nível mundial e por tipos de países (International Institute of Refrigeration, 2009).....	3
Tabela 2.1 - Propriedades de alguns materiais utilizados como isolante térmico (Oliveira, 2007).	16
Tabela 2.2 - Espessura de poliuretano expandido recomenda para diferentes gamas de temperaturas no interior da câmara de refrigeração (Ambiente Gelado, 2009).	17
Tabela 2.3 - Estimativa do calor libertado por pessoa ASHRAE (2006b).	20
Tabela 2.4 - Taxa de calor sensível do ganho de calor da infiltração de ar (<i>RS</i>).	23
Tabela 3.1 - Exemplo de algumas atividades metabólicas que o <i>software</i> apresenta.	35
Tabela 3.2 - Decomposição da luz em diferentes frações, por tipo de luminária.	40
Tabela 4.1 - Elementos construtivos do edifício da empresa do caso A.....	51
Tabela 4.2 - Elementos construtivos da câmara 1 da empresa do caso A.....	52
Tabela 4.3 - Elementos construtivos da câmara 2 da empresa do caso A.....	52
Tabela 4.4 - Parâmetros de caracterização das diferentes zonas da empresa do caso A.....	53
Tabela 4.5 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica e latente dos produtos, para as câmaras 1 e 2, caso A.	53
Tabela 4.6 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica por infiltrações (<i>Q_{inf}</i>), das câmara 1 e 2, caso A.	54
Tabela 4.7 - Elementos construtivos do edifício da empresa B.	68
Tabela 4.8 - Elementos construtivos das câmaras 1 e 2 da empresa B.	69
Tabela 4.9 - Parâmetros de caracterização das diferentes zonas da empresa do caso B.....	69
Tabela 4.10 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica e latente dos produtos, para as câmaras 1 e 2, caso B.	70
Tabela 4.11 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica por infiltrações (<i>Q_{inf}</i>), das câmara 1 e 2.	70
Tabela 4.12 - Elementos construtivos do edifício da empresa C.....	82
Tabela 4.13 - Elementos construtivos das câmaras 1, 2 e 3 da empresa C.....	82
Tabela 4.14 - Parâmetros de caracterização das diferentes zonas da empresa do caso C.	83
Tabela 4.15 - Dados utilizados no cálculo da carga térmica e latente dos produtos, para as câmaras 1, 2 e 3, caso C.....	83
Tabela 4.16 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica por infiltrações (<i>Q_{inf}</i>), das câmara 1 e 2.	84

Nomenclatura

Acrónimos:

ANSI	American National Standards Institute
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
CAD	Computer Aided Design
CE	Comunidade Europeia
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CIE	Consumo Intensivo de Energia
COP	Coefficient Of Performance
CTF	Conduction Transfer Function
CFD	Computational Fluid Dynamics
DB	DesignBuilder
DFC	Dinâmica de Fluidos Computacional
DL	Decreto-Lei
EPS	Poliestireno expandido
FPFA	Fan-Coil Plus Fresh Air
GUI	Graphical User Interface
HR-VRF	Heat Recovery Variable Refrigerant Flow
ISO	International Organization for Standardization
NCM	National Calculations Methodology

PREn	Planos de Racionalização dos Consumos de Energia
PUF	Espuma de poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
RCCTE	Regulamentos das Características de Comportamento Térmicos dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética
SGCIE	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia
UBI	Universidade da Beira Interior
VAV	Variable Air Volume
VRF	Variable Refrigerant Flow

Lista de Símbolos:

A	Área	$[m^2]$
c	Calor específico	$\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$ ou $\left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}\right]$
D_f	Fator de caudal de ar na porta	
D_t	Fator de tempo da porta aberta	
E	Energia	[J] ou [kWh]
F_{LM}	Fator de carga do motor	
F_{SA}	Fator de tolerância especial de iluminação	
F_{UL}	Fator de utilização da iluminação	
F_{UM}	Fator de utilização do motor	
H	Altura da porta	[m]
h_{ar}	Entalpia do ar no interior da câmara	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
h_i	Coefficiente de convecção da superfície interior	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ ou $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
h_{inf}	Entalpia do ar infiltrado	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
h_o	Coefficiente de convecção da superfície exterior	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ ou $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
h_l	Entalpia de vaporização	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
k_i	Coefficiente de condutibilidade térmica	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ ou $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$
i	Elemento interno da superfície	
L	Largura da porta	[m]
m	Massa	[kg]
\dot{m}	Taxa de produto refrigerado	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
\dot{m}_{inf}	Caudal mássico de ar infiltrado	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
o	Elemento externo da superfície	
P	Número de passagens	$\left[\frac{1}{h}\right]$
P_e	Potência elétrica	[W]
q''	Fluxo de calor	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Q	Calor	[J]
Q_s	Calor sensível	[J]
\dot{Q}	Carga de refrigeração sensível e latente para um caudal totalmente estabelecido	[W]
\dot{Q}_{er}	Carga térmica do equipamento de refrigeração	[W]
\dot{Q}_{ilum}	Carga térmica da iluminação	[W]
\dot{Q}_i	Carga térmica interna	
\dot{Q}_{inf}	Carga térmica da infiltração	[W]
\dot{Q}_L	Carga latente do produto	[W]
\dot{Q}_{motor}	Carga térmica do motor	[W]

\dot{Q}_{ocup}	Carga térmica da ocupação	[W]
\dot{Q}_{prod}	Carga térmica dos produtos	[W]
\dot{Q}_{sist}	Taxa de troca de calor com o sistema de refrigeração	[W]
\dot{Q}_{total}	Carga térmica total	[W]
\dot{Q}_{trans}	Carga térmica por transmissão de calor	[W]
R_i	Resistência térmica do elemento i	$\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$
R_s	Taxa de calor sensível do ganho de calor da infiltração de ar	
U	Coefficiente global de transferência de calor	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$
v	Velocidade média do ar	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
t	Iteração atual Tempo	[s]
T	Temperatura	[K] ou [°C]
T_z	Temperatura na zona z	[K] ou [°C]
W	Trabalho	[J]
x_i	Espessura de cada camada de material	[m]

Símbolos Gregos

Δ	Varição
ε	Eficácia dos dispositivos de proteção
θ_d	Base temporal do cálculo
θ_o	Tempo de porta totalmente aberta
θ_p	Tempo de abertura de portas

Capítulo 1

Introdução

O primeiro capítulo desta dissertação pretende enquadrar o leitor com a importância da refrigeração na sociedade atual. Seguidamente será abordada a problemática que o consumo e produção de energia elétrica tem no meio ambiente e na economia do país, assim como, a importância de praticar medidas de eficiência energética. Neste capítulo são ainda reunidos trabalhos e estudos realizados por outros autores que utilizaram códigos computacionais de modelação numérica para estudar o desempenho energético de edifícios. Por fim, são descritos os objetivos e a contribuição desta dissertação, bem como, a organização da mesma.

1.1. Perspetiva geral

Os sistemas de frio industrial desempenham, atualmente, um papel preponderante na conservação de produtos alimentares, de tal forma que a falta ou a inexistência destes equipamentos representaria consequências significativas no sector agroalimentar, assim como, afetaria os nossos hábitos alimentares, dado que, no nosso dia-a-dia, necessitamos de uma grande variedade de alimentos frescos e de boa qualidade para satisfazer as nossas necessidades energéticas e nutricionais.

Desde os primórdios da Humanidade que o Homem procurou soluções para a conservação de alimentos que lhe permitissem transportá-los e conservá-los, para posteriormente os consumir, dado o carácter sazonal e regional de alguns produtos alimentares. Métodos tradicionais como a secagem, fumagem, salga ou salmoura, que apesar de aumentarem o tempo de conservação, apresentam algumas desvantagens, tais como, a alteração da aparência e do sabor originais, a limitação do tempo de armazenamento, entre outras. Porém, o Homem descobriu outro método tradicional que lhe permitiu preservar os alimentos, sem alterar as características iniciais dos mesmos e com perdas insignificantes de qualidade, o frio (Baptista *et al.*, 2007).

Em meados do século XIX, descobriu-se ser possível retirar calor de um sistema quando um gás é expandido, desta forma, deu-se início à produção industrial de gelo, e por consequente, o desenvolvimento em grande escala da atividade comercial de conservação de produtos alimentares, que nos dias atuais desempenha um papel insubstituível na qualidade e segurança alimentar.

A utilização de frio para a conservação de produtos alimentares tem como objetivo prevenir ou retardar a deterioração dos alimentos, mantendo um elevado grau de qualidade no que

respeita à aparência, sabor, odor e conteúdo nutritivo, visto que o seu valor comercial e a segurança alimentar dos consumidores depende destas características.

Os produtos alimentares que necessitam de frio para a manutenção das suas propriedades organoléticas são frequentemente apelidados de produtos alimentares perecíveis, sendo que estes são os que carecem de um maior cuidado, uma vez que qualquer excesso de temperatura a que estejam sujeitos, no transporte, no armazenamento ou no local de venda, potencia o desenvolvimento microbiológico, o que se traduz em níveis inaceitáveis da carga microbiana presente no produto. Tal situação compromete a qualidade do alimento e pode, casualmente, ter consequências em termos de segurança alimentar.

Coulomb (2008) afirma que os produtos alimentares como frutas e vegetais, produtos lácteos, carne, peixe e marisco, precisam de ser preservados. Estes produtos representam quase um terço de toda a produção agrícola e piscatória. Acrescenta, ainda, que apenas 10 % desses produtos alimentares perecíveis são, de facto, refrigerados e que cerca de 30 % de toda a produção mundial é desperdiçada após a colheita, apontando a refrigeração como opção para a redução dessas perdas.

Por outro lado, um estudo realizado pelo *International Institute of Refrigeration*, em 2009, revela que 25 % do total de alimentos produzidos, a nível mundial, resulta em perdas, sendo que 20 % é relativo a perdas por falta de refrigeração, Tabela 1.1. O mesmo estudo pressupõe que se os países em desenvolvimento adquirissem a mesma tecnologia de refrigeração que os países industrializados preservar-se-iam mais de 200 milhões de toneladas de produtos alimentares perecíveis, o que representa cerca de 14 % do atual consumo desses países (James e James, 2010).

Tabela 1.1 - Necessidades de refrigeração e perdas devido à falta de refrigeração, a nível mundial e por tipos de países (International Institute of Refrigeration, 2009).

	População mundial	Países desenvolvidos	Países em desenvolvimento
População em 2009 (10 ⁶ de habitantes)	6830	1230	5600
Capacidade de refrigeração (m ³ /1000 habitantes)	52	200	19
Nº de frigoríficos domésticos (/1000 habitantes)	172	627	70
Perda total de produtos alimentares (%)	25	10	28
Perdas de hortofrutícolas (%)	35	15	40
Perdas de produtos alimentares percíveis por falta de refrigeração (%)	20	9	23

Mattarolo (1990) estimou que 40 % de todos os produtos alimentares necessitam de refrigeração, o que se traduzia em 15 % do consumo mundial de energia. Lekov *et al.* (2009) refere que os sistemas de refrigeração utilizados para a conservação de produtos alimentares requerem consumos de energia significantes, como se comprova na Figura 2, visto que é primordial garantir uma temperatura constante ao longo de toda a cadeia de frio. James e James (2010) completam que o processo de produção de energia elétrica necessária para alimentar os equipamentos de frio liberta para a atmosfera quantidades significativas de CO₂ alertando também para a necessidade de utilização de práticas de eficiência energética.

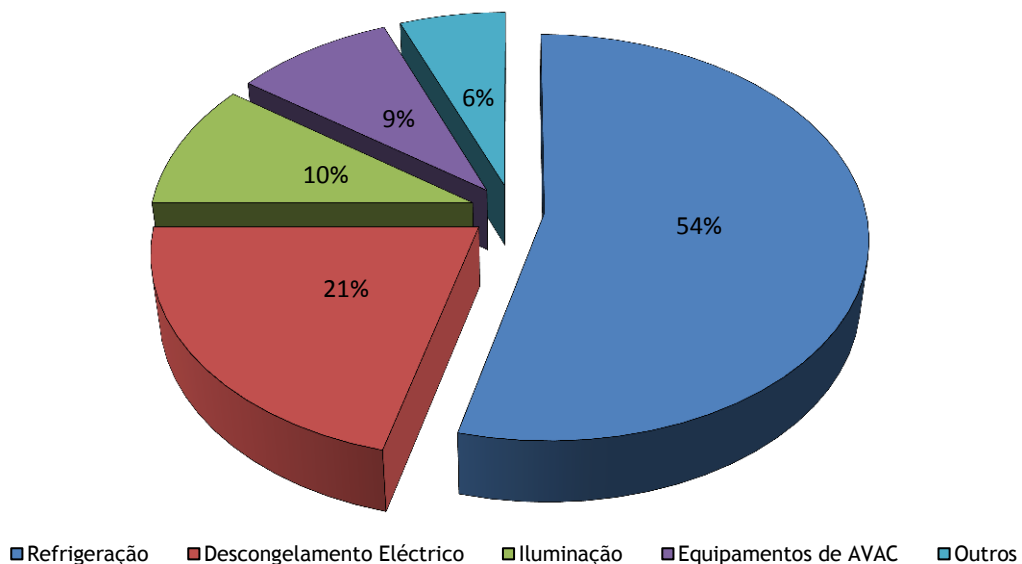


Figura 1.1 - Desagregação do consumo de energia elétrica, por grupo consumidor, numa instalação refrigerada típica (Lekov *et al.*, 2009).

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

A dependência de recursos fósseis sentida atualmente culminou em consequências nefastas na economia de muitos países e na sustentabilidade do planeta. Expressões como a redução de emissões de gases com efeito de estufa, o aquecimento global, a aposta em energias renováveis, a eficiência energética ou a gestão racional de energia são diariamente mencionadas nos meios de comunicação sociais.

Ao longo das últimas duas décadas, verificou-se que os comportamentos que a sociedade detinha colocavam em risco a sustentabilidade das gerações seguintes, como tal, emergiu o conceito de “desenvolvimento sustentável” definido como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (Câmara Municipal de Ourique, 2010). Posteriormente foram-se realizando cimeiras e definiram-se compromissos e metas com propósito de alcançar de forma mais efetiva os objetivos de desenvolvimento sustentável.

Em 2002, a Diretiva Comunitária 2002/91/CE - Certificação Energética de Edifícios, impôs aos estados-membros a emissão de Certificados Energéticos a Edifícios para as diversas situações de transação e remodelação de edifícios de habitação, bem como para todos os edifícios de serviços com mais de 1.000 m², sendo que, esta Diretiva visava a diminuição de 40 % e 22 % dos consumos da energia em edifícios na Europa e Portugal, respetivamente (Comunidade Europeia, 2002). Foi transposta, a 4 de abril de 2006, para o direito nacional através do DL n° 78/2006 relativo ao Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios - SCE, do DL n° 79/2006 relativo ao Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios - RSECE e do DL n° 80/2006 relativo ao Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE (Ministério da Economia e da Inovação, 2006).

A 15 de abril de 2008 saiu o DL n° 82/2008 que regula o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) de instalações consumidoras intensivas de energia (CIE) com consumo anual igual ou superior a 500 tep, e, cujo objetivo é a promoção da eficiência energética e a monitorização dos consumos energéticos das CIE. Para tal, definiu-se que as essas instalações realizem, periodicamente, auditorias energéticas que incidam nas condições de utilização de energia e promovam o aumento da eficiência energética, com a inclusão da utilização de fontes de energia renováveis. Prevê-se, também, que sejam elaborados e executados Planos de Racionalização dos Consumos de Energia (PREn) que contemplem objetivos mínimos de eficiência energética, assim, os seus cumprimentos servem como incentivo às entidades que exploram essas instalações (AREAM, 2008).

Em 2011 desenvolveu-se a norma ISO 50001, com o objetivo de “definir os requisitos para um sistema de gestão da energia (SGE) que permita às organizações estabelecer os sistemas

e processos necessários para melhorar o seu desempenho energético global, incluindo a utilização, consumo e eficiência energética”, ou seja, reduzir os custos da fatura energética e minimizar as emissões de gases com efeito de estufa, bem como outros impactos ambientais relacionados, através de uma gestão sistemática da energia (APCER, 2013).

Por outro lado, é necessário atender que os fluidos refrigerantes utilizados nos ciclos de refrigeração têm efeitos nefastos para o meio ambiente, uma vez que destroem a camada do ozono e potenciam o aquecimento global. O impacto ambiental causado pelos sistemas de AVAC e Refrigeração é definido como o impacto do aquecimento total equivalente, sendo este a soma das emissões diretas de fluidos refrigerantes, expressas em CO₂ equivalentes, das emissões indiretas de CO₂ resultante da energia utilizada pelos sistemas e das emissões provocadas pelo fabrico do fluido refrigerante (Duarte, 2013).

A libertação de dióxido de carbono, o maior responsável pelo efeito de estufa, e de gases fluorados para a atmosfera traduz-se em efeitos irreversíveis no Planeta, desde alterações do clima, aumento dos níveis dos mares, desequilíbrios de ecossistemas, entre outros. O aumento da temperatura média global acarreta um impacto significativo nas cadeias de frio alimentar, visto que favorece a multiplicação de microrganismos patogénicos, por consequente, exige uma maior potência de refrigeração para garantir as temperaturas de conservação pretendidas, o que por sua vez leva a um maior consumo de energia (James e James, 2010).

Em termos nacionais, Portugal é um país com escassos recursos energéticos endógenos, particularmente aqueles que garantem as necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos, como o petróleo, o carvão e o gás natural. Como é visível na Figura 1.2, em 2013, o Saldo Importador de Produtos Energéticos rondou os 6,2 mil milhões de euros, registando uma redução de 12,8 % face a 2012.

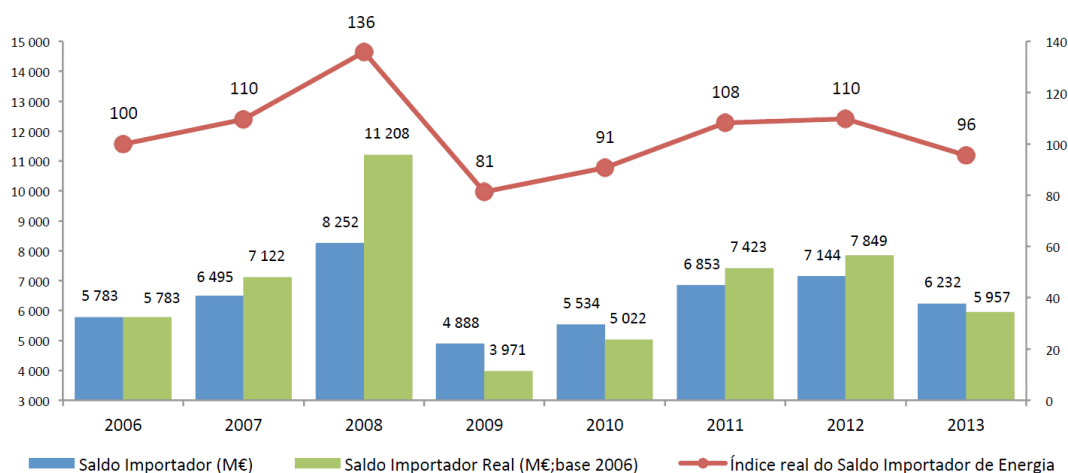


Figura 1.2 - Evolução do Saldo Importador de Produtos Energéticos (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2014).

Do total de recursos energéticos importados, no referido ano, Portugal contabilizou 11,36 mil milhões de euros, dos quais 9,5 mil milhões em produtos petrolíferos, 1,34 mil milhões em gás natural, 254 milhões em carvão e 257 milhões em energia elétrica (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2014).

Estes dados ilustram a dimensão da nossa dependência energética, desta forma, é fulcral racionalizar a energia de que dispomos, de modo a diminuirmos a dependência energética atual. A eficiência energética é uma política que permite racionalizar a energia e que consiste em “investir de modo a reduzir o desperdício de energia, aumentar a qualidade de vida e poupando dinheiro através de uma condução de utilização mais responsável, económica e racional de energia” (CCE, 2006).

Em termos empresariais, é cada vez mais visível a preocupação em diminuir a fatura energética, como tal, é crescente a implementação de medidas e procedimentos que asseguram e promovem a eficiência energética e que visam a diminuição do consumo, com recurso a novas tecnologias, modificando processos de fabrico e alterando comportamentos (CITEVE, 2012).

Em relação à energia consumida pelas instalações refrigeradas, edifícios ou secções de edifícios que conseguem controlar as condições de armazenamento alimentar, com recurso à refrigeração, esta está diretamente relacionada com diversos fatores, tais como, a qualidade construtiva do edifício, as condições ambientais exteriores, as temperaturas de operação, o tamanho da câmara, a disposição do *stock*, a temperatura de entrada dos produtos, entre outros (Baptista *et al.*, 2007; James e James, 2010).

Com o intuito de estudar as condicionantes que afetam o desempenho energético das câmaras de conservação, foi recolhida informação relativa a trabalhos e estudos já realizados, a fim de avaliar soluções e definir estratégias que se traduzam em eficiência energética. Essa recolha de informação é feita na próxima secção, designada por revisão bibliográfica.

1.3. Revisão bibliográfica

O método mais arcaico para o estudo do desempenho energético de câmaras de conservação para produtos alimentares consiste na análise dos consumos energéticos dos componentes constituintes do sistema de frio e no levantamento de variáveis relevantes para o estudo, com recurso a instrumentos de medida e procedimentos convencionais. Este método é ligeiramente penoso e acarreta alguns erros relacionados com a incerteza dos valores medidos pelos instrumentos de medição e a incerteza de leitura pelo utilizador (Martins, 2012).

Por outro lado, com a evolução tecnológica verificada nas últimas décadas, tornou-se possível simular de uma forma rápida e precisa o comportamento energético de edifícios residenciais, unidades industriais, entre outros, através da utilização de códigos computacionais

complexos. Estes códigos têm em consideração diversos parâmetros do edifício e permitem dimensionar a potência do sistema de refrigeração, assim como, testar várias soluções que promovam a eficiência energética das câmaras de conservação. Contudo, é essencial a utilização de um método de estudo experimental que valide o estudo numérico (Martins, 2012).

Devido à escassez de artigos científicos publicados relativos ao estudo numérico do desempenho energético de câmaras de conservação de alimentos, fez-se um levantamento de outros estudos numéricos que recorreram ao EnergyPlus para realizarem as suas investigações. Em paralelo, fazer-se uma recolha de informação sobre estudos experimentais que examinam alguns fatores envolventes à câmara e que influenciam as condições no interior e o consumo de energia da mesma. Esse levantamento foi dividido em dois subcapítulos: estudos numéricos e estudos experimentais.

1.3.1. Estudos numéricos

Martins (2012) recorreu EnergyPlus para simular e avaliar o desempenho energético de uma empresa de armazenamento e distribuição de produtos alimentares. Analisou os consumos de energia elétrica da empresa (mensais e anuais), a contribuição do consumo do sistema de refrigeração no consumo total da empresa, identificou as principais fontes térmicas que mais influenciam a carga total de refrigeração do sistema e, por consequente, o consumo. Verificou uma discrepância entre o valor obtido pela simulação e o valor do consumo real, assim como, comprovou que o sistema de refrigeração é o maior consumidor de energia da empresa (na ordem dos 80 %). Apurou que as condições climáticas exteriores influenciam a carga a refrigerar, identificou o teto como o elemento construtivo no qual havia maiores transferências de calor, justificado pela extensa área dos tetos ser adjacente a uma zona de desvão, que apresenta temperaturas bastantes superiores às temperaturas das câmaras. Por fim, fez uma análise de sensibilidade de algumas variáveis, como a temperatura, a carga de infiltração e a carga dos produtos, a carga de infiltração pela remoção de lamelas nas portas, sensibilidade de carga de refrigeração com cobertura em painel sandwich no telhado, a orientação e a localização do edifício.

Utage *et al.* (2013) utilizaram o EnergyPlus para estudar e simular o sistema de refrigeração de um armazém na Índia, de forma a calcular a necessidade de refrigeração e o consumo anual de energia elétrica da instalação em estudo. Com intuito de diminuir o consumo de energia, substituíram o isolamento de 150 mm de poliestireno expandido (EPS) por 100 mm de espuma de poliuretano (PUF). O método foi validado com dados reais obtidos num armazém localizado em Pune, Índia. Segundo a simulação, quando alteraram o isolamento verificou-se uma redução média de 9,78 % da necessidade de refrigeração para um dia de verão e 9,26 % para um dia de inverno. Comprovaram que com esta alteração no isolamento, o investimento fica pago em 6,8 anos.

Bastos (2013) realizou um estudo paramétrico por DFC da influência da capacidade e disposição do armazenamento de carcaças cárneas no desempenho térmico de câmaras de refrigeração, tendo por base a capacidade e disposição das carcaças e as infiltrações de ar exterior (temperatura exterior e abertura das portas nas câmaras), com vista à melhoria do desempenho térmico das câmaras e melhoria da eficiência energética. Em relação à capacidade e disposição das carcaças, concluiu que quanto maior for o espaçamento entre as carcaças, mais eficaz é o processo de refrigeração e que o espaço ocupado pelas carcaças deverá ser o mais abrangente possível a fim de rentabilizar os espaços disponíveis para a circulação de ar. Relativamente ao estudo em função da temperatura exterior na antecâmara verificou-se que não influencia significativamente o desempenho térmico, pelo facto de ter sido considerada convecção natural. Por fim, com o estudo paramétrico em função da abertura da porta concluiu que a infiltração de ar durante este acontecimento prejudica severamente o desempenho térmico da câmara e que conduz ao aumento do nível de humidade relativa do ar, no interior da câmara.

Chan (2011) refere que a utilização de ficheiros climáticos é um dos fatores chave para o sucesso de uma simulação do desempenho energético de um edifício, assim, é essencial que os ficheiros sejam o mais rigoroso possível, para garantir a veracidade dos resultados obtidos. O autor recorreu ao EnergyPlus para simular o consumo de energia dos sistemas AVAC com dados atuais e com dados futuros, e verificou um aumento substancial no consumo de energia, variando entre 2,6 % a 14,3 % para os edifícios de serviços e de 3,7 % a 24 % para os edifícios domésticos.

Bhandari *et al.* (2012) recorreram, também, ao EnergyPlus para compararem a influência de dados climáticos (temperatura de bolbo seco, humidade relativa, radiação solar, velocidade e direção do vento) retirados de três microclimas diferentes têm no desempenho energético de três edifícios distintos. Compararam, ainda, a contribuição e o impacto de cada um dos dados acima referidos tem nas cargas dos edifícios. As simulações demonstraram que a precisão dos dados climáticos utilizados influencia os resultados obtidos, sendo que foram verificadas diferenças de 90 % entre os valores medidos das variáveis, de 40 % nas cargas do edifício e de, sensivelmente, 7 % no consumo anual de energia.

Tzempelikos e Athienitis (2007) analisaram a poupança de energia elétrica, em edifícios de escritórios, através da utilização da radiação solar para iluminação natural face à utilização de iluminação artificial. Porém, referem que é necessário atender à área de superfície envidraçada ideal, i.e., que garanta o máximo aproveitamento da radiação solar, sem que esse aproveitamento se traduza em consumos elevados pelos equipamentos AVAC. Para definir o valor ideal de superfície envidraçada que garanta o compromisso entre os ganhos solares e o consumo dos equipamentos AVAC, definiram a variável “*window-to-wall ratio*” que relaciona a capacidade de iluminação natural em função da área envidraçada pela área

total de superfície. Estudaram, também, o desempenho térmico através controlo da iluminação natural e artificial, para diferentes orientações e condições climatéricas. Concluíram que um edifício de escritórios em Montreal, com a fachada orientada a sul, e com um “*window-to-wall ratio*” igual a 30 % é possível garantir uma iluminância de 500 lux em 76 % do período de trabalho anual. Para o mesmo valor de “*window-to-wall ratio*”, com a utilização de um controlo on/off da iluminação artificial, verificou-se uma redução no consumo de energia elétrica de 77 % por parte da iluminação, e de 16 % relativamente aos equipamentos AVAC.

Tsikaloudaki *et al.* (2012) estudaram o desempenho de diversos tipos de envidraçados, em função da geometria, das propriedades termofísicas e óticas dos mesmos, para diferentes disposições de sombreamento em edifícios de serviços e, analisaram o consumo de energia relativa aos sistemas de refrigeração para cada um dos casos. Concluíram que quanto maior for o coeficiente global de transmissão de calor maior será o consumo da refrigeração e, quantificaram um valor limite ($2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) para essa variável de modo a minimizar o consumo por parte da refrigeração.

Zhou *et al.* (2007) utilizaram o EnergyPlus para modelar, simular e comparar a utilização, num edifício de serviços, de um sistema de ar condicionado de escoamento de ar variável (VRF) com dois sistemas de ar-condicionado convencionais (VAV e FPFA). Durante a modelação do edifício foram considerados os ganhos térmicos associados aos equipamentos de escritório, iluminação e ocupação, de modo a dimensionar o equipamento que menor consumo de energia apresenta-se. Os resultados demonstraram que o sistema VRF consumiu menos 22,2 % de energia elétrica que o sistema convencional VAV e menos 11,7 % que o FPFA.

Li *et al.* (2009) modelaram e testaram um sistema AVAC de escoamento de ar variável (VRF) no EnergyPlus, com o intuito de analisar o consumo de energia por parte da refrigeração, em termos sazonais e mensais, para um edifício típico de Xangai, assim como, a desagregação do consumo por componente do sistema. Entre os resultados obtidos realçaram que o consumo do compressor é menor com o aumento da temperatura de evaporação e, este sistema permite poupanças de energia na ordem dos 20 % face a um sistema convencional FPFA, sendo que, a sua eficiência está relacionada com as trocas de calor e as perdas de distribuição pouco significativas.

Li e Wu (2010) utilizaram, igualmente, o EnergyPlus para modelarem e simularem um módulo de um sistema de ar condicionado de escoamento de ar variável com recuperação de calor (HR-VRF) instalado num edifício comercial típico. Neste estudo analisaram o conforto térmico e a temperatura ambiente no interior do edifício durante o inverno entre um sistema HR-VRF e um sistema de bomba de calor. Os resultados revelam que o sistema HR-VRF consegue poupanças de energia entre 15 e 17 %, comparativamente ao sistema de bomba de calor.

1.3.2. Estudos experimentais

Altwies e Reindl (2001) procederam um estudo em armazéns refrigerados com a finalidade de avaliar a fiabilidade do desacoplamento dos sistemas de refrigeração, em períodos de tarifas em cheio, aproveitando os períodos em vazio para uma pré-refrigeração, tendo em conta a capacidade térmica dos produtos. Os resultados indicam que com esta estratégia de controlo se poupariam 53 % dos custos associados à refrigeração, sem que seja afetada a qualidade dos produtos a refrigerar.

Foster *et al.* (2002) combinaram um estudo experimental com a modelação em DFC para simular o escoamento dinâmico das infiltrações de ar na porta de uma câmara de refrigeração. Concluíram que minimizando as infiltrações de ar, através de cortinas em PVC, antecâmaras ou cortinas de ar, é melhorado o controlo da temperatura no interior da câmara, e, deste modo, reduzir o consumo de energia. A utilização de cortinas em PVC, em bom estado, ou de cortinas de ar permitem reduzir as infiltrações de ar em 92 % e 38 %, respetivamente. Por fim, as antecâmaras revelam-se como uma solução com grande eficiência, contudo, apresentam um elevado investimento económico.

Sá e Alexandre (2007) realizaram um estudo anual a uma instalação frigorífica com intuito de estabelecer uma relação entre o consumo de energia elétrica e a temperatura exterior. Os resultados obtidos indicam que com o aumento da temperatura exterior se verifica um aumento no consumo de energia, justificada pelas baixas temperaturas de operação e pelos ganhos energéticos mais acentuados nos períodos mais quentes. Por fim, salientam a importância de um bom isolamento térmico, pois este reduz as necessidades de refrigeração das câmaras frigoríficas.

1.4. Objetivos e contribuição da dissertação.

O objetivo desta dissertação de mestrado é avaliar o desempenho energético das câmaras de refrigeração, através da modelação, no DesignBuilder, de três casos reais que operam em três áreas distintas do sector agroindustrial e que utilizam câmaras de refrigeração para a conservação de produtos alimentares.

Para a modelação dos três casos foram recolhidos dados que caracterizam as empresas e, posteriormente, simulados os modelos construídos, sendo os resultados obtidos comparados com valores reais, para validação dos modelos.

Por fim, o presente trabalho dispõe de sugestões de melhorias ao nível dos elementos construtivos, conduzindo à otimização quer do edifício quer das câmaras de refrigeração dos mesmos, obtendo-se assim poupanças energéticas.

1.5. Visão geral e organização da dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos que vão ser descritos em seguida.

O presente capítulo aborda a importância da refrigeração na conservação de produtos alimentares, a problemática que a produção e o consumo de energia têm no meio ambiente e na economia do país. Devido necessidade de compreender as condicionantes que mais influenciam o desempenho térmico das câmaras, foi ainda realizada uma recolha de estudos desenvolvidos através do programa computacional aqui utilizado.

O capítulo 2 é referente aos fundamentos teóricos desta dissertação, descreve o tipo de câmaras de refrigeração usualmente utilizadas, evidencia os métodos analíticos utilizados no cálculo da carga de refrigeração necessária para suprimir as cargas térmicas que afetam as câmaras e salienta a importância que a modelação numérica tem atualmente no cálculo de modelos complexos.

O capítulo 3 inicia-se com a apresentação do EnergyPlus, ferramenta computacional que permite, entre outros, calcular o desempenho energético de edifícios, e é exposto detalhadamente o *software* utilizado como interface com o EnergyPlus, o DesignBuilder.

No capítulo 4 são descritos detalhadamente os casos em estudo, i.e., a localização geográfica e a geometria dos mesmos, acompanhados pela descrição dos elementos construtivos e das características de ocupação de cada zona. Neste mesmo capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas simulações, são feitas melhorias nos elementos construtivos do edifício e das câmaras e estudadas as consequências destas modificações no desempenho energético das câmaras.

No capítulo 5 são exibidas as considerações finais e algumas sugestões para estudos posteriores.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Este capítulo pretende abordar os fundamentos teóricos das cargas térmicas que influenciam a temperatura numa câmara de refrigeração, para tal, é feita uma pequena introdução referente às câmaras de refrigeração. Em seguida, são identificadas as cargas térmicas a que uma câmara de refrigeração está sujeita, bem como, os métodos analíticos utilizados para as quantificar. Por último, é abordada a temática da modelação numérica e o modelo matemático no qual o EnergyPlus se baseia.

2.1 Introdução

De um modo global, após a colheita e produção dos produtos agroalimentares, estes apresentam um elevado grau de carga microbiológica, assim, é fundamental diminuir a temperatura do produto para que os microrganismos presentes no mesmo, não apresentem atividade metabólica ou taxa de reprodução, ao longo de toda a cadeia de frio (Martins, 2012). As câmaras de refrigeração, também conhecidas por câmaras frigoríficas, são utilizadas para minimizar esta problemática.

As câmaras de refrigeração são compartimentos fechados, refrigerados, isolados termicamente, e que no seu interior, com o auxílio de sistemas de refrigeração, são mantidas condições termohigrométricas, i.e., valores de temperatura e de humidade adequados para a conservação de produtos alimentares (Ambiente Gelado, 2009).

As câmaras de refrigeração operam para diferentes gamas de temperatura, sendo que, a sua classificação, depende da gama de funcionamento. Segundo (ASHRAE, 2006a) as câmaras de refrigeração para a conservação de produtos alimentares podem ser classificadas em cinco categorias:

- Produtos hortofrutícolas armazenados durante longos períodos de tempo numa atmosfera controlada;
- Produtos refrigerados com temperaturas iguais ou superiores a 0 °C;
- Produtos congelados a altas temperaturas, entre -2 °C a -3 °C;
- Produtos congelados a baixas temperaturas, entre -20 °C a -29 °C;
- Produtos congelados a baixas temperaturas, entre -20 °C a -29 °C, com refrigeração excedente para produtos congelados recebidos a temperaturas superiores a -18 °C.

Por outro lado, as câmaras frigoríficas podem ser também classificadas em função do seu tipo de construção: em alvenaria ou pré-modulares. As câmaras em alvenaria são as mais tradicionais e são, tipicamente, feitas de tijolo e cimento, revestidas por algumas camadas de isolante térmico e por uma barreira de vapor (Ambiente Gelado, 2009). A Figura 2.1 apresenta um exemplo da constituição de uma câmara em alvenaria.

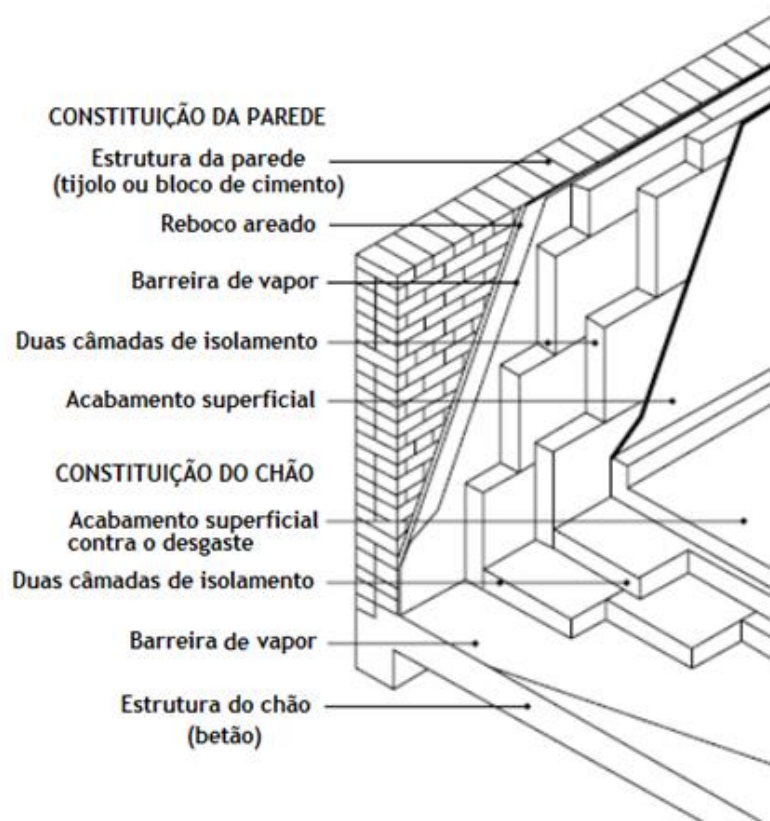


Figura 2.1 - Exemplo da constituição de uma câmara em alvenaria.

Por sua vez, as câmaras pré-modulares podem ser construídas para qualquer dimensão, através de painéis isolantes modulares, unidos entre si por juntas metálicas. Deste modo, é possível para os proprietários das instalações, economizar nas fundações e, erguer, ampliar ou reduzir uma câmara num curto espaço de tempo. Estas duas características das câmaras pré-modulares aliadas à excelente rigidez estrutural conseguida pela fusão do material isolante com as placas metálicas de revestimento conduziram à sua grande difusão, comparativamente às câmaras em alvenaria (Chagas, 2006).

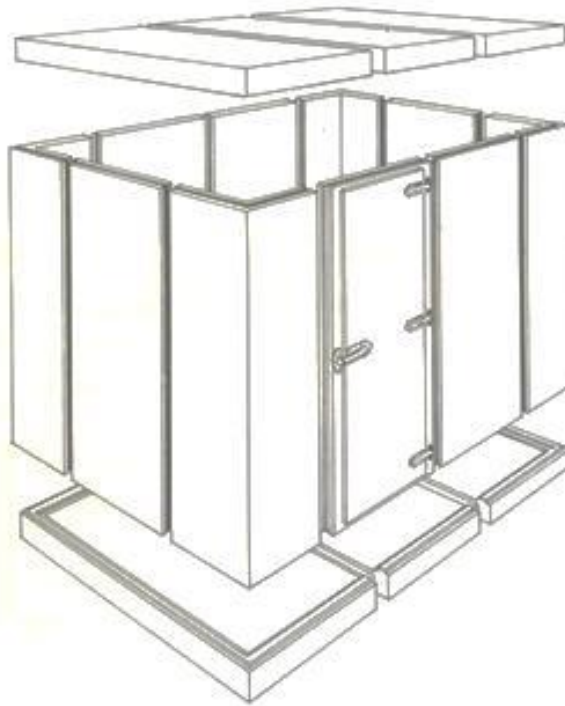


Figura 2.2 - Esquema de um exemplo de uma câmara pré-modular (Ambiente Gelado, 2009).

Independentemente do tipo de construção de uma câmara de refrigeração, esta necessita de um material que a isole termicamente, reduzindo as trocas de calor, sobretudo por condução, da câmara com a sua envolvente. Segundo Santos e Matias (2006), um isolante térmico é um material que apresenta uma condutibilidade térmica inferior a $0,065 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, sendo condutibilidade térmica “a propriedade que caracteriza os materiais termicamente homogêneos pela representação da quantidade de calor que atravessam uma espessura unitária de um material entre duas faces planas e paralelas para uma diferença unitária de temperatura”.

Para além de ter uma condutibilidade térmica baixa, o material utilizado como isolante térmico na construção de uma câmara de refrigeração deve ter em conta alguns fatores, tais como, a resistência a insetos e microrganismos, resistência à propagação de incêndio, retenção de odores, resistência à absorção de água, entre outros. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas propriedades de alguns dos materiais utilizados como isolantes térmicos em câmaras de refrigeração.

Tabela 2.1 - Propriedades de alguns materiais utilizados como isolante térmico (Oliveira, 2007).

	Cortiça	Lã de vidro	Poliestireno extrudido	Poliuretano expandido
Massa específica (kg/m ³)	100-150	20-80	25	30-35
Condutividade térmica (W/m·K)	0,045	0,038	0,035	0,023-0,026
Resistência à passagem de água	Razoável	Nenhuma	Boa	Boa
Segurança ao fogo	Pobre	Boa	Pobre	Pobre
Consumo de energia na produção	Moderado	Elevado	Muito elevado	Elevadíssimo
Custo	Relativamente alto	Baixo	Relativamente alto	Alto

A cortiça e a lã de vidro são cada vez menos utilizadas em refrigeração, uma vez que os polímeros como o poliuretano ou o poliestireno oferecerem excelentes características de isolamento térmico, resistência à passagem de água e segurança ao fogo, porém, é necessário atender que a sua produção necessita grandes consumos de energia. Atualmente, o poliuretano expandido é bastante utilizado em câmaras de refrigeração, sobretudo nas câmaras pré-modulares, uma vez que estas são constituídas por painéis sandwich, sendo estes tipicamente compostos por duas chapas de aço preenchidas entre si por espuma de poliuretano expandido, Figura 2.3.



Figura 2.3 - Exemplo de uma placa de painel sandwich (PERFILNORTE, 2014).

Uma câmara de refrigeração não é um sistema isolado, como tal, está sujeito a diversas cargas térmicas que afetam a sua temperatura interior. As cargas térmicas por transmissão de calor através dos elementos construtivos das câmaras são significativas, podendo representar quase 50 % da potência de refrigeração necessária (ASHRAE, 2006a). Uma das formas de minimizar essas trocas de calor através dos elementos é reduzir a capacidade do elemento transferir calor, para tal, aumenta-se a espessura do isolamento térmico. A Tabela 2.2 apresenta a espessura de poliuretano expandido recomenda para utilizar em câmaras frigoríficas, em função da gama de temperaturas no interior da câmara.

Tabela 2.2 - Espessura de poliuretano expandido recomenda para diferentes gamas de temperaturas no interior da câmara de refrigeração (Ambiente Gelado, 2009).

Temperatura (°C)	Espessura de poliuretano expandido (mm)
8 a 20	60
3 a 8	80
-5 a 3	100 - 120
-5 a -15	150
-20 a -15	180
-30 a -20	200
-40 a -30	240

O projeto de dimensionamento de uma câmara frigorífica deve ter em conta diversos aspetos, tais como, as características construtivas da câmara (isolamento térmico das paredes, do chão e do teto), infiltrações de ar e barreira de vapor. A utilização de uma barreira de vapor permite controlar a entrada de humidade provocada pela diferença de pressão entre o ar interior e o ar exterior. A humidade é prejudicial para as câmaras, uma vez que reduz a eficiência térmica do isolamento, o que conduz ao aumento das perdas de energia da câmara e, por consequente, da carga de refrigeração e do consumo de energia (Bastos, 2013). Assim, de modo a evitar este problema utilizam-se, tipicamente, três tipos de barreira de vapor (Chagas, 2006):

- Camada fina de um fluido ou plástico no isolamento, por exemplo, asfalto, resinas polímeras, entre outros;
- Películas de vedação com filmes de metal;
- Construção pré-fabricada em painel sandwich.

Relativamente à importância das características construtivas das câmaras e das infiltrações de ar, esta vertente vai ser analisada ao nível das cargas térmicas que ocorrem por estes dois aspetos. Quanto ao dimensionamento do equipamento utilizado para refrigerar a câmara, este é função do somatório de todas as cargas térmicas a que o ambiente a refrigerar está exposto, como tal, é relevante analisar e calcular essas cargas.

2.2 Cálculo das cargas térmicas

As cargas térmicas são a causa do aumento de temperatura no interior de um espaço refrigerado e, a necessidade de anular essas cargas, leva à utilização dos sistemas de refrigeração (Martins, 2012).

A primeira lei da termodinâmica exprime o balanço de energia para um sistema isolado segundo a seguinte equação:

$$dE = Q - W \quad (2.1)$$

onde, dE representa a variação da energia, Q representa o calor transferido e W o trabalho realizado. Se considerarmos que numa câmara frigorífica não existe trabalho realizado pelo sistema, a variação de energia na câmara é igual às transferências de calor realizadas na fronteira do sistema, sendo esta transferência provocada pela diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança, i.e.:

$$dE = Q \quad (2.2)$$

ASHRAE (2006b) refere que a carga total de refrigeração tem que suprimir as cargas térmicas: por transmissão de calor, dos produtos, internas (seres humanos, iluminação, motores elétricos), por infiltração e as cargas geradas pelo próprio sistema de refrigeração (ventiladores, compressores, condensadores). Como a carga de refrigeração se trata de uma potência, pode ser expressa como a energia de entrada num espaço refrigerado sobre um período de tempo definido. Por uma questão de facilidade, o intervalo de tempo usualmente definido é de 24 horas (Martins, 2012; ASHRAE, 2006a).

2.2.1 Carga térmica por transmissão de calor

O calor transferido através de uma superfície é definido segundo a direção e sentido do fluxo de calor pela lei de Fourier, para o mecanismo de condução, e pela lei de Newton do arrefecimento, para o mecanismo de convecção (Silva, 2010).

As cargas térmicas por transmissão de calor estão associadas aos ganhos térmicos que ocorrem pelos elementos construtivos de um espaço condicionado (paredes, teto, chão, entre outros), podem ser quantificadas através da equação:

$$\dot{Q}_{trans} = U \times A \times \Delta T \quad (2.3)$$

onde:

- U - coeficiente global de transferência de calor;
- A - área da superfície através da qual se propaga o calor;
- ΔT - diferença entre a temperatura de bolbo seco do ar exterior à câmara e a temperatura do ar no interior da câmara.

O coeficiente global de transferência de calor representa a capacidade de um conjunto de elementos condutivos e convectivos transferirem calor e pode ser calculado através da seguinte expressão matemática:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_i R_i + \frac{1}{h_o}} \quad (2.4)$$

em que, h_i e h_o representam o coeficiente de convecção da superfície interior e exterior, respetivamente e R_i a resistência térmica dos diferentes materiais que constituem as várias camadas de um elemento, e pode ser calculada através da equação:

$$R_i = \frac{x_i}{k_i} \quad (2.5)$$

onde, x_i representa a espessura de cada camada de material e k_i representa a condutibilidade térmica dos diferentes materiais.

Uma vez que a área de superfície exposta e a diferença de temperaturas entre o ar interior e exterior da câmara são variáveis de difícil alteração, a solução para minimizar as cargas térmicas por transferência passa pela utilização de elementos construtivos que tenham um coeficiente global de transferência de calor reduzido, ou seja, que utilizem materiais com baixa condutibilidade térmica.

2.2.2 Carga dos produtos

Os ganhos térmicos dos produtos diferem de produto para produto, dado que, o cálculo desta variável depende do calor específico, da quantidade e da temperatura de entrada do produto. O cálculo da carga térmica dos produtos pode ser traduzido pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{prod} = c \times \dot{m} \times \Delta T \quad (2.6)$$

sendo que, c representa o calor específico do produto, \dot{m} representa a quantidade de produto presente na câmara num período de tempo, por defeito 24 horas, e ΔT representa a diferença entre a temperatura do produto à chegada e a temperatura pretendida no interior da câmara.

2.2.3 Cargas internas

Segundo ASHRAE (2006b) as cargas internas resultam das fontes térmicas que libertam calor para o espaço refrigerado e que contribuem para o aumento da sua temperatura. São exemplos destas cargas internas a carga térmica libertada pelos seres humanos, a carga latente de alguns produtos, a carga térmica do sistema de iluminação e a carga térmica dos motores elétricos.

2.2.3.1 Carga térmica dos seres humanos

Devido ao funcionamento do metabolismo dos ser humanos, a carga térmica se liberta para o meio envolvente está relaciona com diversos parâmetros, tais como, o sexo, o vestuário e a atividade desempenhada. Contudo, ASHRAE (2006b) refere que o calor libertado por um ser humano pode ser estimado através da seguinte equação:

$$\dot{Q}_{ocup} = 272 - 6 \times T \quad (2.7)$$

em que, T representa a temperatura no interior da câmara. Em alternativa à equação anterior, a Tabela 2.3 apresenta uma estimativa do calor libertado por pessoa em função da temperatura no interior da câmara.

Tabela 2.3 - Estimativa do calor libertado por pessoa ASHRAE (2006b).

Temperatura no interior da câmara (°C)	Calor libertado por pessoa (W)
10	210
5	240
0	270
-5	300
-10	330
-15	360
-20	390

No caso de a câmara ser ocupada por mais que uma pessoa faz-se um ajuste conservativo e o valor obtido na equação 2.7 é multiplicado por 1,25 ASHRAE (2006b).

2.2.3.2 Carga latente

Alguns produtos vivos, como as frutas e os vegetais, libertam calor durante a sua respiração e transpiração. A equação 2.6 não contabiliza a componente latente destes produtos, assim, ASHRAE (2006b) afirma que para o cálculo da carga latente se pode substituir, na equação 2.6, o calor específico e a diferença de temperaturas pela entalpia de vaporização (h_l), ou seja:

$$\dot{Q}_L = \dot{m} \times h_l \quad (2.8)$$

2.2.3.3 Carga térmica da iluminação

A carga térmica libertada pela iluminação resulta das perdas por efeito de Joule e da radiação emitida durante o período de funcionamento das lâmpadas. Segundo ASHRAE (2009) os ganhos térmicos relativos à iluminação podem ser calculados segundo a equação:

$$\dot{Q}_{ilum} = P_e \times F_{UL} \times F_{SA} \quad (2.9)$$

em que, P_e representa a potência elétrica da iluminação; F_{UL} representa o fator de utilização da iluminação, relação entre a potência em utilização e a potência instalada; e F_{SA} representa o fator de tolerância especial de iluminação, relação entre o consumo de energia

por parte da iluminação e o consumo de energia à potência nominal das lâmpadas, e depende do tipo de lâmpada utilizada ($F_{SA} = 1$ para lâmpadas incandescentes e $F_{SA} < 1$ para lâmpadas fluorescentes).

2.2.3.4 Carga térmica dos motores elétricos

A carga térmica libertada pelos motores elétricos resulta de perdas por efeito de Joule, que varia em função da potência do motor. Segundo ASHRAE (2009) os ganhos térmicos relativos ao funcionamento de motores elétricos em espaços refrigerados podem ser calculados segundo a equação:

$$\dot{Q}_{motor} = \frac{P_e}{\eta_m} \times F_{UM} \times F_{LM} \quad (2.10)$$

em que, P_e representa a potência elétrica do motor; η_m representa o rendimento; F_{UM} é o factor de utilização, utilizado para aplicações intermitentes, é relação entre o tempo de funcionamento e o período de um dia; e F_{LM} representa o factor de carga do motor, ou seja, é a fração de carga nominal utilizada às condições da carga de refrigeração.

Por outro lado, se o motor elétrico se encontrar no exterior da câmara e o equipamento acionado pelo motor no interior, o calor equivalente por ser quantificado através da equação:

$$\dot{Q}_{motor} = P_e \times F_{UM} \times F_{LM} \quad (2.11)$$

2.2.4 Carga térmica por infiltração

A carga térmica por infiltração deve-se à troca de duas massas de ar entre dois ambientes em desequilíbrio térmico provocada pelas diferenças de pressão entre o interior e o exterior de uma câmara frigorífica, sendo que, na parte inferior da porta a pressão é maior no interior da câmara, e na parte superior verifica-se o contrário, deste modo, surge uma linha de pressão neutra a metade da altura da porta. O ar quente que entra na câmara arrasta humidade do exterior e as baixas temperaturas no interior, vão conduzir à formação de cristais de gelo e à acumulação deste nas paredes, teto e chão da câmara, Figura 2.4, (ASHRAE, 2006b).

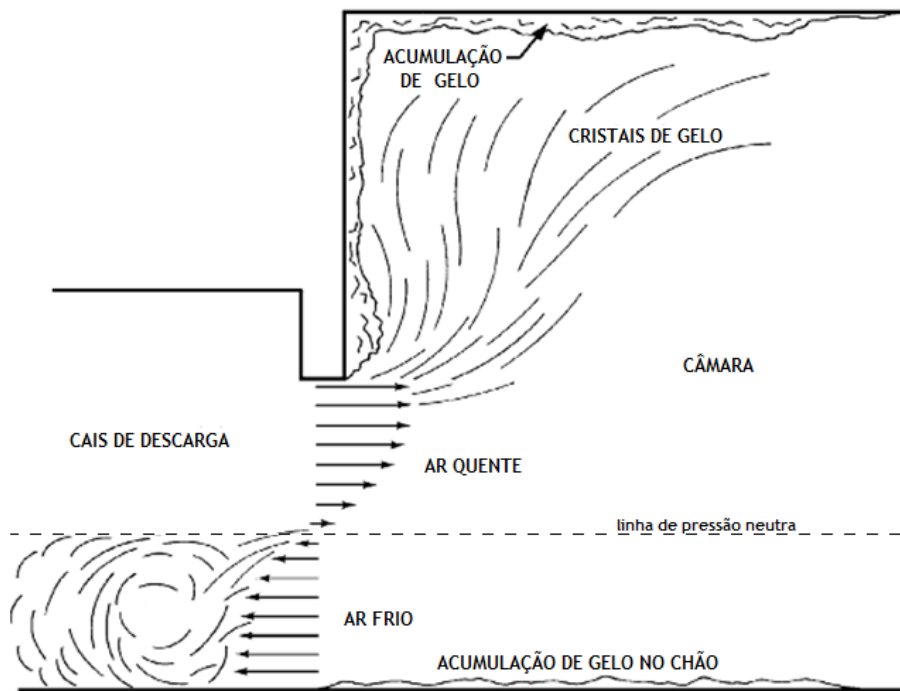


Figura 2.4 - Perfil das infiltrações de ar após abertura da porta.

Segundo ASHRAE (2006b) a equação que permite quantificar a carga térmica por infiltração (\dot{Q}_{inf}) é a seguinte:

$$\dot{Q}_{inf} = \dot{Q} \times D_t \times D_f \times (1 - \varepsilon) \quad (2.12)$$

onde:

- \dot{Q} - carga de refrigeração sensível e latente para um caudal totalmente estabelecido;
- D_t - fator de tempo da porta aberta;
- D_f - fator de caudal de ar na porta;
- ε - eficácia dos dispositivos de proteção.

A carga de refrigeração sensível e latente para um caudal totalmente estabelecido é calculada através da equação:

$$\dot{Q} = 0,577 \times L \times H^{1,5} \times \left(\frac{Q_s}{A}\right) \left(\frac{1}{R_s}\right) \quad (2.13)$$

onde, L representa a largura da porta; H representa a altura da porta; $\frac{Q_s}{A}$ representa a carga de calor sensível da infiltração de ar, por uma unidade de área, da porta aberta e, pode ser obtido através do gráfico da Figura 2.5; e R_s representa a taxa de calor sensível do ganho de calor da infiltração de ar, que varia em função da temperatura e humidade do ar exterior e da temperatura de bolbo seco do ar interior na câmara, podendo o seu valor ser selecionado na Tabela 2.4.

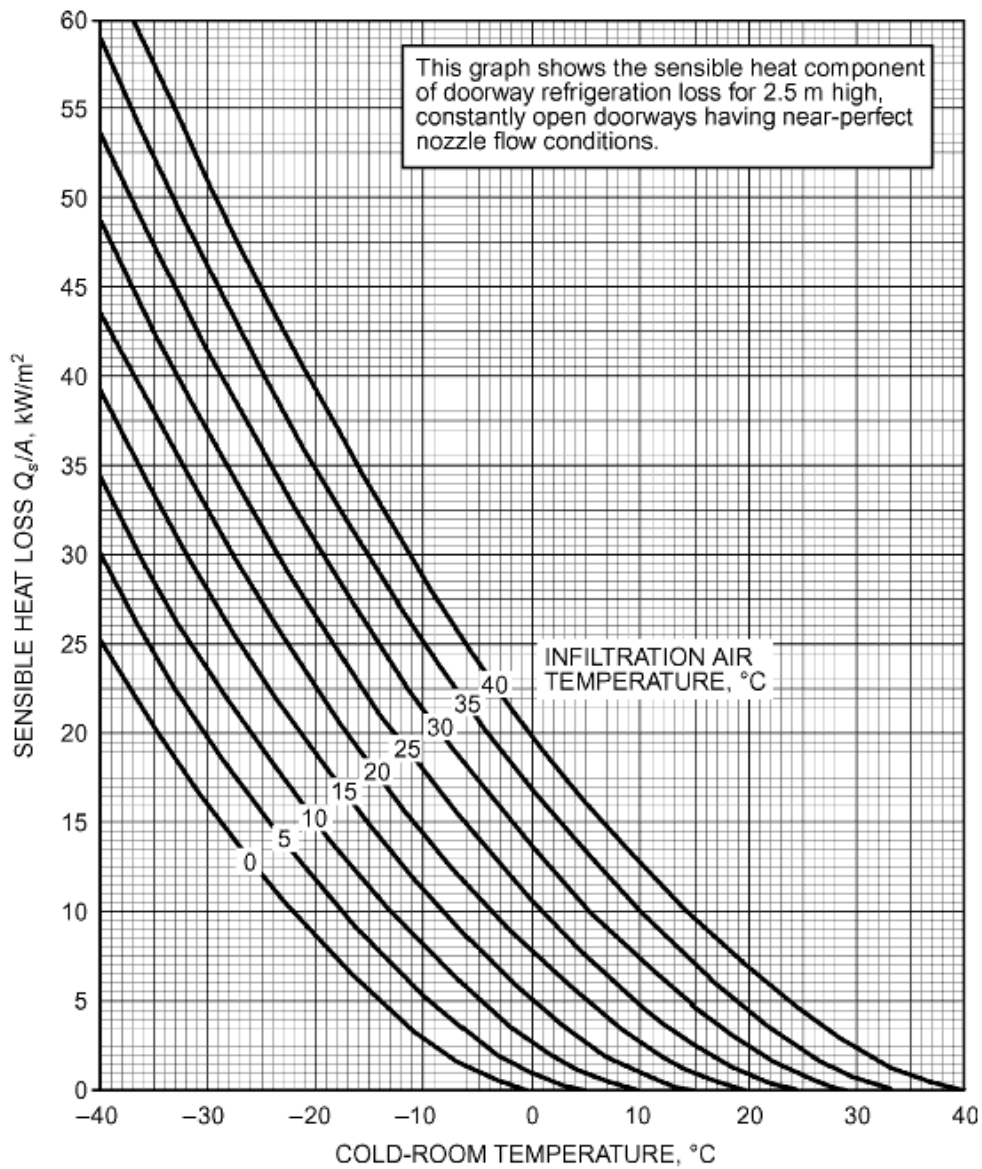


Figura 2.5 - Diagrama utilizado para o cálculo da carga de calor sensível por infiltração de ar.

Tabela 2.4 - Taxa de calor sensível do ganho de calor da infiltração de ar (R_s).

Warm Space		Cold Space at 90% rh								Warm Space		Cold Space at 90% rh									
Temp.	rh.	Dry-Bulb Temperature, °C								Temp.	rh.	Dry-Bulb Temperature, °C									
°C	%	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	°C	%	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
20	100	0.62	0.60	0.57	0.55	0.53	0.50	0.44	0.44	0.41	0	100	0.81	0.79	0.77	0.74	0.71	0.67	0.63	0.56	—
	80	0.67	0.65	0.63	0.61	0.58	0.56	0.53	0.51	0.48		80	0.84	0.83	0.81	0.79	0.76	0.74	0.71	0.71	—
	60	0.73	0.71	0.69	0.68	0.65	0.63	0.61	0.60	0.59		60	0.88	0.86	0.85	0.84	0.82	0.81	0.83	0.98	—
	40	0.80	0.79	0.78	0.76	0.75	0.73	0.73	0.73	0.76		40	0.92	0.91	0.90	0.89	0.89	0.91	0.98	—	—
	20	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.80	0.93	—		20	0.96	0.96	0.96	0.96	0.98	—	—	—	—
15	100	0.67	0.65	0.63	0.60	0.58	0.55	0.51	0.48	0.45	-5	100	0.85	0.83	0.81	0.79	0.75	0.71	0.65	—	—
	80	0.72	0.70	0.68	0.66	0.63	0.61	0.58	0.55	0.53		80	0.88	0.86	0.85	0.83	0.81	0.78	0.78	—	
	60	0.77	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66	0.65	0.66		60	0.91	0.90	0.88	0.87	0.87	0.87	0.98	—	
	40	0.84	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.78	0.78	0.87		40	0.94	0.93	0.93	0.92	0.93	0.98	—	—	
	20	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.91	0.93	—	—		20	0.97	0.97	0.97	0.98	—	—	—	—	
10	100	0.72	0.70	0.68	0.65	0.62	0.59	0.56	0.52	0.48	-10	100	0.88	0.87	0.85	0.82	0.79	0.74	—	—	
	80	0.76	0.75	0.73	0.70	0.68	0.65	0.63	0.60	0.59		80	0.91	0.89	0.88	0.86	0.85	0.84	—	—	
	60	0.81	0.80	0.78	0.76	0.75	0.73	0.71	0.71	0.77		60	0.93	0.92	0.91	0.91	0.91	0.97	—	—	
	40	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.83	0.88	—		40	0.95	0.95	0.95	0.95	0.98	—	—	—	
	20	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.94	0.99	—	—		20	0.98	0.98	0.99	—	—	—	—	—	
5	100	0.77	0.75	0.73	0.70	0.67	0.64	0.60	0.55	0.49	-15	100	0.91	0.90	0.88	0.85	0.81	—	—	—	
	80	0.81	0.79	0.77	0.75	0.72	0.70	0.67	0.65	0.68		80	0.93	0.92	0.91	0.89	0.89	—	—		
	60	0.85	0.83	0.82	0.80	0.79	0.77	0.77	0.79	—		60	0.95	0.94	0.94	0.94	0.98	—	—		
	40	0.89	0.88	0.88	0.87	0.86	0.86	0.89	—	—		40	0.97	0.97	0.97	0.99	—	—	—		
	20	0.95	0.94	0.94	0.94	0.95	0.98	—	—	—		20	0.99	0.99	1.00	—	—	—	—		

Relativamente ao fator de tempo da porta aberta pode ser calculado através da equação:

$$D_t = \frac{(P \times \theta_p + 60 \times \theta_o)}{3600 \times \theta_a} \quad (2.14)$$

onde, P representa o número de passagens, θ_p o tempo de abertura de portas, θ_o o tempo de porta totalmente aberta e θ_a a base temporal do cálculo, tipicamente, 24 horas.

Por sua vez, o fator de caudal de ar na porta é a relação entre a troca de ar real e o caudal de ar totalmente estabelecido. Esta situação só ocorre quando uma porta está aberta ao ar livre e não existe qualquer barreira à passagem de ar, sendo que para estas condições, $D_f = 1$.

Por fim, a variável ε que define a eficácia dos dispositivos de proteção varia entre 0 e 1, sendo que, $\varepsilon \geq 0,95$ quando o dispositivo de proteção é em lamelas e está em boas condições, para cortinas de ar $\varepsilon \cong 0,7$ e, $\varepsilon = 0$ quando não existe qualquer tipo de protecção.

ASHRAE (2006b) apresenta, ainda, outra equação matemática que permite quantificar o a carga térmica por infiltração, causada por uma pressão negativa gerada no interior do edifício:

$$\dot{Q}_{inf} = v \times A \times (h_{inf} - h_{ar}) \times \rho_{ar} \times D_t \quad (2.15)$$

em que:

- v - velocidade média do ar;
- A - área de superfície da porta exposta;
- h_{inf} - entalpia do ar infiltrado;
- h_{ar} - entalpia do ar no interior da câmara;
- ρ_{ar} - massa específica do ar no interior da câmara;
- D_t - fator de tempo da porta aberta.

A velocidade média do ar torna-se, por vezes, difícil de calcular, neste caso, assume-se que para as infiltrações provocadas pela diferença de pressões no interior de edifícios, o seu valor varia entre 0,3 e 1,5 m/s. Quanto à área de superfície da porta exposta, varia em função do estado de conservação desta - em boas condições assumem-se valores entre 0,03 a 0,1 m² ASHRAE (2006b).

2.2.5 Cargas do equipamento de refrigeração

Relativamente aos ganhos térmicos provocados pelo próprio equipamento de refrigeração (\dot{Q}_{er}), ASHRAE (2006b) indica que estes se devem, sobretudo, a cargas resultantes do controlo da humidade do ar e da descongelação da serpentina dos evaporadores. Refere, também, que

para temperaturas de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{Q}_{er} = 0,05 \times \dot{Q}_{total}$ e, para valores de temperatura de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{Q}_{er} = 0,15 \times \dot{Q}_{total}$.

2.2.6 Carga total

O somatório de todas as cargas anteriormente enunciadas representa a carga total que é necessária anular pelo sistema de refrigeração, ou seja:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{prod} + \dot{Q}_{ocup} + \dot{Q}_L + \dot{Q}_{ilum} + \dot{Q}_{motor} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{er} \quad (2.16)$$

Como medida de segurança, é aplicado um coeficiente de segurança de 10 % ao somatório das cargas térmicas a que a câmara está sujeita. A complexidade dos mecanismos de transferência de calor e a diversidade das cargas térmicas em jogo levam à utilização de ferramentas computacionais que resolvam de um modo mais rápido, simples e preciso este tipo de balanço.

2.3 Métodos numéricos

Graças ao desenvolvimento dos computadores e dos próprios métodos numéricos, é possível, atualmente, resolver muitos problemas físico-matemáticos com certo grau de complexidade. O princípio dos métodos numéricos reside na transformação das equações derivadas parciais em equações algébricas, que são resolvidas num número finito de pontos (Oliveira, 2001).

Numa sociedade competitiva como é a sociedade atual, os métodos numéricos oferecem ao utilizador, vantagens bastante interessantes, tais como: rapidez - uma simulação computacional pode ser levada a cabo rapidamente, de tal forma que, é possível estudar as implicações de centenas de variações de um projeto em menos de um dia, e assim, optar pela melhor opção; baixo custo - o investimento num computador e numa ferramenta de modelação é bastante inferior ao custo associado a uma investigação experimental; informação completa - uma solução computacional possui toda a informação, pelo facto de serem conhecidas todas as variáveis, em todos os pontos; capacidade de simular condições reais - não existe necessidade em se utilizarem modelos em escala reduzida; capacidade de simular condições ideais - interessante no estudo da influência de determinados parâmetros, sem envolver complexidades adicionais (Oliveira, 2001).

A validade de um modelo computacional pode ser efetuada de três maneiras diferentes: validação empírica - os resultados obtidos no programa são comparadas com os dados monitorizados num caso real; verificação analítica - os resultados obtidos no programa são comparados com os valores de uma solução analítica conhecida ou, o método numérico é geralmente aceite para um caso de transferência de calor simples, com condições de fronteira muito limitadas; ou através de um teste comparativo - o programa é comparado com outros programas (Judkoff e Neymark, 2006).

Com propósito de instituir um modelo convencional de validação dos modelos numéricos, a ANSI e a ASHRAE conceberam uma norma, ANSI/ASHRAE Standard 140 - *Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*, que apresenta os casos de maior sensibilidade para as cargas térmicas, como as mais significativas na modelação energética de edifício (inércia térmica, radiação solar, sombreamento das janelas, ventilação natural, entre outros). Esta norma apresenta também a metodologia BESTEST que pode ser alargada a vários códigos computacionais, de modo a avaliar a veracidade da simulação do consumo total de energia do edifício e diagnosticar diferentes previsões na simulação (Martins, 2012; Judkoff e Neymark, 2006).

Crawley *et al.* (2008) comparam vinte ferramentas computacionais que calculam e analisam o desempenho energético de edifícios, sendo que, todos eles estão validados pela metodologia BESTEST. Os códigos computacionais em estudo foram: BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, ECOTECT, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IDA ICE, IES <VE>, HAP, HEED, PowerDomus, SUNREL, Tas, TRACE e TRNSYS. A escolha entre cada programa depende do nível de modelação desejado, da natureza dos processos envolvidos, ou da precisão pretendida.

Confrontadas as capacidades de cada um dos programas, verificou-se que o código computacional mais apropriado para a modelação do caso em estudo é o EnergyPlus, devido ao rigor e versatilidade que apresenta na modelação da geometria do edifício, sistemas de AVAC e modelos que facilitam o estudo de otimização energética, comparativamente aos outros (Crawley *et al.*, 2008).

O método de cálculo pelo qual o programa se fundamenta é o CTF (*Conduction Transfer Function*), recomendado pela ASHRAE, e consiste na transformação dos ganhos de calor de todas as fontes em carga térmica. O cálculo toma em consideração um balanço que abrange todas as formas de transmissão de calor, não só superfície a superfície, como também ao ar da zona em questão (Cúmano, 2009).

Para a realização dos cálculos matemáticos a ferramenta computacional utiliza o conceito de “Zona”, definido como um conjunto de espaços que se encontram submetidos ao mesmo controlo térmico (Afonso, 2009).

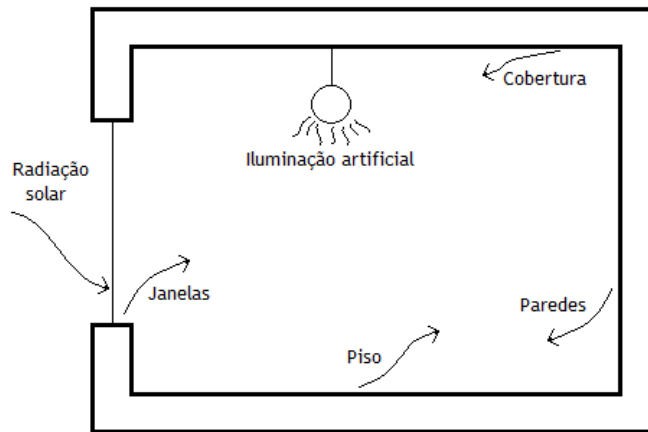


Figura 2.6 - Esquema ilustrativo do balanço energético das cargas térmicas numa zona (Cúmano, 2009).

As diferentes “zonas” de determinado edifício interagem entre si através de fluxos de calor nas superfícies adjacentes. Segundo ENERGYPLUS (2013a), o cálculo do fluxo de calor que atravessa a superfície de um elemento (paredes, tetos, pisos, entre outros) durante a simulação é:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (2.17)$$

em que, os seguintes termos representam:

- q'' - fluxo de calor;
- t - iteração atual;
- X e Y - fatores de resposta térmica que depende das propriedades térmicas dos materiais;
- T - temperatura;
- i - elemento interno da superfície;
- o - elemento externo da superfície.

ENERGYPLUS (2013a) refere, também, que o cálculo do balanço energético de uma determinada zona se baseia na seguinte equação:

$$C_z \cdot \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sist} \quad (2.18)$$

em que:

- $C_z \cdot \frac{dT_z}{dt}$ - energia armazenada no ar da zona z ;
- $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ - somatório do calor proveniente de fontes internas;

- $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ - somatório das trocas de calor, convectivas, das superfícies oriundas do interior da zona;
- $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ - somatório das trocas de calor devido à mistura de ar entre zonas;
- $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ - transferência de calor associada às infiltrações de ar exterior;
- \dot{Q}_{sist} - taxa de troca de calor com o sistema de climatização.

2.4 Nota conclusiva

Depois de se terem explicitado as equações que servem de base ao funcionamento do EnergyPlus, no capítulo seguinte vão-se estudar as capacidades e funcionalidades desta ferramenta computacional, a forma como os dados são introduzidos e obtidos, e a ferramenta utilizada como interface com o código computacional em questão.

Capítulo 3

Ferramenta computacional

Neste capítulo vai ser descrita a ferramenta computacional utilizada para a realização desta dissertação, o EnergyPlus, bem como, a interface deste código computacional com o utilizador. O EnergyPlus apresenta-se como o motor do DesignBuilder e, por outro lado, o DesignBuilder é a ligação do utilizador com o EnergyPlus. A parte inicial deste capítulo descreve o modo de funcionamento do EnergyPlus, sendo que, são também mencionadas algumas das suas características. Em seguida é feita uma explicação detalhada do ambiente de trabalho do DesignBuilder, assim como, é explicada a forma como os dados são introduzidos e obtidos. O subcapítulo referente ao DesignBuilder é baseado no manual de ajuda que se encontra disponível na *web* (DesignBuilder, 2014).

3.1 EnergyPlus

O EnergyPlus é uma ferramenta computacional modular, desenvolvida na década de 70 pelo Departamento da Energia dos Estados Unidos da América com base nas características mais peculiares do BLAST e do DOE-2.1e. O seu desenvolvimento foi estimulado pela grande crise petrolífera e diferenciou-se dos seus antecedentes por ser desenvolvido em código aberto, FORTRAN90, característica que permite a modularização de sub-rotinas, facilita a introdução de novos parâmetros e possibilita a ligação a outros programas (ENERGYPLUS, 2013b).

O EnergyPlus tem a capacidade de simular, numa base temporal variável, o comportamento térmico de um edifício, assim como, calcular os consumos de energia, de modo a testar soluções e estratégias que melhorem a eficiência energética. Para tal, é necessário introduzir no programa uma diversidade de parâmetros, tais como, a localização, a geometria, parâmetros relativos à atividade, iluminação, elementos construtivos, superfícies envidraçadas, sistemas de climatização, entres outros, Figura 3.1 (Crawley *et al.*, 2008; ENERGYPLUS, 2013b).

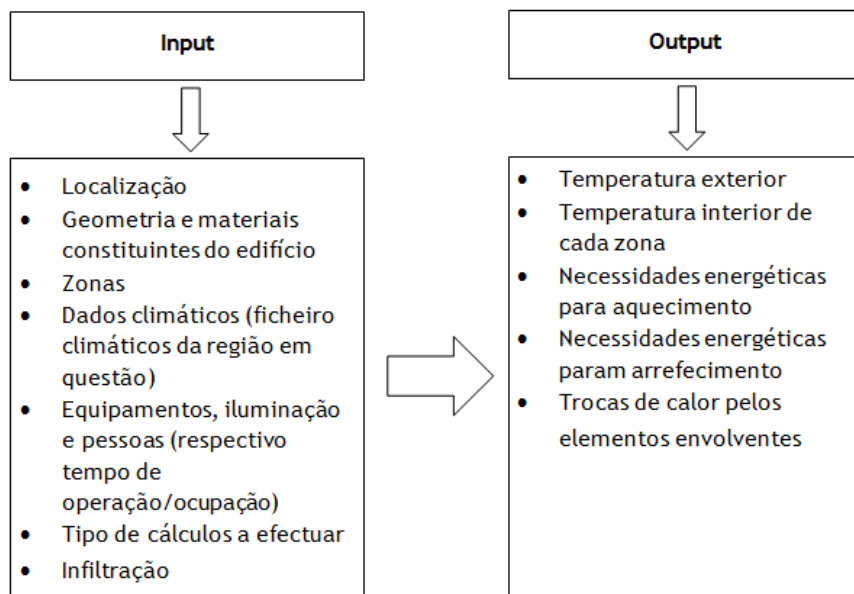


Figura 3.1 - Dados de entrada e de saída no EnergyPlus.

A estrutura do programa é composta por três componentes fundamentais: o controlador de simulação (*Simulation Manager*) - coordena as ações entre os módulos de simulação, o módulo de simulação do balanço de calor e massa (*Heat and Mass Balance Simulation*) e o módulo de simulação dos sistemas da edificação (*Building System Simulation*) (Afonso, 2009; ENERGYPLUS, 2013b). Esta estrutura garante uma maior precisão na previsão da temperatura, conforto dos ocupantes, avaliação do controlo de sistemas reais, em comparação com outros códigos computacionais de simulação, visto que os resultados obtidos são considerados em outros módulos, sendo realizadas correções e recalculados os resultados (Martins, 2012).

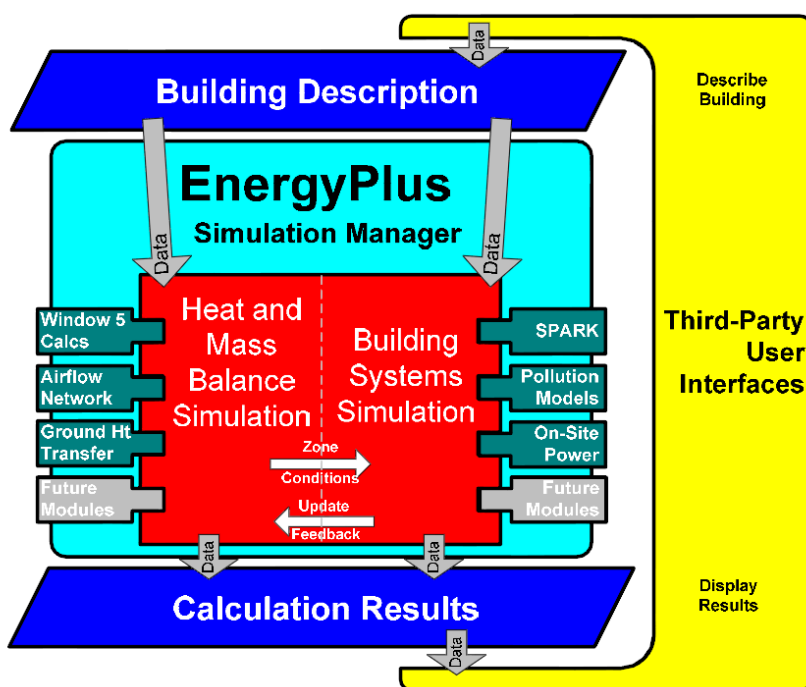


Figura 3.2 - Diagrama da estrutura de funcionamento do EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2013b).

Apesar das vantagens anteriormente referidas, o EnergyPlus tem a desvantagem de os dados de entrada necessários para correr uma simulação, assim como os ficheiros climáticos e os dados de saída obtidos na simulação, estão no formato de ficheiro de texto ASCII, o que se revela uma dificuldade para o utilizador devido à inexistência de uma interface gráfica com o utilizador (GUI) que permita a visualização dos dados e resultados (ENERGYPLUS, 2013b). Deste modo, o DesignBuilder apresenta-se como uma interface gráfica que permite construir e parametrizar detalhadamente o modelo, além de também possibilitar a visualização dos resultados.

3.2 DesignBuilder

O DesignBuilder surgiu em 2005 como a primeira, e atualmente a mais completa, interface gráfica do utilizador com o EnergyPlus. Esta interface permite modelar em três dimensões um edifício, sem quaisquer limitações relativamente a geometrias complexas. Desta forma, é possível “construir” um edifício de um modo extremamente realista, através da definição da espessura real das paredes, portas e janelas, bem como, o material que as constitui. O DesignBuilder considera também a influência das sombras provocadas por edifícios circundantes, arvoredos, ou dispositivos de sombreamento. Por fim, é de salientar que esta ferramenta computacional fornece relatórios certificados e regulamentos do desempenho energético de edifícios no Reino Unido, França, Irlanda e Portugal (Cúmano, 2009).

O programa dispõe de uma base de dados bastante completa nos diversos campos que a constituem, graças às bibliotecas pré-definidas que permitem escolher facilmente uma base de dados climáticos, através da seleção de uma região, os materiais que constituem os elementos construtivos, as atividades desempenhadas nas diversas divisões, assim como, os sistemas AVAC em utilização. Outra característica deste código computacional é a possibilidade de criar *templates* para os dados de entrada no programa, permitindo que sejam utilizados noutras situações que apresentem parâmetros semelhantes (Cúmano, 2009).

O ambiente de trabalho do DesignBuilder está estruturado da seguinte forma:

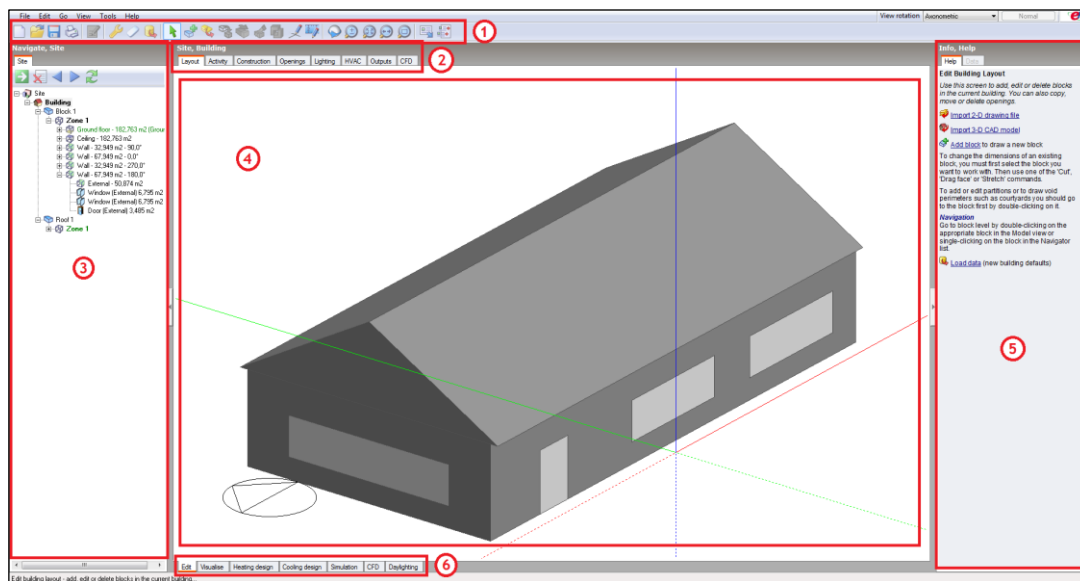


Figura 3.3 - Ambiente de trabalho do DesignBuilder.

- 1- Barra de ferramentas;
- 2- Aba de dados de modelação (inputs);
- 3- Painel de navegação;
- 4- Ecrã de edição;
- 5- Painel de informação;
- 6- Abas de cálculos (outputs).

3.2.1 Barra de ferramentas

A barra de ferramentas do DesignBuilder assemelha-se às barras de ferramentas que a grande maioria dos *softwares* utilizados no dia-a-dia, isto é, a partir desta barra é possível criar, abrir, guardar ou imprimir documentos, definir os critérios de funcionamento do programa, construir/editar o modelo pretendido, variar a visualização do mesmo, entre outros.

3.2.2 Aba de dados de modelação

A aba de dados de modelação é composta por vários menus que permitem a introdução dos dados que caracterizam o edifício, tais como: *Activity*, *Construction*, *Openings*, *Lighting*, *HAVC*, *Outputs* e *CFD*. Uma característica desta aba é que no início dos diferentes menus é a possibilidade de escolher ou criar um novo *template* predefinido com dados convencionais ou mais frequentemente utilizados para os diferentes tipos de atividade, elementos construtivos, iluminação, entre outros.

3.2.2.1 *Activity*

O menu “*Activity*” engloba uma diversidade de parâmetros de caracterização de uma zona ou bloco do edifício em estudo, tais como, parâmetros de conforto ambiental, ganhos térmicos

provenientes dos ocupantes, equipamentos e processos realizados na zona. Na parte superior deste menu, podemos classificar a zona em estudo através dos seguintes tipos:

- *Standard* - define a zona em estudo como ocupada e climatizada, i.e., considera que os menus “*Activity*”, “*Lighting*” e “*HVAC*” estão ativados (definido por defeito).
- *Semi-exterior unconditioned* - define a zona como desocupada, sem climatização e iluminação, i.e., considera que os menus “*Activity*”, “*Lighting*” e “*HVAC*” estão desativados (utilizado para sótãos, parques de estacionamento, entre outros).
- *Cavity* - define a zona do mesmo modo que o tipo “*Semi-exterior unconditioned*”, mas é específico para a simulação de paredes com dupla fachada ou parede de Trombe. Este algoritmo calcula corretamente os coeficientes de convecção para espaços verticais estreitos e fechados com base na norma ISO 15099.
- *Plenum* - utilizado em zonas sem ocupação, climatização e ventilação mecânica.
- *Semiheated* - define a zona como ocupada, mas sem climatização e ventilação mecânica.

Para facilitar a simulação de edifícios de grandes dimensões, com diversos andares de características semelhantes (hotéis, edifícios de escritórios), o DesignBuilder apresenta um fator de entrada chamado “*zone multiplier*” especificando que certas zonas são repetidas e, deste modo, só necessitam de ser simuladas uma vez. Se considerarmos um edifício com diversas zonas idênticas, necessitamos apenas de definir o rés-do-chão que está adjacente ao solo, o último andar que está numa condição de adjacência ao telhado e os “andares modelo” que se encontram entre o rés-do-chão e o último andar.

Outra forma de simplificar o modelo em estudo é a exclusão dos cálculos térmicos e/ou dos cálculos de iluminação natural nas zonas que se pretende simular, porém, as zonas são consideradas como zonas não úteis, e por consequente, as superfícies que as separam das zonas úteis são tratadas como superfícies adiabáticas. Esta simplificação permitir a redução do tempo de simulação, o trabalho de caracterização de uma zona pelo utilizador e quaisquer erros associados aos dados introduzidos para zonas irrelevantes à simulação, contudo, qualquer efeito que ocorra numa zona não útil, não será refletido no cálculo das zonas úteis, como tal, é importante ponderar se uma zona não útil possa alterar significativamente os resultados da simulação.

Outro parâmetro a analisar neste menu é a densidade ocupacional (pessoa/m²) e o respetivo horário de ocupação. A densidade ocupacional é o quociente do número de pessoas numa divisão pela área dessa mesma divisão. Relativamente ao horário de ocupação, este pode ser definido de duas formas: pelo modo *Timing* ou pelo modo *Schedules*. O modo *Timing* possui

uma *slider bar* delimitada pelas 24 horas de um dia, que permite definir um período de ocupação contínuo, assim como, os dias numa semana que obedecem a esse horário, Figura 3.4.

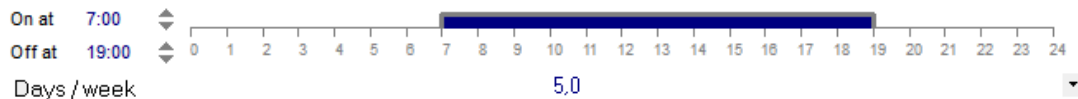


Figura 3.4 - *Slider bar* de caracterização do horário de ocupação no modo *Timing*.

Por sua vez, o modo *Schedules* é mais específico, contudo mais moroso, sendo este composto por um horário anual que permite definir um período de ocupação diferente para cada dia da semana e diferentes meses do ano, Figura 3.5.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Feb	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Mar	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Apr	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
May	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Jun	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Jul	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Aug	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Sep	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Oct	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Nov	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Dec	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off

Figura 3.5 - Calendário de caracterização do horário de ocupação no modo *Schedules*.

A vantagem do modo *Schedules*, comparativamente ao *Timing*, é a definição de um período de ocupação diária descontínuo, i.e., possibilita definir períodos de almoço, assim como, admitir, em pontos percentuais, a taxa de ocupação para o horário definido. Isto é feito com recurso a um histograma, que pode ser definido em quatro tipos de intervalo por hora (1, 2, 4 ou 6). A Figura 3.6 refere o caso de uma divisão que se encontra ocupada das 8 às 18 horas, com um período de desocupação das 12 às 14 horas, e com uma taxa de ocupação de 50 %, ou seja, para a densidade ocupacional definida, só 50 % das pessoas é que estão presentes na divisão.

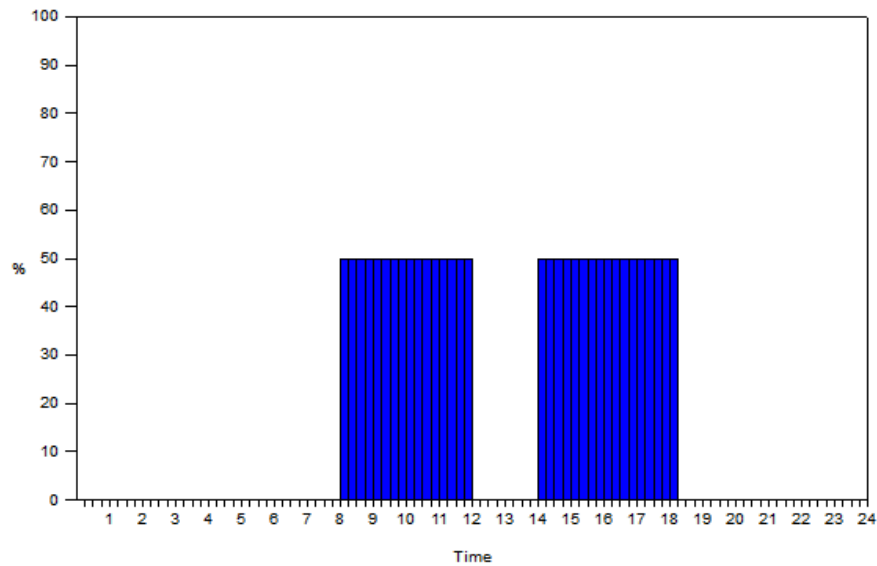


Figura 3.6 - Histograma do período de ocupação diária, em intervalos de 15 minutos.

Pelo facto de um ocupante libertar calor para a divisão em que se encontra, é necessário atender aos critérios que influenciam essa libertação de calor, i.e., a atividade que desempenha, o sexo do ocupante e o vestuário que possui, deste modo, o programa permite definir esses parâmetros e calcula o ganho térmico resultante. Para o caso da atividade metabólica, o *software* fornece alguns exemplos dos valores que as diferentes atividades metabólicas libertam, Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Exemplo de algumas atividades metabólicas que o *software* apresenta.

	Taxa de metabolismo (W/pessoa)
Trabalho de escritório (ligeiro)	120
Trabalho manual (ligeiro)	180
Trabalho em máquinas (ligeiro)	216
Trabalho em máquinas (processos industriais)	440

Neste menu são também definidos os parâmetros de conforto ambiental (térmico e visual), tais como: *setpoints* das temperaturas de climatização (aquecimento e arrefecimento), *setpoints* de controlo de humidade, *setpoint* da ventilação natural, *setpoints* de renovação de ar e iluminação.

Os *setpoints* das temperaturas de climatização definem as temperaturas ideais de conforto na zona (em graus Celsius). Por outro lado, o programa permite predefinir os “*set backs*” das temperaturas de climatização, ou seja, os valores de temperatura mínimos e máximos

permitidos, respetivamente, para os períodos de desocupação do edifício. Os *setpoints* de controlo da humidade controlam a necessidade de humidificar ou desumidificar a zona em questão (em pontos percentuais). O *setpoint* da ventilação natural define a temperatura mínima de utilização da ventilação natural, ou seja, quando a temperatura for inferior ao valor definido, a ventilação natural é desativada. Por outro lado, o *setpoint* das renovações de ar define o valor mínimo de caudal de ar renovado admitido expresso em litros por segundo por pessoa ou em litros por segundo por unidade de área. Por fim, definição de um valor da intensidade de iluminação necessária na zona em estudo permite criar uma estratégia de controlo para a iluminação (definida no menu “*Lighting*”), i.e., utilizar a iluminação natural disponível e, com recurso a iluminação artificial, garantir a intensidade luminosa necessária.

Este menu engloba, ainda, os ganhos térmicos que estão associados aos equipamentos que opera na zona em questão. O cálculo destes ganhos pode ser feito de três formas: o modo “*early*”, predefinido por defeito, no qual os ganhos dos equipamentos são discriminados em diferentes categorias (computadores, equipamentos de escritório, processos térmicos, entre outros); o modo “*lumped*” que aglomera os ganhos gerados pelos equipamentos e pelos ocupantes num único valor; e o modo “*detailed*” que descreve detalhadamente os ganhos dos equipamentos cada equipamento, para cada zona.

Por fim, de referir que o consumo de água quente sanitária é também definido neste menu, sendo este expresso em litros por unidade de área, num dia.

3.2.2.2 Construction

A partir do menu “*construction*” podemos definir um *template* dos elementos construtivos de um edifício (paredes, telhados, chão, entre outros) e a taxa de infiltrações, originadas por fissuras ou buracos nos elementos construtivos.

O método atualmente utilizado para representar os diferentes elementos construtivos é o método de construção combinada. A Figura 3.7 apresenta a convenção considerada pelo DesignBuilder para os diferentes elementos construtivos, verificando-se que as superfícies entre zonas ocupadas e desocupadas são tratadas como semi-expostas e os restantes elementos são diferenciados em paredes exteriores, paredes interiores, tetos, telhados e chãos.

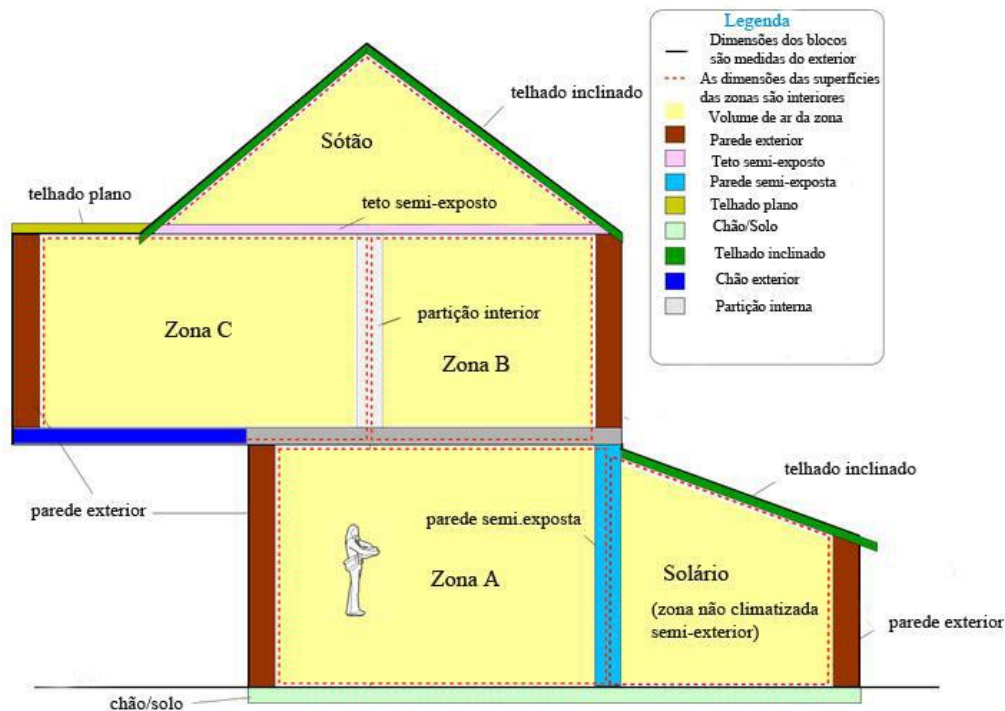


Figura 3.7 - Convenção utilizada pelo DB para definir os diferentes elementos construtivos (Martins, 2012).

Graças à vasta biblioteca que o DesignBuilder possui, é possível configurar os elementos construtivos de um edifício de um modo global, ou em específico de um bloco ou zona, de forma rápida e fácil. Para além dos dados que podem ser carregados da biblioteca, é possível criar novos elementos, definidos pelas espessuras das diferentes camadas de materiais. No caso de o utilizador desconhecer os materiais que constituem um elemento construtivo, é possível que o utilizador introduza o valor do coeficiente global de transmissão do elemento construtivo e o EnergyPlus define os materiais e as espessuras que garantam esse valor do coeficiente global de transmissão.

Relativamente à taxa de infiltrações existem duas formas de as definir, dependendo do modelo de ventilação natural seleccionado: método *Scheduled* e o método *Calculated*. Ambos os métodos assumem que a taxa de infiltrações é constante durante todo o processo de simulação e pode ser expressa em quatro tipos de unidades distintas:

- ac/h - renovações de ar por hora (*air changes/hour*), i.e., quantidade do volume da zona que é renovado numa hora (unidade definida por defeito);
- $m^3/h \cdot m^2$ a 50 Pa - unidade de volume por hora por unidade de área da superfície exposta, quando a diferença de pressão entre o interior e exterior é de 50 Pa (unidade frequentemente utilizada no Reino Unido);

- $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ a 4 Pa - unidade de volume por hora por unidade de área da superfície exposta, quando a diferença de pressão entre o interior e exterior é de 4 Pa (unidade frequentemente utilizada na França e na Bélgica);
- ac/h a 50 Pa - renovações de ar por hora (*air changes/hour*), i.e., quantidade do volume da zona que é renovado numa hora quando a diferença de pressão entre o interior e exterior é de 50 Pa (unidade frequentemente utilizada na Europa).

O método *Schedules* permite apenas definir a taxa de infiltrações e o período em que ocorrem essas infiltrações. Por sua vez, o método *Calculated* avalia qualitativamente as fendas apresentadas no edifício de duas formas: uma *slider bar* que caracteriza o tamanho das mesmas em cinco classes (*very poor, poor, medium, good e excellent*) ou um *template* das fissuras que discrimina por paredes, portas e janelas, telhados, contudo, para a simulação de grandes edifícios, este método revela-se pesado porque tem em consideração a flutuabilidade da velocidade do vento e da pressão estática nas fachadas expostas.

3.2.2.3 Openings

O menu “*Openings*” é utilizado para descrever qualquer abertura que exista na estrutura do edifício, estando estas caracterizadas em quatro tipos: janelas, buracos, portas e grelhas.

No caso particular das janelas ou superfícies envidraçadas é imperativo descrever detalhadamente o tipo de vidro, caixilharia ou dispositivos de sombreamento que controlam a entrada de radiação, uma vez que os ganhos térmicos no edifício resultantes da radiação solar ou infiltrações de ar estão diretamente relacionados com os elementos constituintes de uma janela. O programa apresenta vários *templates* com os tipos de vidro utilizados nos dias correntes, desde vidro simples a vidro quádruplo, para diversas espessuras e com diferentes gases de isolamento térmico. Permite também definir as dimensões da janela em percentagem da área de superfície envidraçada de uma parede, ou através da definição das dimensões da mesma, assim como, a profundidade que está inserida na parede.

O sombreamento das janelas exteriores e claraboias através de dispositivos de sombreamento pode ser feito de dois modos: persianas - opção “*window shading*” que define o tipo de persiana utilizada, a sua posição (se está colocada no interior ou exterior da janela, ou entre dois vidros da mesma janela) e as estratégias de controlo - e/ou através de venezianas, toldos, lamelas de sombreamento, entre outros - opção “*local shading*”.

Por outro lado, a abertura de janelas para aproveitamento da ventilação natural só se verifica quando no menu “*Activity*” o valor de temperatura predefinido para a ventilação natural for inferior à temperatura interior e a temperatura no exterior for inferior ao valor da temperatura no interior.

Por fim, a modelação de portas e grelhas pode ser feito neste menu, basta o utilizador seleccionar a superfície que pretende que tenha portas ou respiradores e o programa cria estes elementos com as dimensões indicadas, contudo, sem se encontrarem na sua posição correta. Para uma modelação mais precisa, é possível desenhar portas, janelas, buracos, grelhas e sub-superfícies no menu “*Edit*” através de ferramentas apropriadas.

3.2.2.4 Lighting

No menu “*Lighting*” é feita a caracterização do edifício ao nível da iluminação, ou seja, a densidade de potência instalada, o período que se encontra em funcionamento, o tipo de luminária, o controlo de iluminação, entre outros.

Relativamente à densidade de potência instalada, pode ser apresentada de duas formas distintas: em função da iluminância necessária ($W/m^2 - 100 \text{ lux}$) - valor definido no menu “*Activity*” na parte do conforto ambiental - ou desprezando a iluminância e atendendo apenas à potência instalada por unidade de área (W/m^2). Por outro lado, o tempo de funcionamento da iluminação obedece aos modos já anteriormente referidos, modo *Timing* ou modo *Schedules*.

O DesignBuilder dispõe de cinco tipos de luminárias que apresentam valores predefinidos da decomposição da luz em fração radiante, visível e convectiva, o que facilita ao utilizador determinar a potência calorífica emitida pela luminária para a zona em estudo. Os tipos de luminárias que o *software* dispõe são apresentados na Figura 3.8, bem como, os valores de decomposição da luz, por tipo de luminária, na Tabela 3.2.

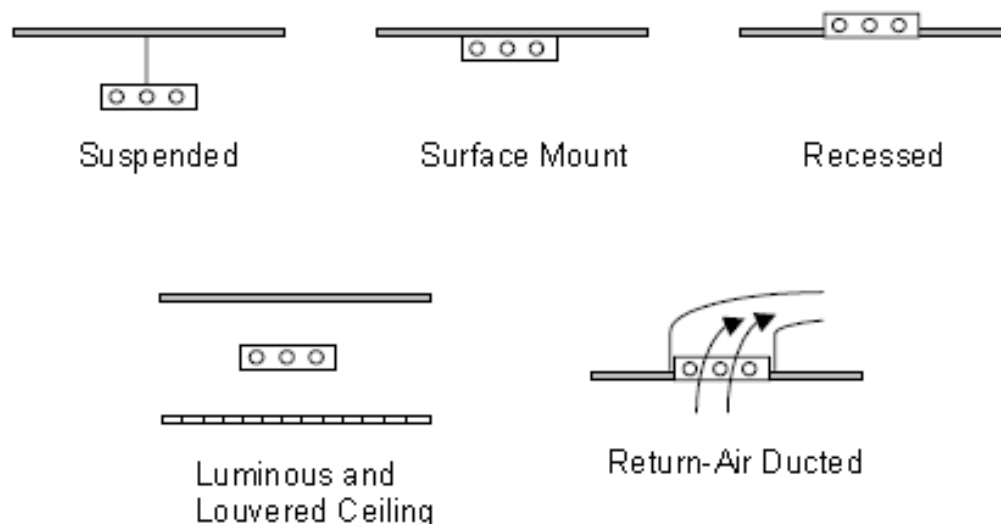


Figura 3.8 Esquema dos tipos de luminárias disponíveis no DesignBuilder (DesignBuilder, 2014).

Tabela 3.2 - Decomposição da luz em diferentes frações, por tipo de luminária.

	Suspended	Surface Mount	Recessed	Luminous and Louvered Ceiling	Return-Air Ducted
Fração radiante	0,42	0,72	0,37	0,37	0,18
Fração visível	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Fração convectiva	0,40	0,10	0,45	0,45	0,10
Fração de retorno de ar	-	-	-	-	0,54

Por sua vez, a função de controlo da iluminação tem em consideração o *setpoint* definido no menu “*Activity*” da iluminância necessária para a zona em estudo, e regula a potência de iluminação artificial, em função da luz natural, através de um sensor de intensidade luminosa definido para a zona. As estratégias de controlo utilizadas pelo programa para assegurar a iluminância necessária são as seguintes: controlo linear, controlo linear/off e controlo por degraus.

O controlo do tipo linear reduz de uma forma linear e contínua a potência elétrica de iluminação artificial em utilização, consoante o aumento da iluminação natural. Para um valor mínimo de potência elétrica de iluminação artificial, definido pelo utilizador, a potência elétrica de iluminação artificial é mantida para um valor constante, Figura 3.9.

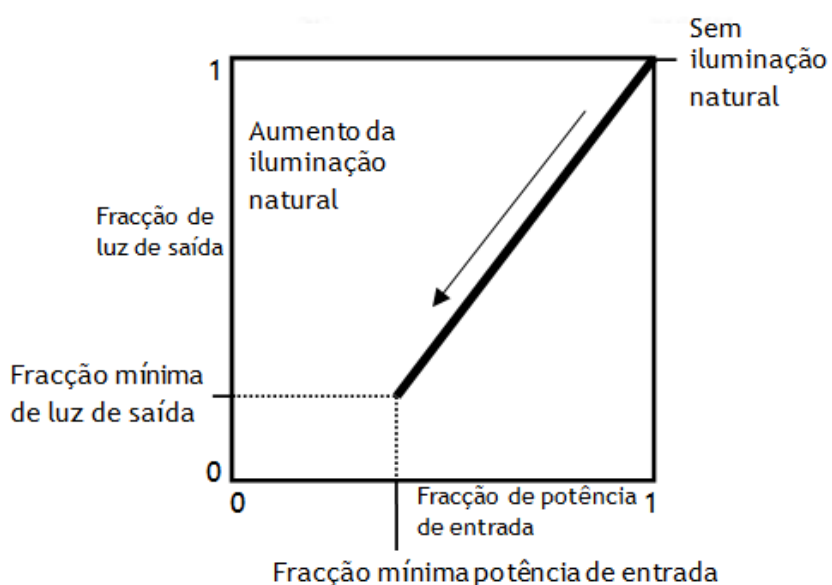


Figura 3.9 - Exemplificação do funcionamento do controlo do tipo linear.

O controlo do tipo linear/off obedece ao procedimento acima descrito, mas diferencia-se pelo facto da potência elétrica de iluminação artificial ser desligada quando esta atinge o valor mínimo predefinido.

Por fim, o controlo por degraus permite ligar/desligar a iluminação artificial, em função da luz natural disponível. Neste tipo de controlo, o operador define o número de degraus com que é feito o controlo, permitindo deste modo, um controlo mais ou menos suave da diminuição/aumento da iluminação artificial em uso, Figura 3.10.

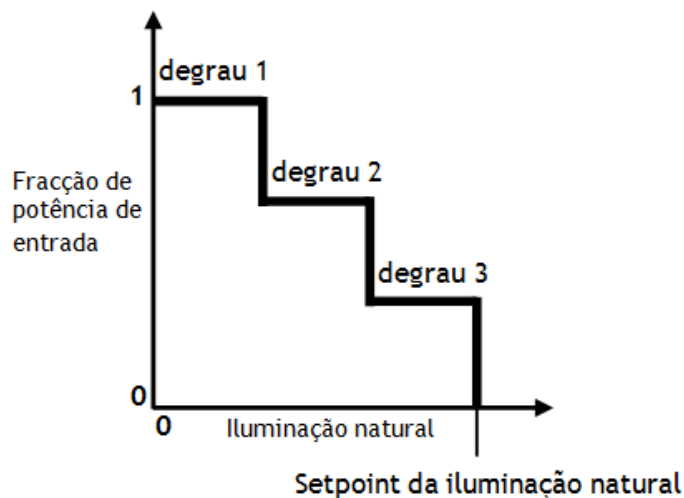


Figura 3.10 - Exemplificação do funcionamento do controlo por degraus.

3.2.2.5 HVAC

O menu “HVAC” caracteriza os equipamentos que climatizam o edifício de um modo global, ou em zonas específicas. Este menu contempla os dados relativos à ventilação natural e mecânica, os dados que caracterizam os sistemas de aquecimento e arrefecimento, o controlo da humidade e a produção de águas quentes sanitárias, com base dos *setpoints* predefinidos no menu “Activity”. O menu “HVAC” tem a característica de poder ser utilizado em três modelos distintos: *Simple*, *Compact* ou *Detailed*.

Modelo Simple

O modelo *Simple* calcula as cargas e os consumos dos sistemas de climatização, com recurso a algoritmos de cálculo básicos que incluem a potência e o COP dos equipamentos. Este modelo inclui quatro métodos de operação: “adequate”, “manual”, “autosize” e “autosize when not set”.

O método “adequate” considera que o equipamento selecionado tem capacidade ilimitada, i.e., é obrigado a satisfazer os requisitos de temperatura impostos no menu “Activity” e as temperaturas limite de ar fornecido impostas no menu “HVAC”. No caso do método

“manual”, o utilizador é responsável pela introdução dos dados referentes à capacidade dos equipamentos de aquecimento e arrefecimento, ou seja, o *software* não dimensiona automaticamente estes dados. No método “*autosize*” o DesignBuilder dimensiona automaticamente os equipamentos de aquecimento e arrefecimento antes de cada simulação, sendo que, neste caso estes dados não são mostrados. Já o método “*autosize when not set*” apenas dimensiona os equipamentos de aquecimento e arrefecimento se estes ainda não foram dimensionados ou introduzidos manualmente.

O consumo apresentado por um equipamento pode ser fragmentado no consumo do equipamento e no consumo de energia em elementos auxiliares (bombas, ventiladores, entre outros), através das seguintes opções: “*NCM*” - admite um valor fixo por unidade de área, segundo os dados NCM do Reino Unido; e “*Separate fans and pumps*” - admite um valor de potência dos ventiladores e bombas, por unidade de área e a operar segundo o *Schedule* de funcionamento.

Modelo Compact

Por outro lado, o modelo *Compact* apresenta-se um método de cálculo mais rigoroso e completo, em que as necessidades de aquecimento e arrefecimento são determinadas nos menus de cálculo do EnergyPlus.

À semelhança do modelo *Simple*, o modelo *Compact* dispõe dos mesmos quatro métodos de operação: “*adequate*”, “*manual*”, “*autosize*” e “*autosize when not set*”. Contudo, o método “*adequate*” assume as mesmas características que o método “*autosize*” no método *Simple*.

Neste modelo, o método “*manual*” exige que sejam cumpridos uma série de procedimentos, i.e., 1º seleccionar o método “*autosize*”; 2º calcular “*heating design*” e “*cooling design*”; 3º simular; 4º seleccionar o método “*manual*”; 5º analisar as cargas de aquecimento e arrefecimento dimensionadas para cada zona; 6º copiar o caudal máximo fornecido pelo ficheiro .csv da pasta EnergyPlus antes da simulação. Como é constatado, este método não é tão intuitivo como os métodos anteriores, e é necessário que exista concordância entre as cargas de arrefecimento definidas e o caudal máximo de ar fornecido, caso contrário, os resultados do EnergyPlus apresentam erros que impossibilitam o armazenamento das cargas de arrefecimento necessárias para esse caudal de ar específico. Nos restantes métodos de operação o procedimento é similar ao funcionamento no modelo *Simple*.

Modelo Detailed

No modelo *Detailed* diferencia-se dos anteriores modelos pelo facto de os sistemas de climatização serem definidos graficamente pelo utilizador, sendo que o utilizador pode descrever as características específicas dos componentes constituintes do sistema

(ventiladores, bombas, caldeias, entre outros) e conectá-los entre si através de uma linha que representa as tubagens.

Este modelo incorpora dois métodos de funcionamento: “*simple HVAC data*” e “*detailed HVAC data*”. O método “*simple HVAC data*” utiliza os *setpoints* de temperatura e humidade e o caudal de água quente definidos no menu “*Activity*”, o que se revela uma vantagem, uma vez que existe menos trabalho associado à definição dos *setpoints* e os resultados obtidos podem ser comparados com as simulações realizadas através do modelo *Simple* ou *Compact*. O método “*detailed HVAC data*” incrementa um maior grau de flexibilidade na configuração dos componentes, contudo é mais trabalhoso na definição dos *setpoints* e do *schedules* de funcionamento.

3.2.3 Painel de navegação

Relativamente ao painel de navegação, este possibilita que o utilizador navegue ao longo do edifício, desde a localização geográfica até, por exemplo, uma janela específica colocada numa determinada parede. A hierarquia de navegação a que o utilizador está sujeito é a seguinte:

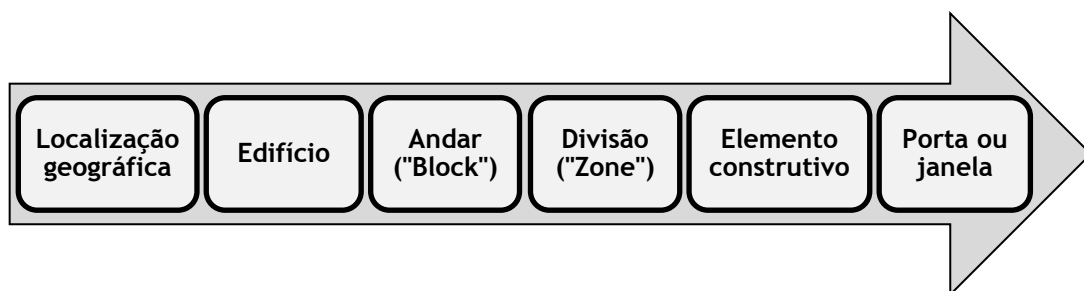


Figura 3.11 - Hierarquia de navegação do DesignBuilder.

O painel navegação apresenta ainda, a área correspondente a cada elemento construtivo de uma determinada zona.

3.2.4 Ecrã de edição

O ecrã de edição funciona como a área de trabalho do utilizador, sendo que o aspeto gráfico deste depende da aba em que se esteja a trabalhar. É nesta área que se procede à introdução de dados que caracterizem o programa, do mesmo modo, que é nesta área que se visualizam os resultados calculados.

3.2.5 Painel de informação

O painel de informação apresenta-se visível quando o modo “*learning*” está ativo, informando o utilizador sobre a função de determinadas ferramentas. Quando o modo “*learning*” está desativado, este painel é substituído pela “aba de dados de modelação”, sendo que no lugar desta se apresenta a “aba de cálculos”.

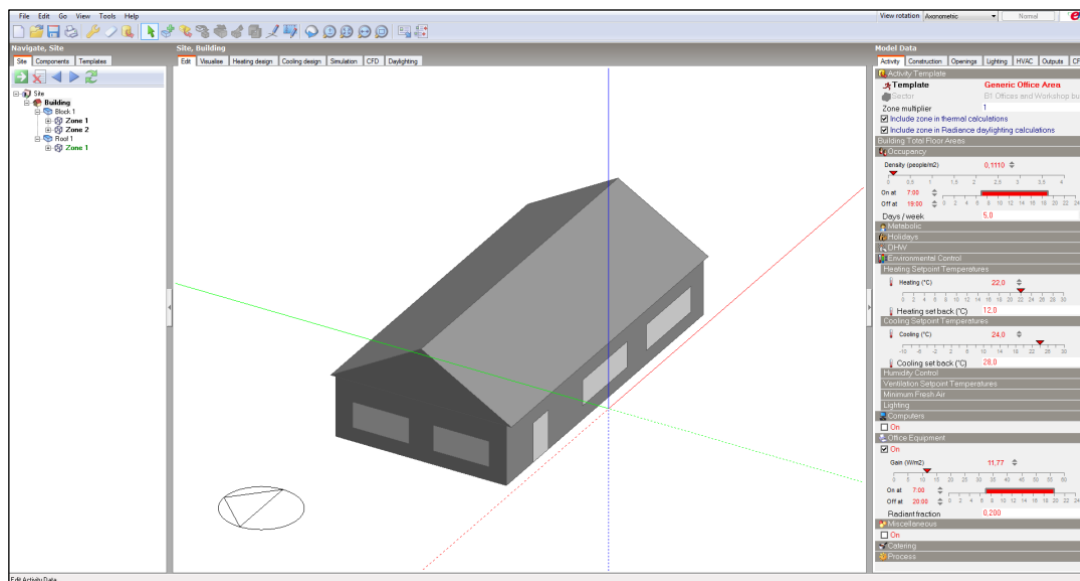


Figura 3.12 - Ambiente de trabalho do DesignBuilder quando o modo “learning” está desativo.

3.2.6 Abas de cálculos

À semelhança da aba “dados de modelação”, esta aba é também composta por vários menus, porém, estes menus exibem os dados/resultados calculados pelo programa, os resultados que são do interesse do utilizador, tais como os menus: *Edit*, *Visualise*, *Heating Design*, *Cooling Design*, *Simulation*, *CFD* e *Daylight*.

3.2.6.1 Edit

Ao contrário dos restantes menus da aba de cálculos, o menu “*Edit*” funciona como uma área para a introdução de dados, mais propriamente, dados relativos à construção geométrica do modelo de um edifício, podendo esta ser feita com recurso a ferramentas CAD que possibilitam a construção de blocos, que entre si, definem um edifício. As ferramentas apresentam-se na “barra de ferramentas” e permitem desenhar a planta do edifício num plano e de seguida extrudir com uma alta definida, formando deste modo, um bloco 3D. Este bloco pode ser ampliado/reduzido, aglomerado a outros blocos, ou dividido internamente, através de partições internas que definem divisões (zonas). O DesignBuilder possibilita, ainda, dividir um bloco em várias zonas, mas que no caso real não estejam divididas fisicamente, para tal, utiliza-se a opção “*virtual partition*” que faz a divisão virtual de um bloco em duas zonas, Figura 3.13.

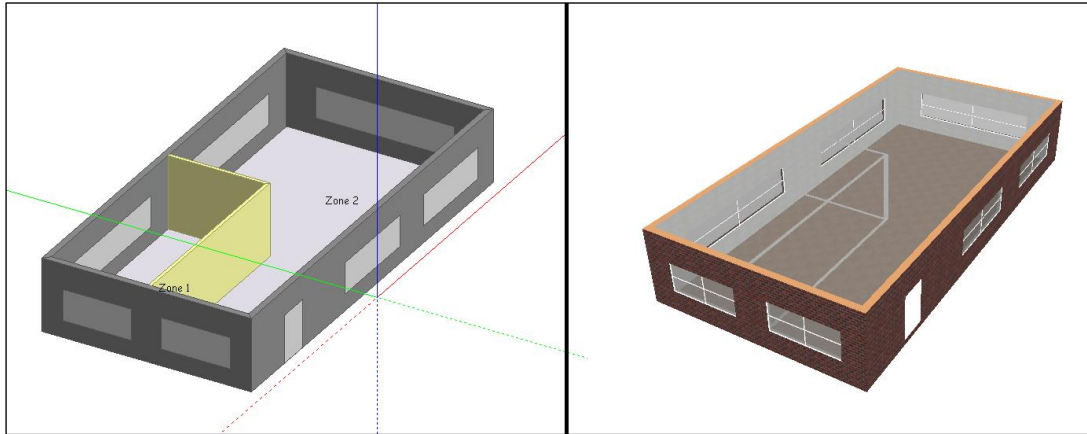


Figura 3.13 - Exemplo da utilização de uma “virtual partition”. À esquerda o aspeto do edifício na “área de modelação” e à direita o aspeto real do edifício no menu “visualise”.

Outra característica de construção de que o DesignBuilder está munido, é a capacidade de importar uma planta 2D, disponível num formato .dxf, .pdf, .jpg, entre outros, proporcionando ao utilizador “erguer” as paredes que definem o bloco. Para um edifício que é composto por vários andares, é possível importar diferentes plantas e “erguer” cada andar a partir do ficheiro importado que é colocado no topo do andar anteriormente construído.

3.2.6.2 Visualise

No menu “Visualise” é apresentada uma visão realista do edifício, uma vez que é feito um *rendering* do mesmo. Esta aba possibilita ainda visualizar e criar um vídeo com o trajeto solar ao longo de um determinado dia, as sombras provocadas por elementos envolventes no edifício ou as sombras criadas pelo próprio edifício.

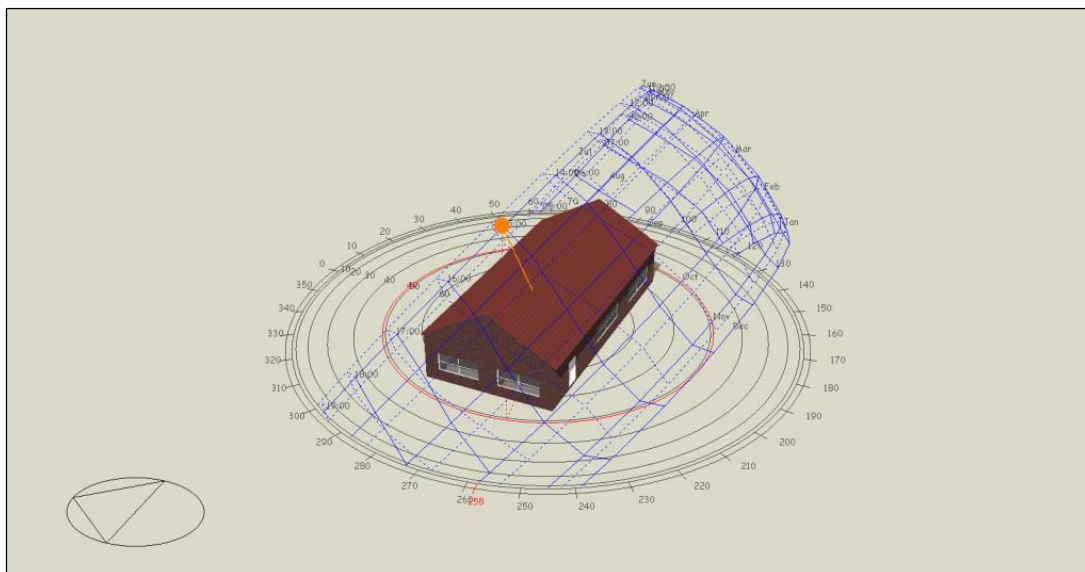


Figura 3.14 - *Rendering* do exemplo de uma habitação construída no DesignBuilder.

3.2.6.3 Heating Design

O menu “*Heating Design*” permite ao utilizador dimensionar a potência do equipamento necessária para satisfazer as condições de conforto pretendidas, para o dia de inverno mais frio (caso extremo), com base nas condições atmosféricas exteriores provenientes dos dados climáticos relativos à localização do edifício.

Os métodos de cálculo utilizados são os métodos para regime permanente, oferecidos pela ASHRAE e CIBSE. O DesignBuilder utiliza os mesmos métodos de cálculo de simulação térmica do EnergyPlus. Caso os dados necessários para o dimensionamento do equipamento ainda não tenham sido gerados, estes são gerados automaticamente neste menu.

Durante o processo de dimensionamento do equipamento, o EnergyPlus toma em consideração o caso mais extremo, i.e., baseia-se nas seguintes características:

- Temperatura exterior constante do dia de inverno mais frio (regime permanente);
- Velocidade e direção do vento definida;
- Sem ganhos solares;
- Sem ganhos térmicos internos (iluminação, equipamentos, ocupação, entre outros);
- As zonas com necessidade de aquecimento são aquecidas constantemente até alcançar as temperaturas predefinidas;
- Existem trocas de calor, por fenómenos de condução e convecção, entre zonas com diferentes temperaturas;
- Os modos *Schedules* são desprezados nos cálculos, uma vez que o dimensionamento se baseia numa análise em regime permanente que não tem a consideração o tempo.

A simulação decorre até a temperatura ou os fluxos de calor, de cada zona, convergirem. Se a convergência não ocorrer, a simulação continua até um número limite de dias, previamente indicado nas opções de cálculo. A simulação calcula a potência do equipamento necessária para garantir as temperaturas predefinidas, em cada zona, e apresenta também as perdas de calor totais, discriminando-as pelos seguintes elementos:

- Superfícies envidraçadas;
- Paredes;
- Divisórias;

- Chão/pisos;
- Telhados;
- Infiltrações externas;
- Ventilação natural interna (calor perdido para espaços adjacentes mais frios, através de janelas, portas, aberturas, entre outras).

A perda de calor total é multiplicada por um coeficiente de segurança (superior à unidade, e por defeito igual a 1,5) para garantir uma capacidade aquecimento recomendada.

3.2.6.4 Cooling Design

O menu “*Cooling Design*” opera do mesmo modo e segundo os mesmos métodos de cálculo que o menu “*Heating Design*”, contudo desempenha a função oposta, ou seja, tem como objetivo dimensionar a potência do equipamento AVAC necessária para garantir as condições de conforto predefinidas, para o dia de verão mais quente, com base nas condições atmosféricas exteriores provenientes dos dados climáticos relativos à localização do edifício. Para as zonas que não são mecanicamente arrefecidas, as temperaturas são calculadas tendo em consideração os efeitos da ventilação natural ou mecânica, caso sejam selecionadas na aba “Sistemas de AVAC”.

Durante o processo de dimensionamento do equipamento, o EnergyPlus toma em consideração o caso mais extremo, i.e., baseia-se nas seguintes características:

- Temperatura exterior constante do dia de inverno mais frio (regime permanente);
- Sem vento;
- Inclusão dos ganhos solares através de superfícies envidraçadas;
- Inclusão dos ganhos térmicos internos por parte dos equipamentos, iluminação, ocupantes, entre outros;
- Existem trocas de calor, por fenómenos de condução e convecção, entre zonas com diferentes temperaturas.

À semelhança do método utilizado na aba “*Heating Design*” simulação decorre até a temperatura ou os fluxos de calor, de cada zona, convergirem. Se a convergência não ocorrer, a simulação continua até um número limite de dias, previamente indicado nas opções de cálculo. A simulação calcula a cada meia hora os fluxos de calor de cada zona e determina a capacidade necessária para garantir a temperatura em cada zona. Para os

edifícios situados no Hemisfério Norte, o cálculo é realizado, por defeito, para o mês de julho, por sua vez, para Hemisfério Sul, o mês definido por defeito é janeiro. A carga térmica total em cada zona é multiplicada por um coeficiente de segurança (superior à unidade, e por defeito igual a 1,3) para garantir uma capacidade arrefecimento recomendada.

3.2.6.5 Simulation

No menu “*Simulation*” é calculado detalhadamente o desempenho energético de um edifício em períodos que variam de um ano a um dia. Este menu fornece ao utilizador uma diversidade de resultados, sobre a forma gráfica e/ou em Tabelas, do edifício em geral, ou numa divisão em particular, tais como: a temperatura interior, a humidade relativa, ganhos internos (iluminação, equipamentos, ocupação, ganhos solares), produção de CO₂, entre outros.

O DesignBuilder tem em conta as seguintes características para realizar a simulação:

- Dados meteorológicos provenientes do ficheiro de dados climáticos;
- Existem trocas de calor, por fenómenos de condução e convecção, entre zonas com diferentes temperaturas;
- Inclusão dos ganhos solares através de superfícies envidraçadas;
- Inclusão do funcionamento dos equipamentos de AVAC.

Este menu simplifica a vida do utilizador pelo facto de disponibilizar um sumário da simulação em discrimina os grupos consumidores de energia, os tipos de energia consumida, o consumo de água do edifício, para além de muitos outros dados que são do interesse do utilizador.

Por fim, o menu “*Simulation*” permite ainda fazer um estudo paramétrico entre duas variáveis para compreender o melhor desempenho energético do edifício, por exemplo, estudar a influência percentagem de superfície envidraçada e de diferentes tipos de vidro utilizados têm na emissão de CO₂, ou estudar a influência percentagem de superfície envidraçada e diversas opções de sombreamento têm na energia consumida pelo edifício.

3.3 Nota conclusiva

Após a apresentação do DesignBuilder e referenciadas as suas principais características e funcionalidades, verifica-se que este programa é utilizado sobretudo para o estudo do desempenho de edifícios de serviços e habitações de particulares. Como tal, a utilização deste programa para realizar os objetivos desta dissertação revelou-se um desafio ao nível da definição das gamas de temperaturas que se verificam no interior de câmaras de refrigeração.

Capítulo 4

Estudo de casos: Câmaras de refrigeração

Neste capítulo vai ser estudado o desempenho energético das câmaras de refrigeração para a conservação de produtos alimentares de três empresas que operam em três áreas distintas. Para tal, é necessário estruturar todo edifício envolvente às câmaras, assim como, definir parâmetros relativos aos elementos construtivos e à atividade de cada divisão. Os dados utilizados para descrever os parâmetros referidos foram recolhidos em auditorias energéticas, previamente realizadas às empresas em questão, no âmbito do projeto “InovEnergy - Eficiência Energética no Sector Agroindustrial”.

Na modelação dos três casos foi necessário atender a algumas opções descritas no capítulo anterior, por exemplo, o modelo de tempo utilizado foi o “*Schedules*”, “HVAC” em modelo *Simple* no modo “*adequate*” e os ganhos no modelo “*early*”. Quanto às zonas de desvão por cima das câmaras, foram definidas como zonas “*Semi exterior unconditioned*”.

4.1 Caso A

A empresa em estudo no caso A é uma microempresa que emprega 10 colaboradores fixos com um horário de funcionamento das 9 horas às 18 horas, de segunda a sábado. Localizada no concelho da Covilhã, distrito de Castelo Branco, iniciou a sua atividade em 1966, e dedica-se ao comércio por grosso de fruta e produtos hortícolas (CAE 46311).

O edifício abrange uma área coberta de aproximadamente 7000 m², têm a fachada principal orientada a oeste, possui um pé-direito mínimo de 8 metros e um máximo é de 9 metros. Na sua envolvente não existem quaisquer edifícios ou arvoredos que provoquem sombreamento.



Figura 4.1 - Perspetiva da fachada da empresa A.

4.1.1 Modelação do caso A

Com auxílio de uma planta cedida pelos funcionários da empresa em questão, modelou-se o edifício da empresa do caso A no DesignBuilder, Figura 4.2.

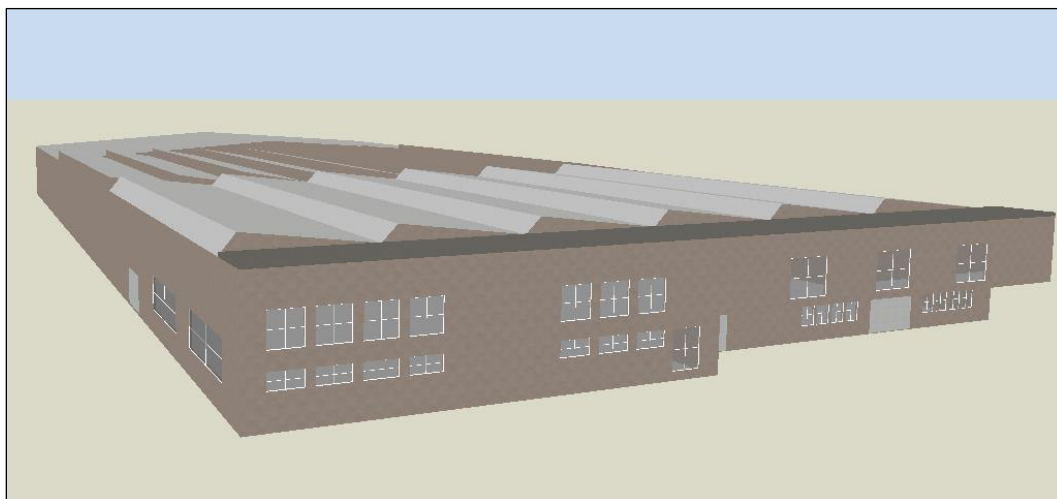


Figura 4.2 - Perspetiva da fachada da empresa A modelada no DesignBuilder.

Por questões de simplicidade, o edifício está dividido em três zonas: “Zona de recepção”, “Zona das câmaras” e “Zona de armazenamento”. As câmaras 1 e 2 encontram-se situadas na “Zona das Câmaras” e têm 2275 m^3 (13 m x 25 m x 7 m) e 840 m^3 (8 m x 15 m x 7 m) de volume, respetivamente, Figura 4.3.

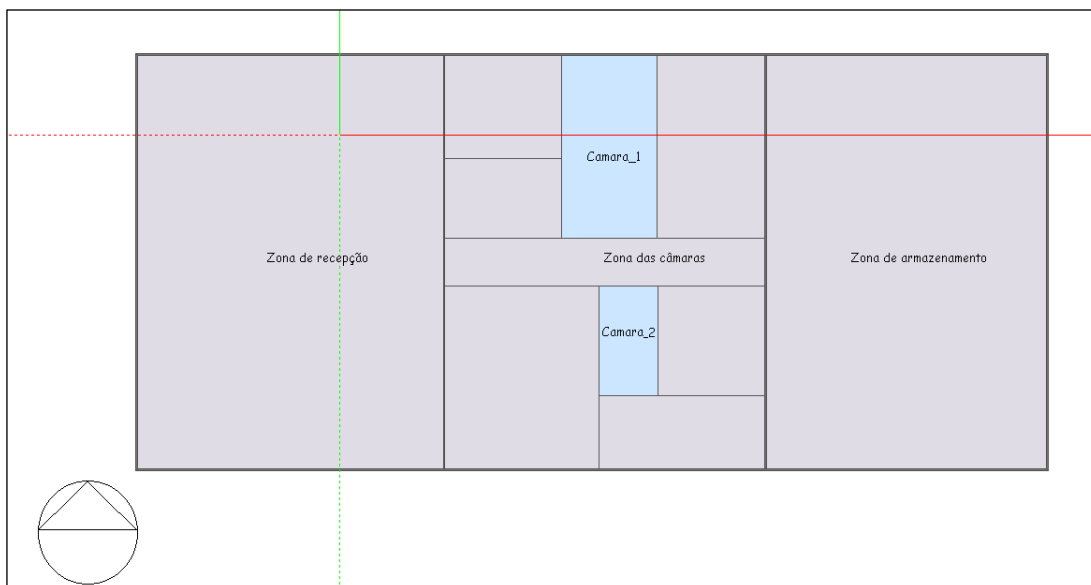


Figura 4.3 - Planta da modelação da empresa do caso A.

Posteriormente à exposição dos parâmetros físicos e geográficos da empresa do caso A é necessário descrever os elementos construtivos do edifício e das câmaras 1 e 2.

4.1.1.1 Elementos construtivos

Como as instalações da empresa do caso A datam da década de 70, os elementos construtivos do edifício não apresentam características que garantam um bom isolamento térmico. Na Tabela 4.1 estão definidos os elementos que caracterizam o edifício, e nas Tabelas 4.2 e 4.3 os elementos que caracterizam as câmaras 1 e 2, respetivamente.

Tabela 4.1 - Elementos construtivos do edifício da empresa do caso A.

	Materiais constituintes	Espessura (mm)	U (W/m ² ·K)
Paredes interiores e exteriores	Reboco areado	15	0,690
	Bloco de cimento	200	
	Reboco areado	15	
Cobertura opaca	Placa de fibrocimento	6	4,819
Cobertura translucida	Acrílico	6	5,882
Chão	Betão	200	0,658
Portas (exteriores)	Chapa de aço	2	3,846
Janelas	Vidro simples	6	5,801

Tabela 4.2 - Elementos construtivos da câmara 1 da empresa do caso A.

	Materiais constituintes	Espessura (mm)	U (W/m²·K)
Paredes e teto	Reboco areado	15	0,268
	Bloco de cimento	200	
	Caixa-de-ar	50	
	Bloco de cimento	200	
	Corticite	6	
	Espuma de poliuretano	20	
Chão	Betão	200	0,658
Porta	Chapa de aço	1	0,220
	Poliuretano expandido	120	
	Chapa de aço	1	

Tabela 4.3 - Elementos construtivos da câmara 2 da empresa do caso A.

	Materiais constituintes	Espessura (mm)	U (W/m²·K)
Paredes, teto e porta	Chapa de aço	1	0,330
	Poliuretano expandido	80	
	Chapa de aço	1	
Parede oeste	Reboco areado	15	0,268
	Bloco de cimento	200	
	Caixa-de-ar	50	
	Bloco de cimento	200	
	Corticite	6	
	Espuma de poliuretano	20	
Chão	Betão	200	0,658

Após apresentação dos elementos construtivos referentes ao edifício e às câmaras, são descritos, em seguida, os parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras desta empresa.

4.1.1.2 Parâmetros de caracterização das diferentes zonas

Os parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras da empresa do caso A são descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros de caracterização das diferentes zonas da empresa do caso A.

	Densidade de Ocupação (pessoas/m ²)	Atividade metabólica (W/pessoa)	Ganhos de equipamentos (W/m ²)	Ganhos da iluminação (W/m ²)	Temperatura (°C)
Zona de recepção	0,003	120	3,5	1	-
Zona das câmaras	0,002	216	8	2	10
Zona de armazenam. ^{mta}	0,001	180	0	1	-
Câmara 1	0,02	180	0	1	3,3
Câmara 2	0,01	180	0	2	3,2

As lâmpadas utilizadas na empresa do caso A são do tipo fluorescente, deste modo, o tipo de luminária definida foi “*Surface Mount*”, referida na Tabela 3.2. Em relação à atividade metabólica considerada, admitiu-se que para “Zona de recepção” se trata de “trabalho de escritório (ligeiro)”, para a “Zona das câmaras” é “Trabalho em máquinas (ligeiro)” e para “Zona de armazenamento”, “Câmara 1” e “Câmara 2” se trata de “trabalho manual (ligeiro)”, sendo que, o valor que lhes é atribuído foi anteriormente mencionado na Tabela 3.1. As temperaturas verificadas na “Zona de recepção” e na “Zona de armazenamento” não são controladas, e oscilam em função das condições climáticas exteriores. Por sua vez, as temperaturas da “Zona das câmaras”, da Câmara 1 e da Câmara 2, são controladas e definidas para os valores admitidos na Tabela 4.4.

Para o cálculo da carga térmica e latente dos produtos utilizou-se a equação 2.6 e 2.8, respetivamente. Na Tabela 4.5 são apresentados os dados necessários para o cálculo da carga térmica e latente dos mesmos, assim como, os valores obtidos.

Tabela 4.5 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica e latente dos produtos, para as câmaras 1 e 2, caso A.

	c (kJ/kg · K)	m (kg)	\dot{m} (kg/s)	ΔT (K)	h_l (kJ/kg)	\dot{Q}_{prod} (kW)	\dot{Q}_L (kW)	\dot{Q}_{total} (kW)	\dot{Q}_{total}/A (W/m ²)
Câmara 1	3,81	8.500	0,012	10	280	0,5	3,4	4	12
Câmara 2	3,81	3.500	0,005	10	280	0,2	1,4	2	17

O calor específico e a entalpia de vaporização da maçã foram retirados de ASHRAE (2006c). Quanto à quantidade de maçã presente durante a auditoria, era de aproximadamente 12.000 kg distribuída pelas duas câmaras. A taxa de produto refrigerado foi obtida através do quociente entre a quantidade de maçã presente nas câmaras durante a auditoria, pelo respetivo tempo (em segundos). A diferença entre a temperatura de entrada do produto e a

temperatura pretendida foi indicada pelos colaboradores. Os valores de \dot{Q}_{total} foram arredondados à unidade e resultam do somatório da carga dos produtos com a carga latente dos mesmos. Martins (2012) considerou que a carga térmica dos produtos e os ganhos relativos à respiração e transpiração dos mesmos se tratavam como um equipamento que utiliza calor rejeitado, para tal, no menu “Activity”, selecionou “miscellaneous” com os ganhos totalmente convectivos e o valor dos ganhos considerados para a câmara 1 e 2 foi 12 e 17 W/m², respetivamente.

Por outro lado, o cálculo da carga térmica por infiltrações carece de dados que nem sempre são precisos e totalmente corretos. Parte dos valores apresentados na Tabela 4.6 foram indicados pelos colaboradores da empresa sendo que estes são uma estimativa do que de facto acontece. O cálculo da carga térmica das infiltrações teve por base as equações 2.12, 2.13 e 2.14, assim como, alguns dados retirados da Figura 2.5 e Tabela 2.4.

Tabela 4.6 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica por infiltrações (\dot{Q}_{inf}), das câmara 1 e 2, caso A.

	L (m)	H (m)	\dot{Q}_s/A (W/m ²)	R_s	P	θ_p (s)	θ_o (min)	\dot{Q} (kW)	D_t	D_f	ε	\dot{Q}_{inf} (kW)	\dot{Q}_{inf}/A (W/m ²)
Câmara 1	4	3	2000	0,77	1	3	0,33	31	0,15	0,80	0	4	12
Câmara 2	4	3	2000	0,77	1	3	0,33	31	0,15	0,80	0	4	33

Para o cálculo das infiltrações através da abertura da porta assumiu-se uma passagem por hora, com um tempo de abertura de três segundos. O tempo estimado que a porta esteve aberta é de vinte segundos. O fator de caudal de ar na porta (D_f) selecionado foi de 0,80 segundo ASHRAE (2006b). A eficácia dos dispositivos de proteção (ε) é igual a 0, visto que, não existe qualquer tipo de proteção.

Relativamente aos períodos de ocupação diária e aos horários de ocupação anual, definidos para a “Zona de recepção”, “Zona das câmaras”, “Zona de armazenamento” e para as câmaras 1 e 2 são apresentados nas Figuras 4.4 a 4.11. Estes gráficos foram definidos em função das indicações dos colaboradores da empresa, e tentam, recriar os períodos de ocupação e as taxas de ocupação que ocorrem com maior frequência, contudo, existe sempre uma diferença entre os períodos definidos para a simulação e o que ocorre na realidade.

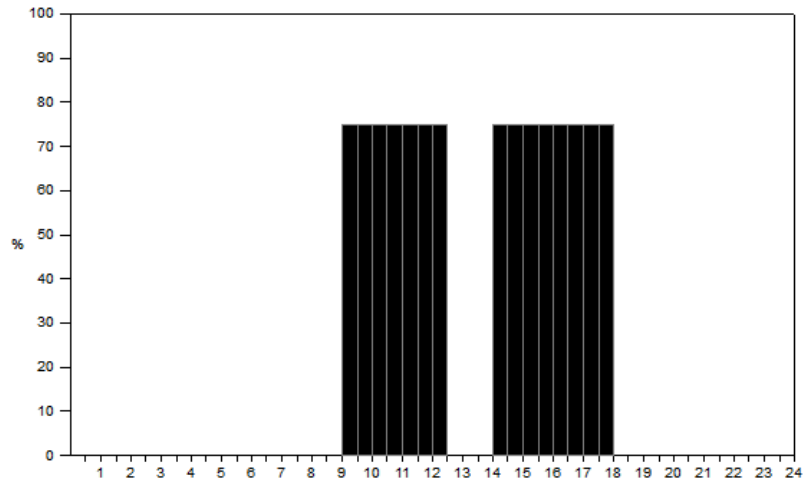


Figura 4.4 - Período de ocupação diária definido para a “Zona de recepção”.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Feb	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Mar	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Apr	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
May	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Jun	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Jul	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Aug	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Sep	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Oct	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Nov	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off
Dec	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Zona de recepção	Off

Figura 4.5 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona de recepção”.

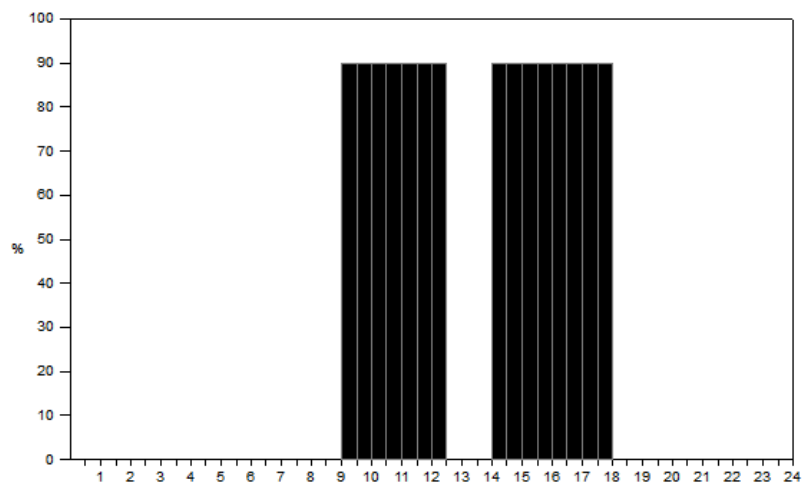


Figura 4.6 - Período de ocupação diária definido para a “Zona das câmaras”.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Feb	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Mar	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Apr	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
May	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Jun	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Jul	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Aug	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Sep	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Oct	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Nov	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off
Dec	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Zona das câmar...	Off

Figura 4.7 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona das câmaras”.

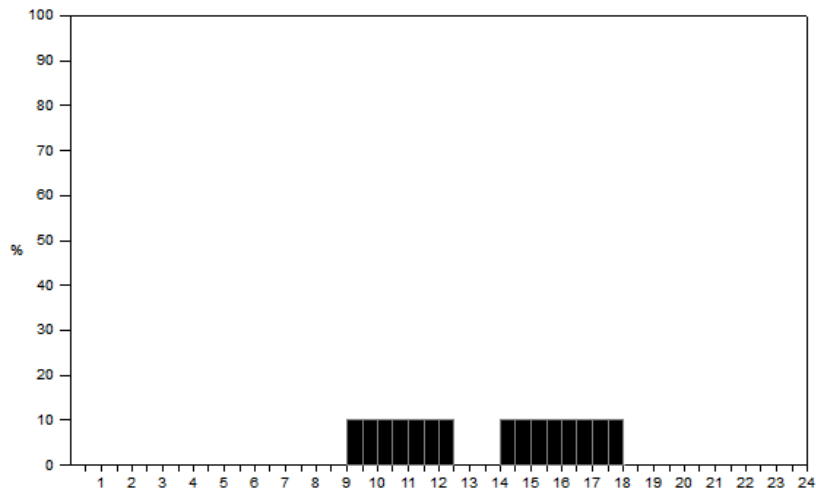


Figura 4.8 - Período de ocupação diária definido para a “Zona de armazenamento”.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Feb	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Mar	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Apr	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
May	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Jun	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Jul	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Aug	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Sep	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Oct	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Nov	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off
Dec	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaze...	Zona de armaz...	Off

Figura 4.9 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona de armazenamento”.

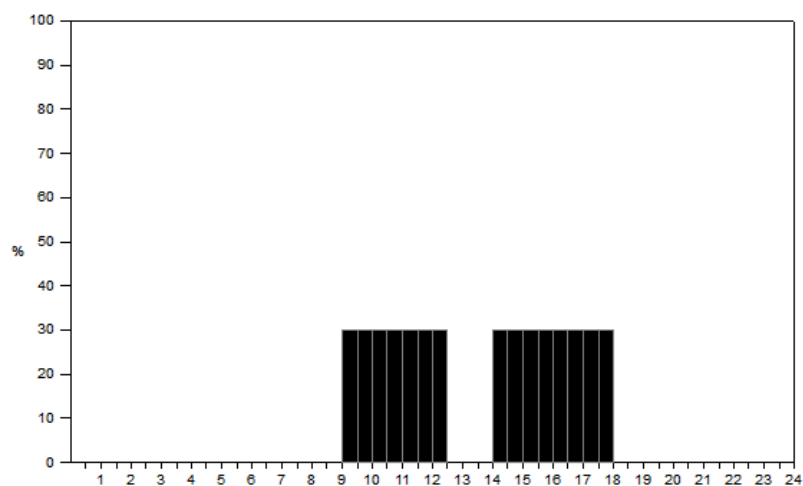


Figura 4.10 - Período de ocupação diária definido para as câmaras 1 e 2.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Feb	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Mar	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Apr	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
May	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Jun	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Jul	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Aug	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Sep	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Oct	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Nov	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off
Dec	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off

Figura 4.11 - Horário de ocupação anual definido para as câmaras 1 e 2.

Por fim, é de salientar que os períodos de funcionamento dos equipamentos obedecem ao período de ocupação dessa zona, com exceção do sistema de refrigeração que opera constantemente.

Com a descrição dos parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras da empresa do caso A, estão descritos todos os dados necessários para a simulação da empresa em questão. No subcapítulo seguinte, são apresentados os resultados da simulação feita para um intervalo de tempo entre 10 e 18 de outubro.

4.1.2 Análise e discussão dos resultados

Os resultados obtidos para esta simulação, resultaram da introdução dos parâmetros anteriormente descritos, e figuram sobre a forma de um relatório final fornecido pelo programa com os consumos discriminados, e sobre a forma de gráficos relativos às temperaturas, cargas térmicas, entre outros, das zonas do edifício e das câmaras.

O consumo de energia real da empresa do caso A registado durante o período da auditoria energética foi de 10,6 MWh, por outro lado, o consumo de energia segundo a simulação foi de

13,2 MWh, ou seja, uma diferença de 24,5 %. Para ambos os casos, o consumo relativo por parte da refrigeração vai de encontro ao que é referido por Lekov *et al.* (2009), i.e., o sistema de refrigeração foi o maior consumidor da empresa representado para o caso real e para a 73,6 % e 78,0 % do consumo de energia elétrica, respetivamente.

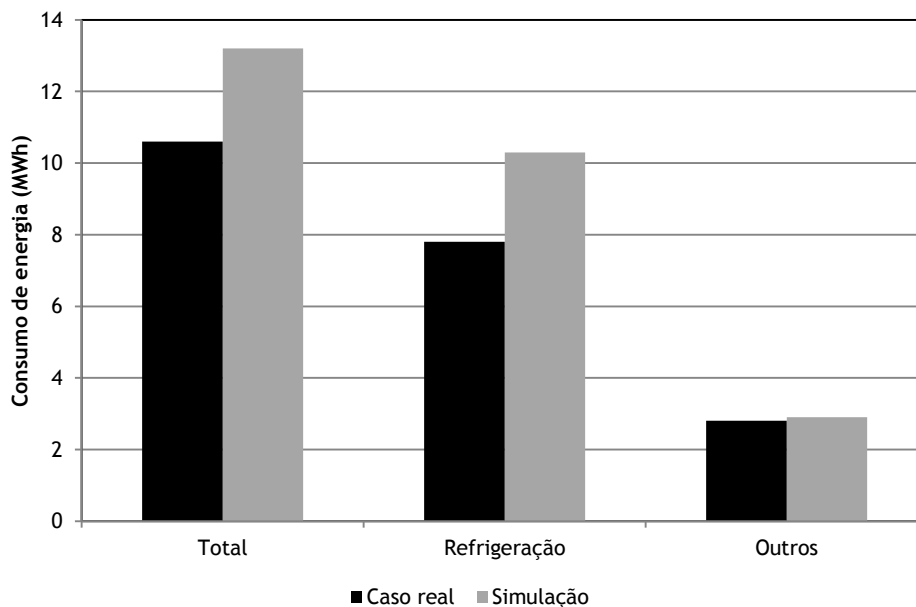


Figura 4.12 - Comparação do consumo de energia, total e parcial, do caso real e da simulação, durante a auditoria.

A disparidade entre a energia consumida pela refrigeração na simulação face ao caso real pode ser justificada pela diferença entre os dados climáticos utilizados e as temperaturas registadas aquando da auditoria, o que vai de encontro com o referido por Chan (2011) e Bhandari *et al.* (2012) sobre a importância que a utilização de dados climáticos corretos tem no sucesso da simulação do desempenho energético de um edifício. Segundo PORDATA (2014) a temperatura média anual no distrito de Castelo Branco, no ano de 2002 (ano referente aos dados climáticos utilizados na simulação), foi de 15,8 °C, por sua vez, 2013 foi um ano mais quente, em média, 0,2 °C que 2002. Esta diferença, apesar de ser relativa a um valor médio, indica que, possivelmente, o mês de outubro de 2013 foi mais quente que o mesmo mês em 2002, e como tal, justifica a diferença apresentada no consumo de energia pelo sistema de refrigeração entre o caso real e a simulação.

Nas Figura 4.13 e 4.14 são apresentadas as temperaturas verificadas no interior das câmaras 1 e 2 durante a simulação, respetivamente, e constata-se que estas permanecem constantes ao longo do tempo.

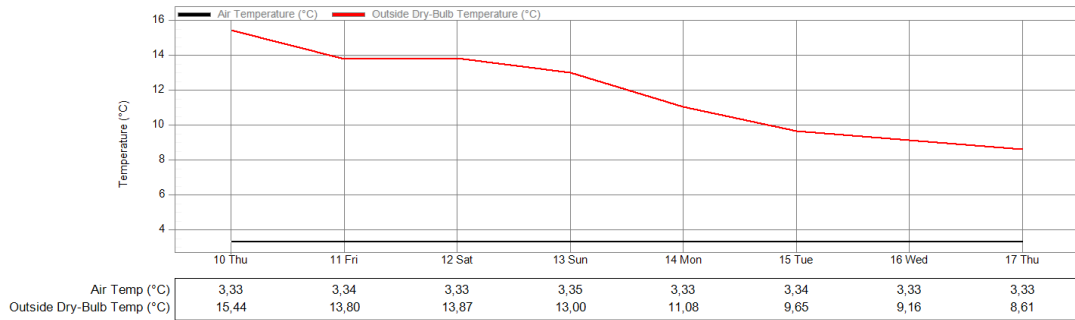


Figura 4.13 - Valores de temperatura da câmara 1 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.

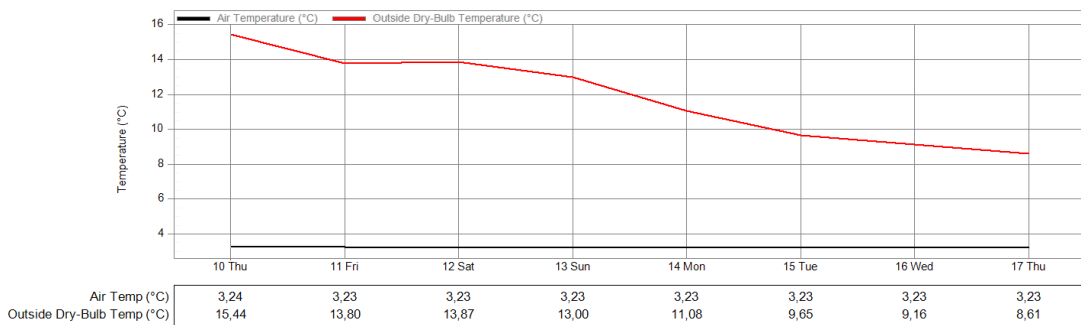


Figura 4.14 - Valores de temperatura da câmara 2 (azul claro) e de bolbo seco do exterior (azul escuro) no DB.

O balanço energético no interior da câmara 1 e da câmara 2 são apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16, respetivamente. Verifica-se que nas câmaras 1 e 2 as cargas térmicas relativas à iluminação, carga térmica e latente dos produtos e a carga térmica da ocupação representam 14,1 % e 11,3 %, respetivamente, da energia utilizada em refrigeração para suprimir estes ganhos térmicos. A restante quantidade de energia utilizada para a refrigeração serve para anular os ganhos térmicos por transmissão de calor pelos elementos construtivos das câmaras e das infiltrações.

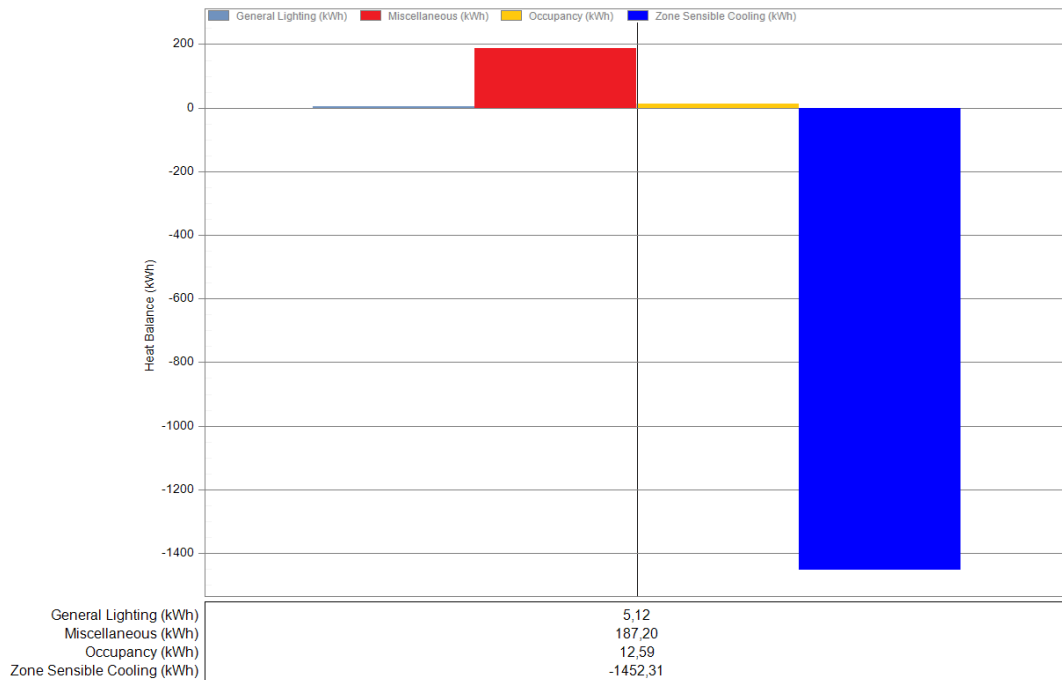


Figura 4.15 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 1, numa semana.

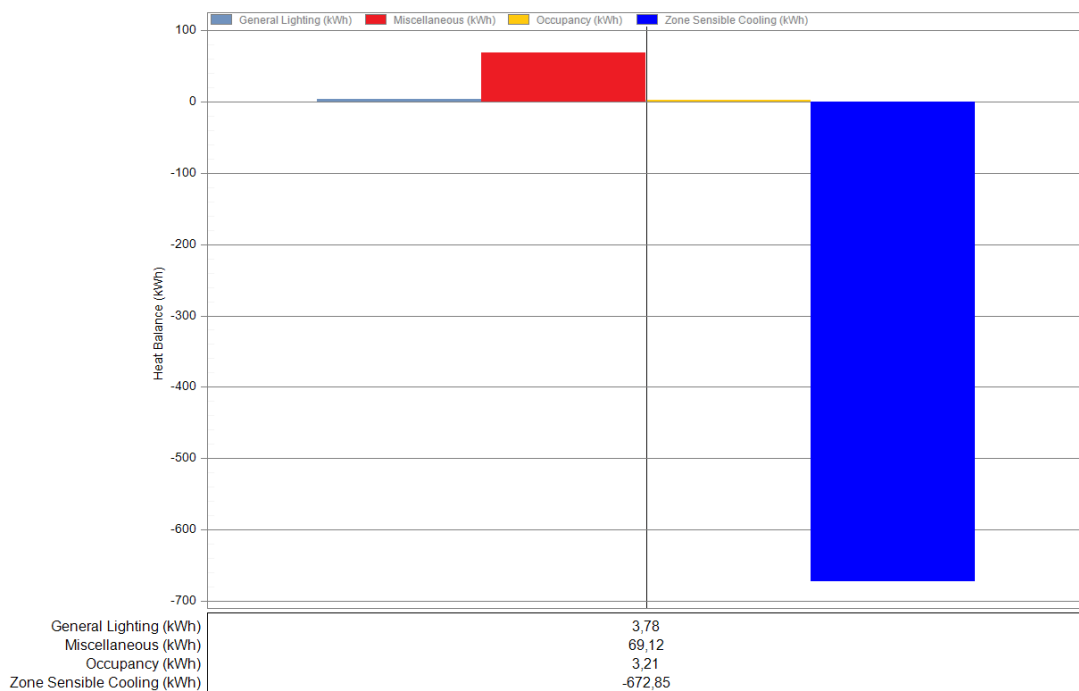


Figura 4.16 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 2, numa semana.

A Figura 4.17, relativa aos ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações na câmara 1, revela que o chão da câmara 1 é o elemento por onde ocorrem os maiores ganhos térmicos (570,98 kWh). Por outro lado, na câmara 2 essa tendência não se verifica, i.e., é pelas paredes da câmara que se verificam os maiores ganhos térmicos (243,57 kWh), contudo, o chão também apresenta um ganho térmico elevado (212,35 kWh), Figura 4.18.

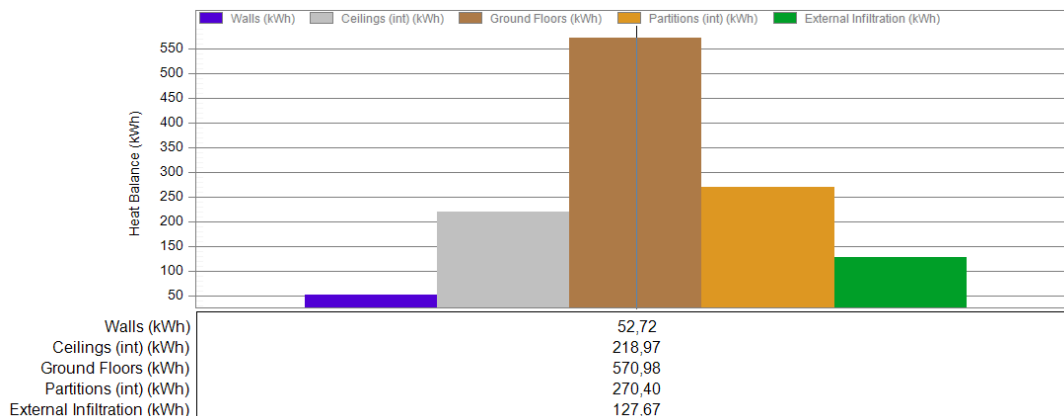


Figura 4.17 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, numa semana.

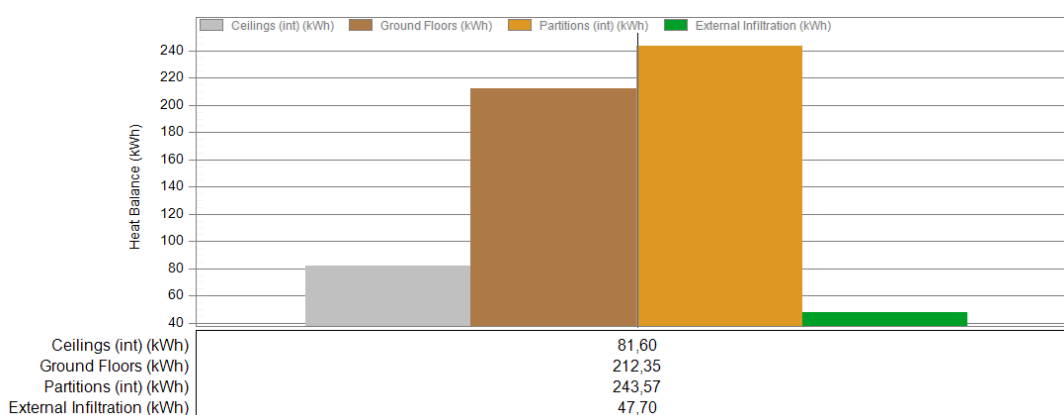


Figura 4.18 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, numa semana.

Em relação às trocas de calor que ocorrem pelos elementos construtivos de todo o edifício, verifica-se que é pelo chão que existem maiores ganhos (1210,46 kWh), justificado pela extensa área que o chão ocupa face aos restantes elementos e, também, porque os ganhos térmicos pelo chão são puramente por condução, enquanto na cobertura (a área coberta é sensivelmente igual à área do chão) os ganhos associados são por radiação. Verifica-se, ainda, que as superfícies envidraçadas libertam uma quantidade significativa de energia para o exterior, isto porque os elementos que constituem a superfície envidraçada têm um elevado coeficiente global de transferência de calor, Figura 4.19.

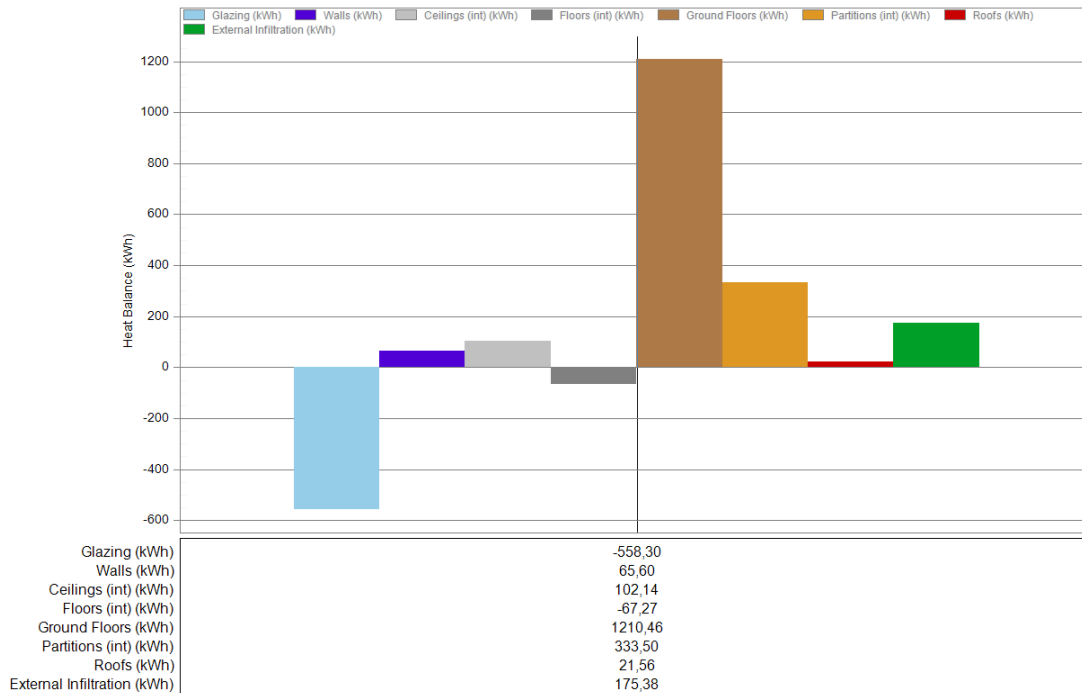


Figura 4.19 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso A, numa semana.

Outro ponto importante de estudo é a temperatura na zona do desvão por cima das câmaras de refrigeração, uma vez que a cobertura está próxima do teto das câmaras, sendo este um espaço confinado, está sujeito a temperaturas bastante superiores às temperaturas das câmaras e à temperatura exterior. A Figura 4.20 revela, para a maioria dos dias, um aumento de aproximadamente 6 °C da temperatura na zona do desvão, face à temperatura de bolbo seco no exterior.

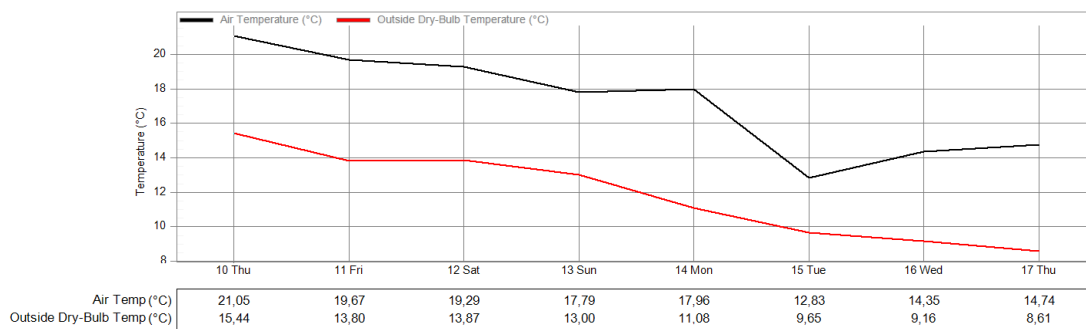


Figura 4.20 - Temperatura no desvão na “Zona das câmaras” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho)

Realizado o desempenho energético das câmaras da empresa do caso A, vai-se proceder à utilização desta poderosa ferramenta computacional, para implementar algumas alterações nos elementos construtivos da empresa e analisar os resultados obtidos com as alterações face aos resultados da simulação com os dados reais.

4.1.3 Potencial de melhoria

Como o *software* permite alterar os elementos construtivos com relativa facilidade, simular e verificar as alterações no consumo de energia, esta secção apresenta a consequência da alteração de alguns elementos construtivos da câmara e da sua envolvente que mereceram atenção no subcapítulo anterior.

O primeiro caso testado consistiu no melhoramento do chão das câmaras, para tal, colocou-se uma placa de poliestireno extrudido com 80 mm de espessura ($U = 0,254 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Com esta alteração, os resultados apresentam uma diminuição no consumo total de energia de 4,5 % face ao valor obtido na simulação, ou seja, para o mesmo período de tempo consumiram-se menos 0,6 MWh. Com esta melhoria deste elemento construtivo, verificou-se uma diminuição nos ganhos térmicos na câmara 1 e na câmara 2 de 63,2 % e 63,5 %, respetivamente.

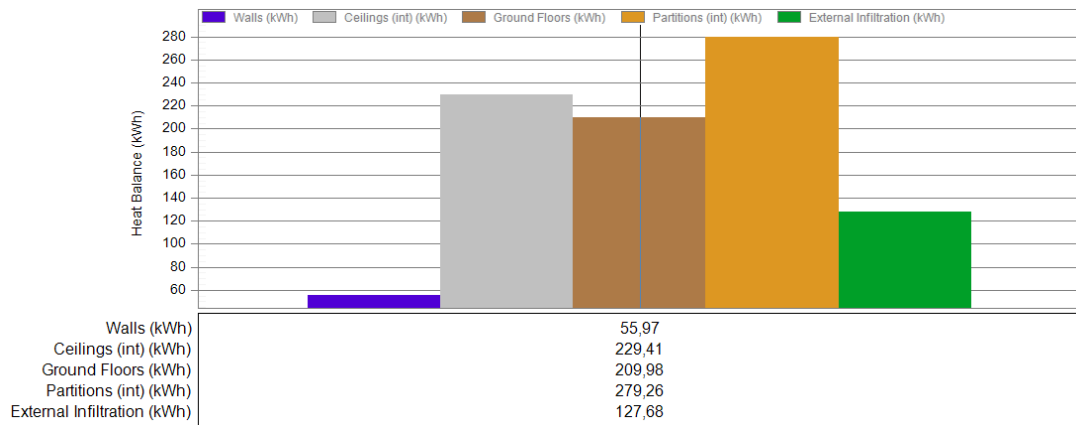


Figura 4.21 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 1.

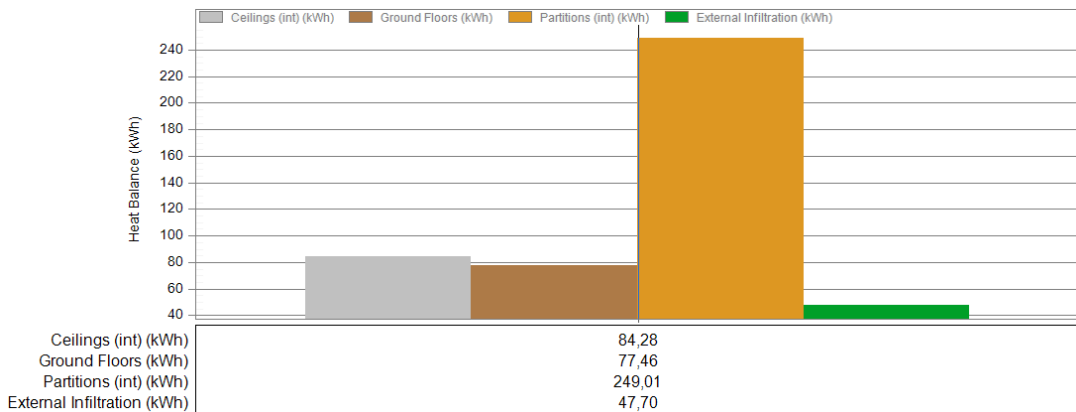


Figura 4.22 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2.

Em relação ao edifício, a Figura 4.23 revela que os ganhos térmicos que ocorrem pelo chão diminuem aproximadamente 39 % relativamente ao caso inicial. A explicação para uma diminuição tão significativa face à área modificada (área das câmaras representa 6,4 % da área total da empresa) é justificada pela equação 2.3, referente aos ganhos térmicos por

transmissão de calor dizendo que estes são diretamente proporcionais à área da superfície e à diferença de temperaturas entre duas superfícies, assim, apesar de a área das câmaras ser muito menor que o restante edifício, a diferença de temperatura entre as câmaras e o chão é bastante superior à diferença de temperaturas nas outras zonas do edifício.

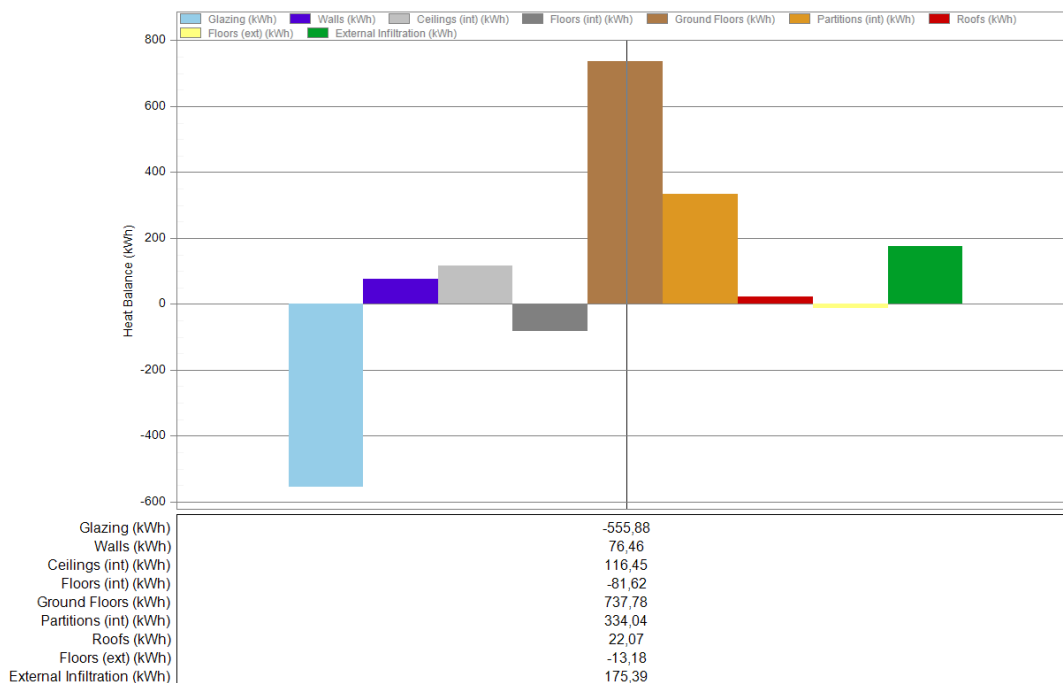


Figura 4.23 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso A, numa semana, após a melhoria do chão das câmaras.

A segunda simulação consistiu no aumento da espessura das paredes de painel sandwich da câmara 2, para tal, substituíram-se por paredes com 100 mm de espessura ($U = 0,267 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Com esta alteração consumiram-se menos 0,1 MWh, o que representa uma diminuição do consumo de energia de 0,8 %. Relativamente aos ganhos térmicos que ocorrem pelas paredes houve uma diminuição de 11,5 %, ou seja, menos 28,06 kWh.

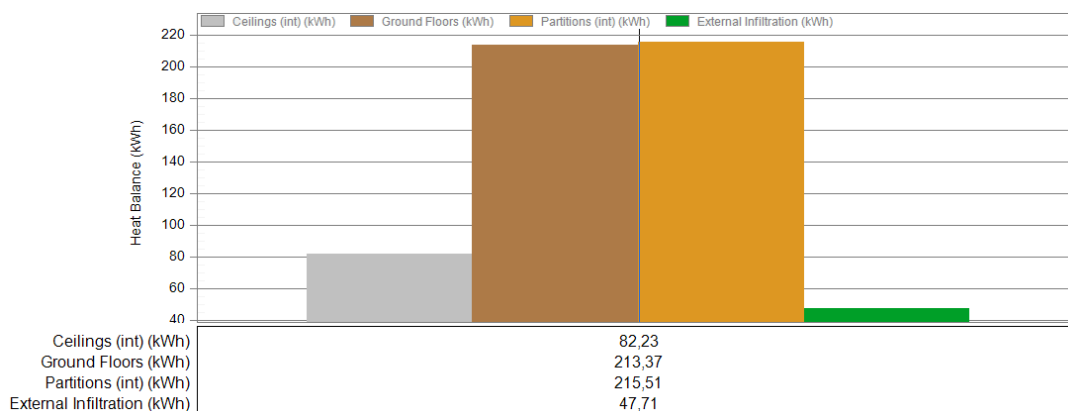


Figura 4.24 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes da câmara 2.

A terceira simulação de melhoria consistiu na substituição da cobertura da “Zona das câmaras” por um painel sandwich com 40 mm de espessura ($U = 0,628 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Os resultados revelaram uma diminuição no consumo de 3,8 % face ao valor obtido na primeira simulação, ou seja, para o mesmo período de tempo consumiram-se menos 0,5 MWh. A Figura 4.25 demonstra uma diminuição da temperatura no desvão, na maioria dos dias, porém, no dia 15 a temperatura no desvão após a melhoria na cobertura foi superior à temperatura desse mesmo dia para a simulação com a cobertura atual, isto deve-se ao facto da inércia térmica do edifício ser maior quando este se encontra melhor isolado termicamente.

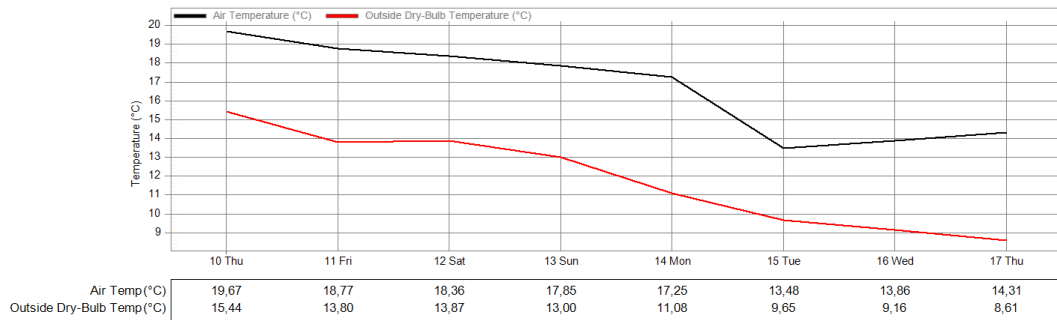


Figura 4.25 - Temperatura no desvão na “Zona das câmaras” após a melhoria na cobertura (preto).

Quanto às trocas de calor através do teto da câmara 1 e da câmara 2, estas diminuíram 10,1 % e 10,4 %, respetivamente.

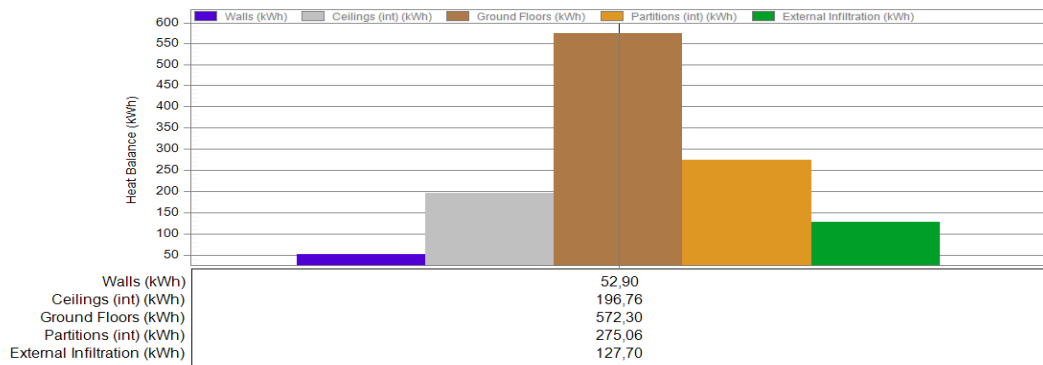


Figura 4.26 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações na câmara 1, após a melhoria da cobertura da “Zona das câmaras”.

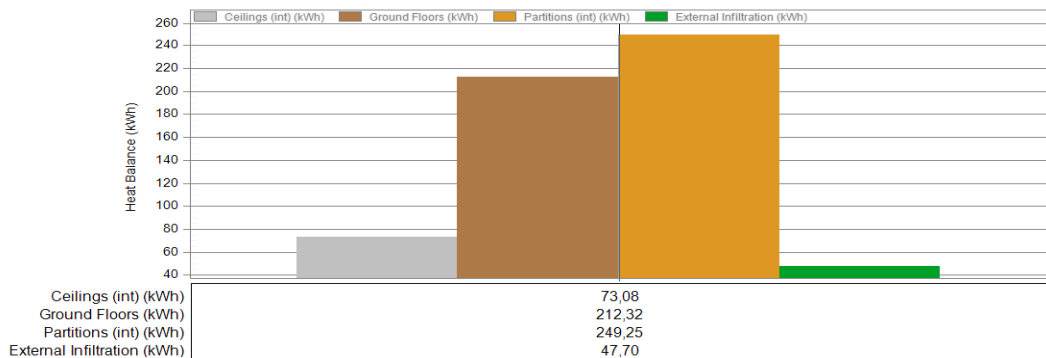


Figura 4.27 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações na câmara 1, após a melhoria da cobertura da “Zona das câmaras”.

Seguidamente realizou-se um estudo em que se considerou todas as melhorias acima referidas, ou seja, simulou-se o desempenho energético das câmaras quando melhorados os seus chãos, as paredes da câmara 2 e a cobertura na “Zona das câmaras”. Os resultados demonstram um decréscimo no consumo de 7,6 % comparativamente à simulação inicial, em termos quantitativos essa diferença foi de 1,0 MWh.

Por fim, estudou-se a influência das superfícies envidraçadas no desempenho das câmaras, para tal, substituíram-se as superfícies envidraçadas por vidro duplo com 6 mm e caixa-de-ar de 6 mm ($U = 3,107 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Para este caso, houve uma diminuição de 0,8 % no consumo de energia pelo sistema de refrigeração e de 41,5 % nas trocas de calor pelas superfícies envidraçadas, em relação à simulação inicial. Esta melhoria no consumo de energia parece insignificativa, em comparação à diminuição de energia libertada para o exterior. Isto demonstra que devido à distância das câmaras às superfícies envidraçadas estas não influenciam o desempenho energético das câmaras.

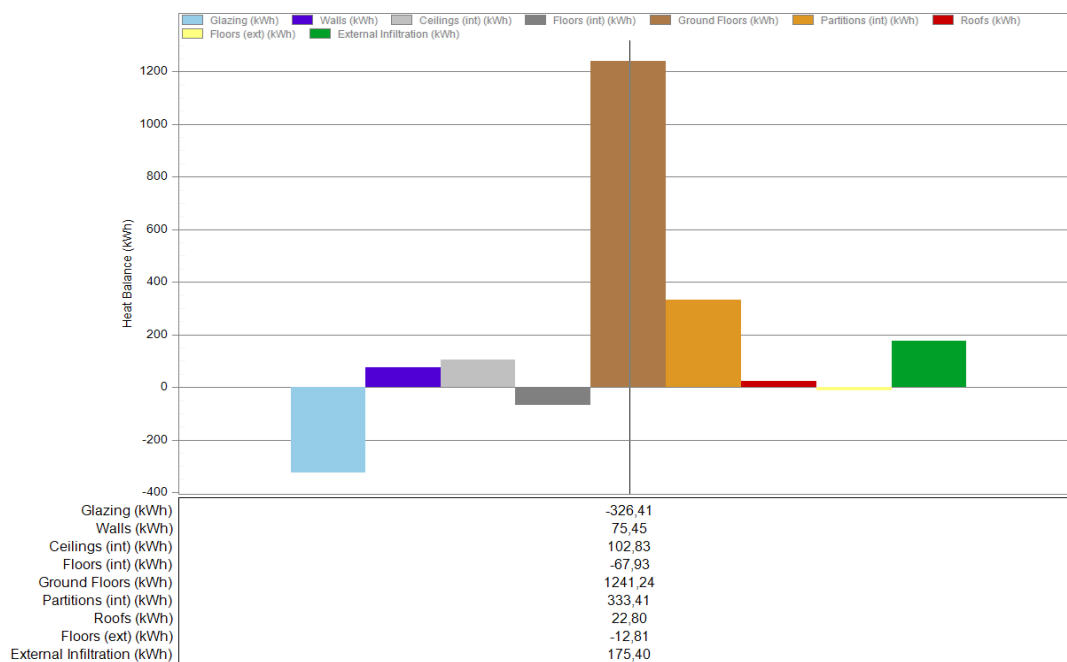


Figura 4.28 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso A, numa semana, após a melhoria das superfícies envidraçadas.

4.2 Caso B

A empresa em estudo no caso B é uma microempresa que emprega 4 colaboradores fixos com um horário de funcionamento das 9 horas às 18 horas, de segunda a sexta. Localizada no concelho da Covilhã, distrito de Castelo Branco, iniciou a sua atividade em 2007, e dedica-se ao comércio a retalho de carne e produtos à base de carne (CAE 47220).

O edifício abrange uma área coberta de aproximadamente 600 m², têm a fachada principal orientada a oeste, possui um pé-direito mínimo de 4 metros e um máximo é de 6 metros. Na sua envolvente não existem quaisquer edifícios ou arvoredos que provoquem sombreamento.



Figura 4.29 - Perspetiva da fachada da empresa B.

4.2.1 Modelação do caso B

Com auxílio de uma planta cedida pelos funcionários da empresa em questão, modelou-se o edifício da empresa do caso B no DesignBuilder, Figura 4.30.



Figura 4.30 - Perspetiva da fachada da empresa B modelada no DesignBuilder.

Por questões de simplicidade, o edifício está dividido em duas zonas: “Diversos” e “Zona das câmaras”. As câmaras 1 e 2 encontram-se situadas na “Zona das câmaras” e têm 86,4 m³ (6 m x 4,5 m x 3,2 m) e 192 m³ (10 m x 6 m x 3,2 m) de volume, respetivamente.

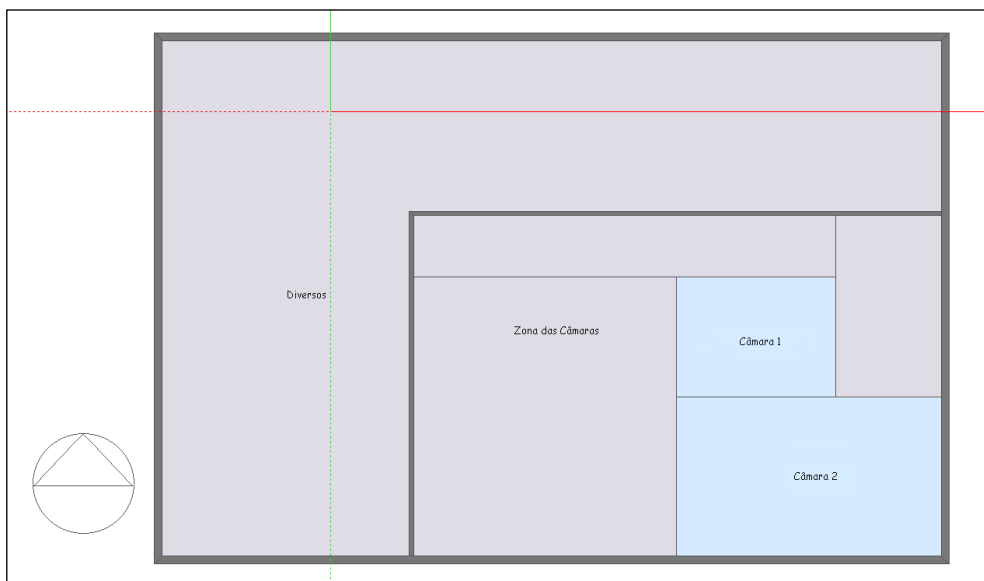


Figura 4.31 - Planta da modelação da empresa do caso B.

Após a descrição dos parâmetros físicos e geográficos da empresa do caso B é necessário descrever os elementos construtivos do edifício, da câmara 1 e da câmara 2.

4.2.1.1 Elementos construtivos

Em termos estruturais, o edifício é recente, construído em 2006, apresenta excelentes condições de isolamento térmico. Na Tabela 4.7 estão definidos os elementos que caracterizam o edifício da empresa B e na Tabela 4.8 os elementos que caracterizam as câmaras 1 e 2.

Tabela 4.7 - Elementos construtivos do edifício da empresa B.

	Materiais constituintes	Espessura (mm)	U (W/m ² ·K)
Paredes exteriores	Reboco areado	15	0,595
	Tijolo	110	
	Placa de poliestireno extrudido	40	
	Tijolo	110	
	Reboco areado	15	
Cobertura e portas	Chapa de aço	1	0,626
	Poliuretano expandido	40	
	Chapa de aço	1	
Chão	Betão	200	0,680
Paredes e teto	Chapa de aço	1	0,432
	Poliuretano expandido	60	
	Chapa de aço	1	
Janelas	Vidro com camada refletora	6	3,107
	Caixa-de-ar	6	
	Vidro simples	6	

Tabela 4.8 - Elementos construtivos das câmaras 1 e 2 da empresa B.

	Materiais constituintes	Espessura (mm)	U (W/m ² ·K)
Paredes, teto e portas	Chapa de aço	1	0,224
	Poliuretano expandido	80	
	Chapa de aço	1	
Chão	Betão	200	0,699
	Resina epóxi	2	

Uma vez descritos os elementos construtivos do edifício e das câmaras, são descritos, em seguida, os parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras desta empresa.

4.2.1.2 Parâmetros de caracterização das diferentes zonas

Os parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras da empresa do caso B são descritos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Parâmetros de caracterização das diferentes zonas da empresa do caso B.

	Densidade de Ocupação (pessoas/m ²)	Atividade metabólica (W/pessoa)	Ganhos de equipamentos (W/m ²)	Ganhos da iluminação (W/m ²)	Temperatura (°C)
Diversos	0,013	180	25	3	-
Zona das câmaras	0,015	180	25	3	8,0
Câmara 1	0,040	180	0	4	0,2
Câmara 2	0,020	180	0	3	0

As lâmpadas utilizadas na empresa B são do tipo fluorescente, deste modo, o tipo de luminária definida foi “*Surface Mount*” referida na Tabela 3.2. Por sua vez, a atividade metabólica considerada para cada uma das zonas definidas e das câmaras é “trabalho manual (ligeiro)”, sendo que o valor que lhe é atribuído foi anteriormente mencionado na Tabela 3.1. A temperatura verificada na zona “Diversos” não é controlada, oscilando em função dos ganhos térmicos por condução através dos elementos construtivos, no entanto, as temperaturas da “Zona das câmaras” e das câmaras 1 e 2 são controladas e definidas para os valores definidos na Tabela 4.9.

Em relação ao cálculo da carga térmica e latente dos produtos recorreu-se novamente às equações 2.6 e 2.8. Na Tabela 4.10 são apresentados os dados necessários para o cálculo da carga térmica e latente dos mesmos, assim como, os valores obtidos.

Tabela 4.10 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica e latente dos produtos, para as câmaras 1 e 2, caso B.

	c (kJ/kg · K)	m (kg)	ṁ (kg/s)	ΔT (K)	h_l (kJ/kg)	Q̇_{prod} (W)	Q̇_L (W)	Q̇_{total} (W)	Q̇_{total}/A (W/m ²)
Câmara 1	3,08	1350	0,002	5	166	30	325	355	13
Câmara 2	3,08	3150	0,005	5	166	70	760	830	14

O calor específico e a entalpia de vaporização da carne de porco foram retirados de ASHRAE (2006c). Quanto à quantidade de produto presente durante a auditoria, era de aproximadamente 4.500 kg distribuída pelas duas câmaras. A taxa de produto refrigerado foi obtida através do quociente entre a quantidade de carne de porco presente nas câmaras durante a auditoria, pelo respetivo tempo (em segundos). A diferença entre a temperatura de entrada do produto e a temperatura pretendida foi indicada pelos colaboradores. Os valores de \dot{Q}_{total} foram arredondados à unidade e resultam do somatório da carga dos produtos com a carga latente dos mesmos. A carga térmica e latente dos produtos foram considerados no DesignBuilder como um equipamento que utiliza calor rejeitado, para tal, no menu “Activity”, selecionou “miscellaneous” com os ganhos totalmente convectivos e o valor dos ganhos considerados para a câmara 1 e 2 foi 13 e 14 W/m², respetivamente.

Por outro lado, o cálculo da carga térmicas por infiltrações carece de dados que nem sempre são precisos e totalmente corretos. Parte dos valores apresentados na Tabela 4.6 foram indicados pelos colaboradores da empresa sendo que estes são uma estimativa do que de facto acontece. O cálculo da carga térmica das infiltrações teve por base as equações 2.12, 2.13 e 2.14, assim como, alguns dados retirados da Figura 2.5 e Tabela 2.4.

Tabela 4.11 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica por infiltrações (\dot{Q}_{inf}), das câmara 1 e 2.

	L (m)	H (m)	Q̇_s/A (W/m ²)	R_s	P	θ_p (s)	θ_o (min)	Q̇ (kW)	D_t	D_f	ε	Q̇_{inf} (kW)	Q̇_{inf}/A (W/m ²)
Câmara 1	2	2	2500	0,59	1	3	0,50	14	0,22	0,95	0,8	0,50	19
Câmara 2	2	2	2500	0,59	1	3	0,50	14	0,22	0,95	0,8	0,50	8

Para o cálculo das infiltrações através da abertura da porta assumiu-se uma passagem por hora, com um tempo de abertura de três segundos. O tempo estimado que a porta esteve aberta é de trinta segundos. O fator de caudal de ar na porta (D_f) selecionado foi de 0,80 segundo ASHRAE (2006b). A eficácia dos dispositivos de proteção (ϵ) é igual a 0,95 uma vez que as câmaras tinham lamelas de PVC em boas condições.

Relativamente aos períodos de ocupação diária e aos horários de ocupação anual, definidos para a zona “Diversos”, “Zona das câmaras” e para as câmaras 1 e 2 são apresentados nas

Figuras 4.32 a 4.37. Estes gráficos foram definidos em função das indicações dos colaboradores da empresa tentando recriar os períodos de ocupação e as taxas de ocupação que ocorrem com maior frequência, contudo, existe sempre uma diferença entre os períodos definidos para a simulação e o que ocorre na realidade.

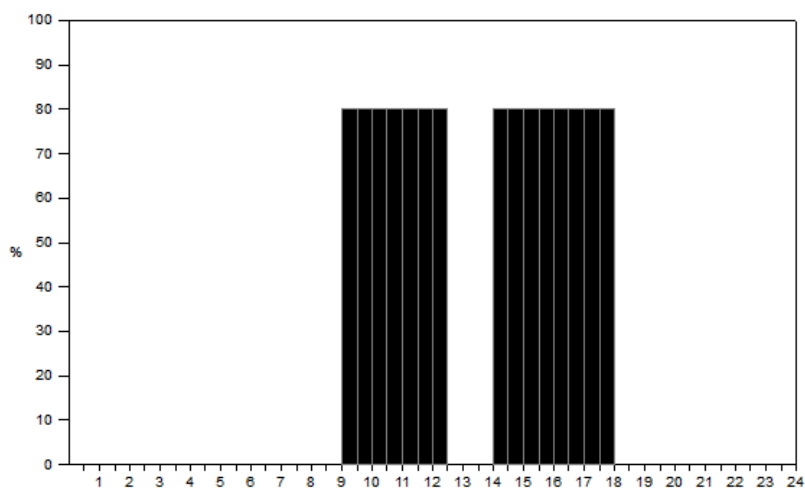


Figura 4.32 - Período de ocupação diária definido para a zona “Diversos”.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Feb	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Mar	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Apr	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
May	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Jun	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Jul	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Aug	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Sep	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Oct	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Nov	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Dec	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off

Figura 4.33 - Horário de ocupação anual definido para a zona “Diversos”.

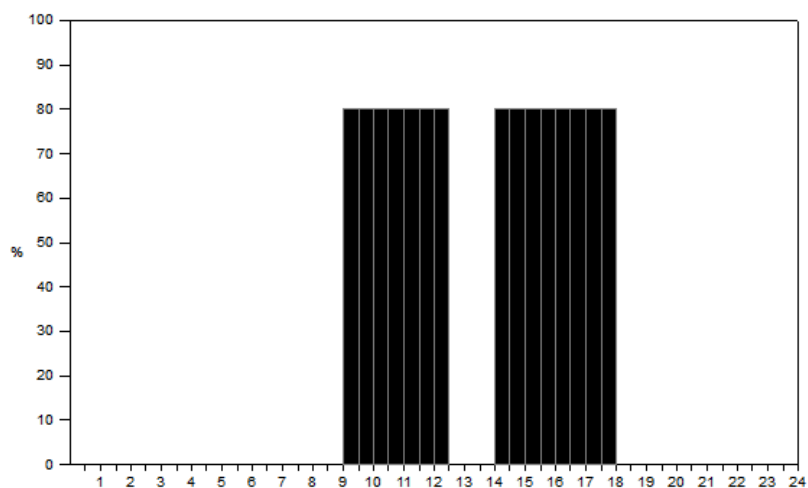


Figura 4.34 - Período de ocupação diária definido para a “Zona das câmaras”.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Feb	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Mar	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Apr	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
May	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Jun	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Jul	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Aug	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Sep	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Oct	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Nov	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Dec	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off

Figura 4.35 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona das câmaras”.

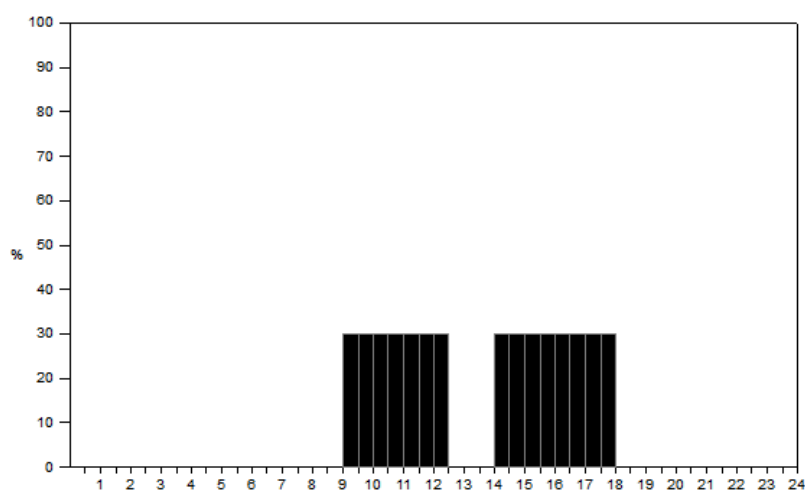


Figura 4.36 - Período de ocupação diária definido para as câmaras 1 e 2.

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Feb	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Mar	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Apr	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
May	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Jun	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Jul	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Aug	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Sep	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Oct	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Nov	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Dec	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off

Figura 4.37 - Horário de ocupação anual definido para as câmaras 1 e 2.

Quanto ao período de funcionamento dos equipamentos, este obedece ao período de ocupação dessa zona, com exceção do sistema de refrigeração que opera constantemente.

Após a descrição dos parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras da empresa do caso B, estão descritos todos os dados necessários para a simulação da empresa em questão. No subcapítulo seguinte, são apresentados os resultados da simulação feita para um intervalo de tempo entre 12 e 19 de novembro.

4.2.2 Análise e discussão dos resultados

A análise e a discussão dos resultados da empresa do caso B resultaram da introdução dos parâmetros anteriormente descritos, e figuram sobre a forma de um relatório final fornecido pelo programa com os consumos discriminados, e sobre a forma de gráficos relativos às temperaturas, cargas térmicas, entre outros, de zonas do edifício e das câmaras.

O consumo de energia real da empresa do caso B registado durante o período da auditoria energética foi de 1172 kWh, enquanto o consumo de energia segundo a simulação foi de 1324 kWh, uma diferença de 13,0 %. Ao contrário do que é referido por Lekov *et al.* (2009), no caso real, o sistema de refrigeração não foi o maior consumidor de energia, o seu consumo representou, apenas, 47,8 % do total de energia consumida, o que sugere um consumo excessivo por parte dos outros equipamentos, ou então um consumo diminuto pelo sistema de refrigeração. Por outro lado, nos resultados obtidos na simulação a refrigeração representa 56,4 % do consumo total da energia da empresa.

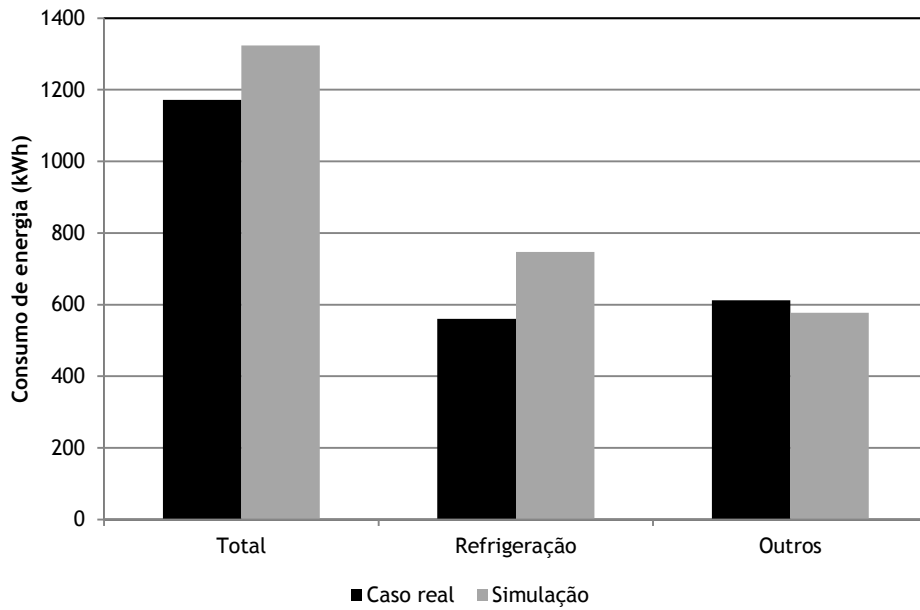


Figura 4.38 - Comparação do consumo de energia, total e parcial, do caso real e da simulação, durante a auditoria.

Por outro lado, as temperaturas verificadas no interior das câmaras 1 e 2 durante a simulação são apresentados nas Figuras 4.39 e 4.40, respetivamente.

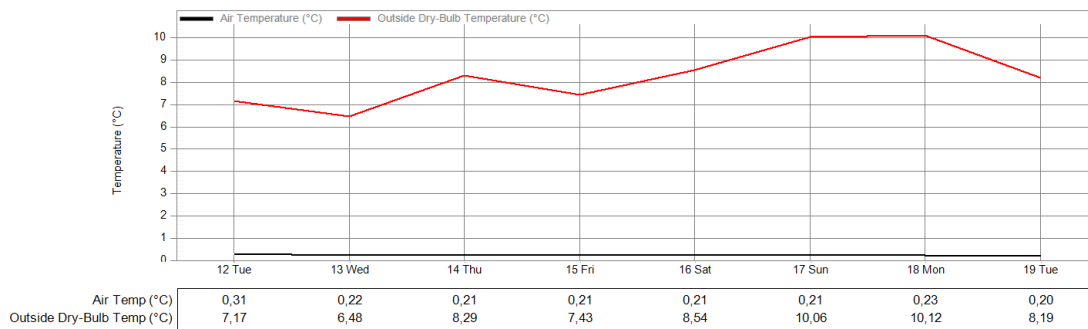


Figura 4.39 - Valores de temperatura da câmara 1 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB

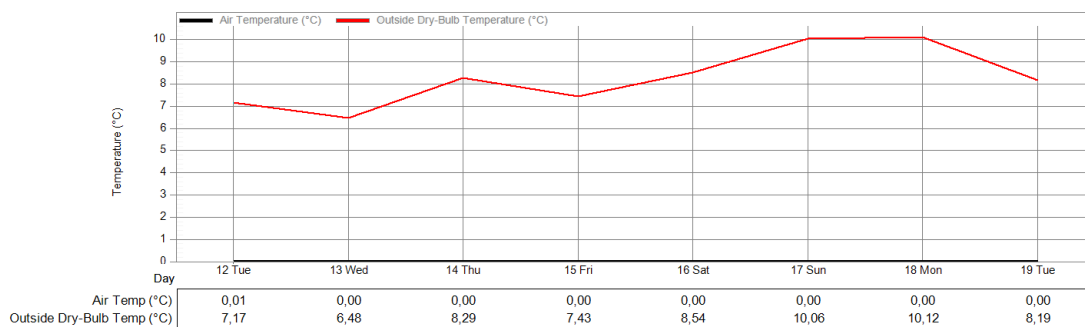


Figura 4.40 - Valores de temperatura da câmara 2 (azul claro) e de bolbo seco do exterior (azul escuro) no DB.

O balanço energético no interior da câmara 1 e da câmara 2 são apresentados nas Figuras 4.41 e 4.42, respetivamente.

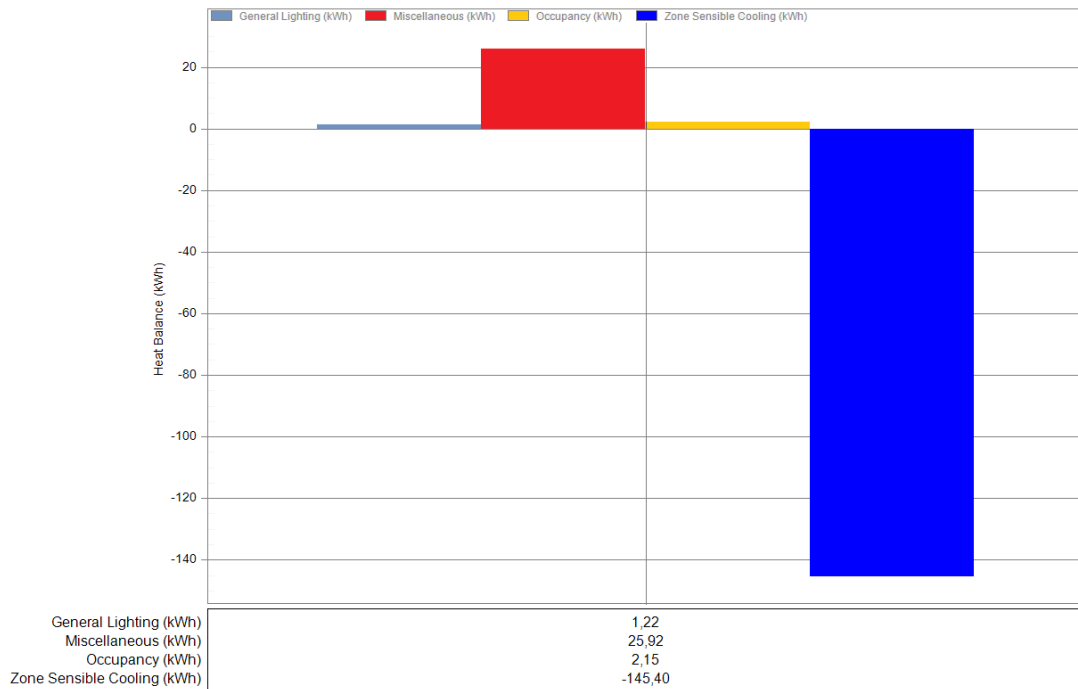


Figura 4.41 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 1, numa semana.

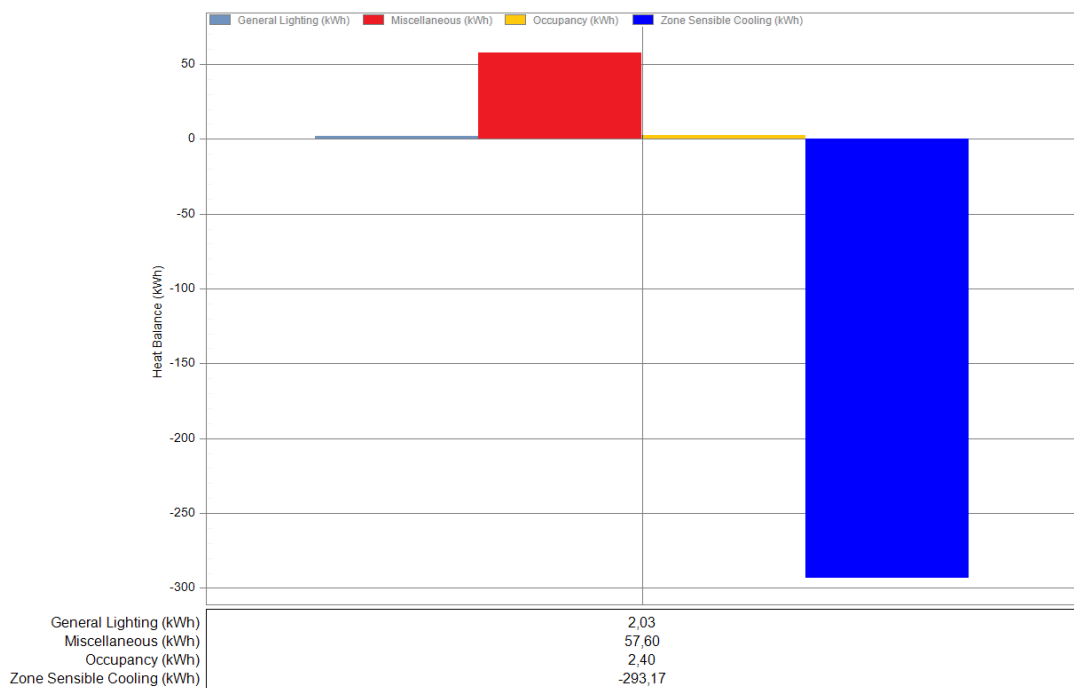


Figura 4.42 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 2, numa semana.

Analisando as duas Figuras anteriores, verifica-se que nas câmaras 1 e 2 as cargas térmicas, relativas à iluminação, carga térmica e latente dos produtos e ocupação, representam 20,1 % e 21,2 %, respetivamente, da energia utilizada em refrigeração para suprimir estes ganhos térmicos. A restante quantidade de energia da refrigeração serve para anular os ganhos térmicos por transmissão de calor pelos elementos construtivos das câmaras e das

infiltrações. As Figuras 4.43 e 4.44 revelam que é pelo chão que ocorrem maiores ganhos térmicos, 59,06 kWh na câmara 1 e 132 kWh na câmara 2.

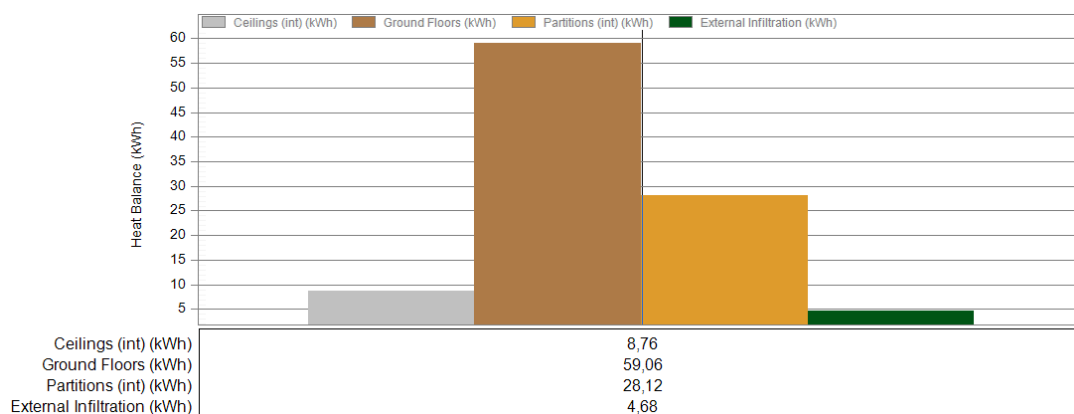


Figura 4.43 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, numa semana.

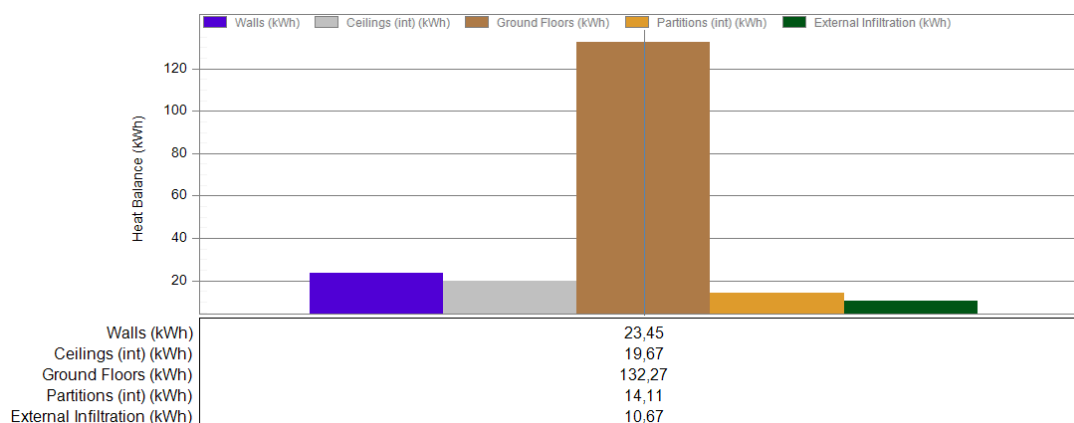


Figura 4.44 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 2, numa semana.

Em relação às trocas de calor que ocorrem pelos elementos construtivos de todo o edifício, é pelo chão que ocorrem os maiores ganhos térmicos (394,76 kWh), uma vez que o chão ocupa uma extensa área, face aos restantes elementos, e porque os ganhos térmicos pelo chão são puramente por condução. Verifica-se, também, que pela cobertura e pelas paredes do edifício é libertada uma quantidade significativa de energia para o exterior, Figura 4.45, devido ao facto de as temperaturas no interior do edifício serem superiores às temperaturas exteriores, e, como o fluxo de calor se desloca no sentido decrescente das temperaturas, estes elementos libertam calor para o exterior, no período da simulação, Figura 4.46.

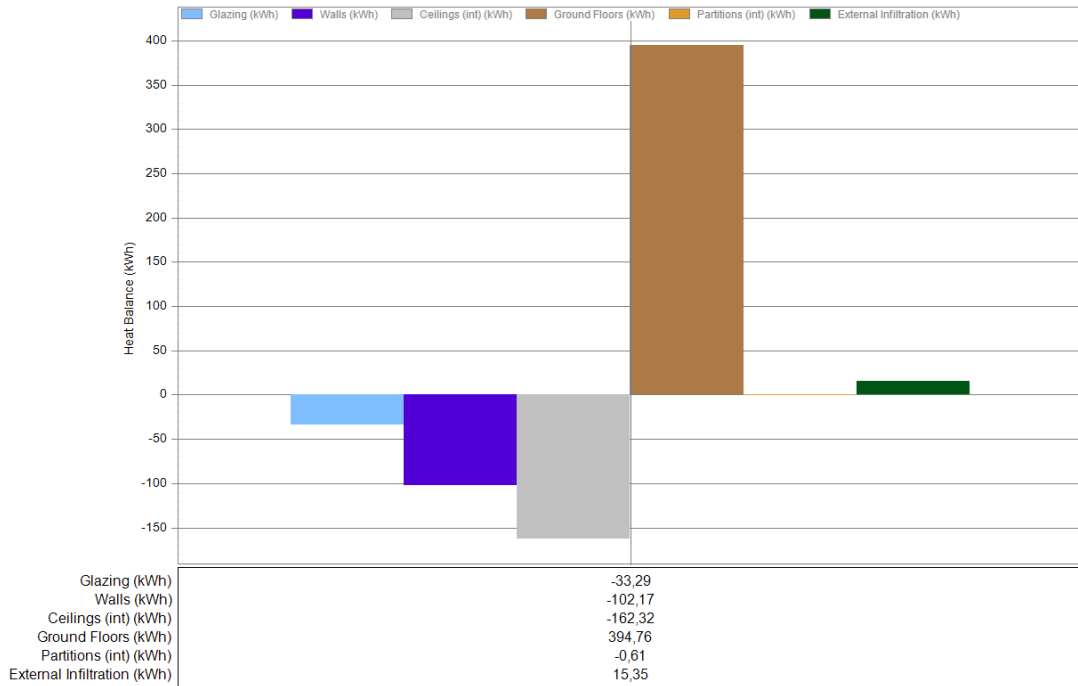


Figura 4.45 - Trocas de calor através dos elementos construtivos do edifício do caso B, numa semana.

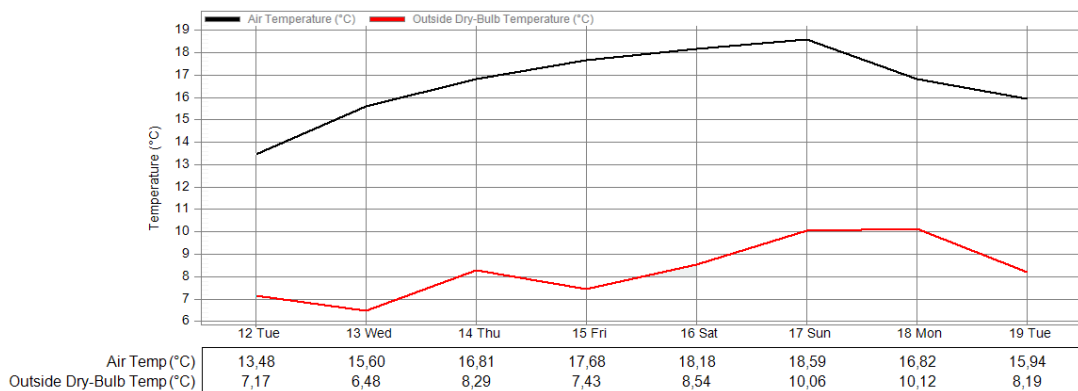


Figura 4.46 - Temperatura na zona “Diversos” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho).

Outro ponto em análise é a temperatura na zona do desvão por cima das câmaras, uma vez que este espaço é por norma um espaço confinado e, como tal, verificam-se temperaturas bastante superiores às temperaturas das câmaras e à temperatura exterior. A Figura 4.47 revela que na empresa do caso B as temperaturas no desvão são quase sempre inferiores às temperaturas do exterior, contudo, é necessário ter atenção que o período da simulação é uma época fria.

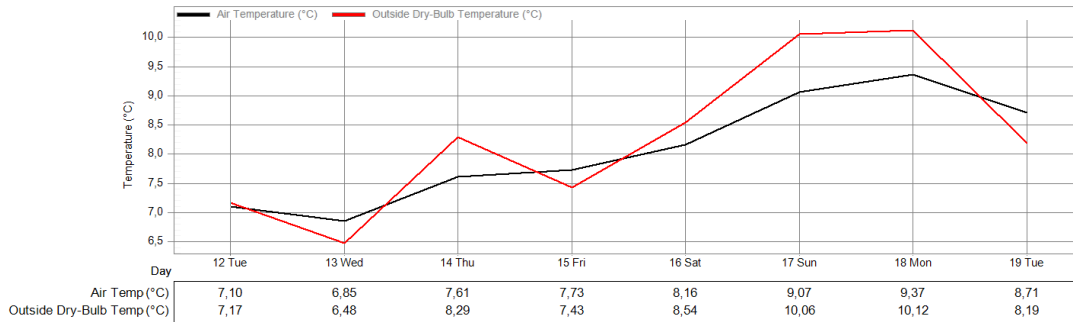


Figura 4.47 - Temperatura no desvão na “Zona das câmaras” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho)

Após a simulação do desempenho energético das câmaras da empresa do caso B vão-se implementar algumas alterações nos elementos construtivos da empresa e analisar os resultados obtidos com as alterações face aos resultados da simulação com os dados reais.

4.2.3 Potencial de melhoria

A empresa do caso B, comparativamente à empresa do caso A, apresenta elementos construtivos com excelentes condições de isolamento térmico e corretamente dimensionados, deste modo, as melhorias a testar para esta empresa são poucas, comparadas com a empresa anterior.

O primeiro caso testado consistiu no melhoramento do chão das câmaras, para tal, colocou-se uma placa de poliestireno extrudido com 80 mm de espessura ($U = 0,254 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Com esta alteração, os resultados apresentam uma diminuição no consumo total de energia de 8,5 % face ao valor obtido na simulação, ou seja, para o mesmo período de tempo consumiram-se menos 113 kWh. Com esta alteração houve uma diminuição nos ganhos térmicos na câmara 1 e na câmara 2 de 62,0 % e 61,9 %, respetivamente.

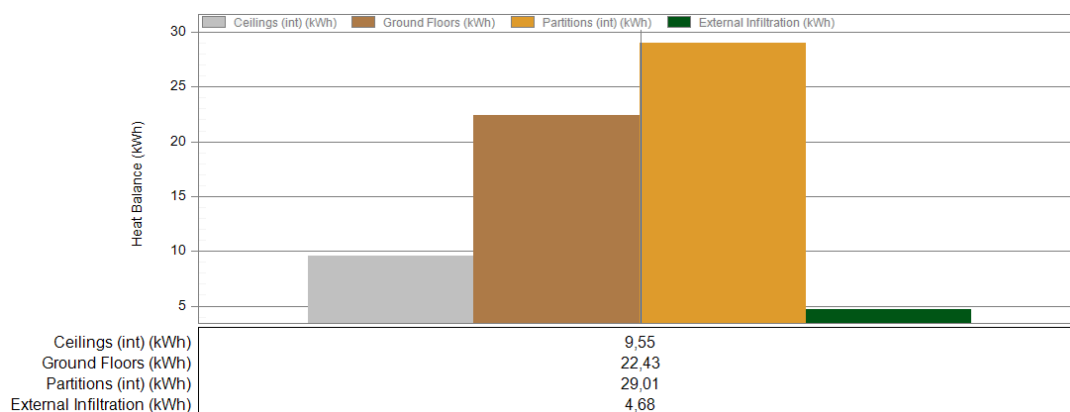


Figura 4.48 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 1.

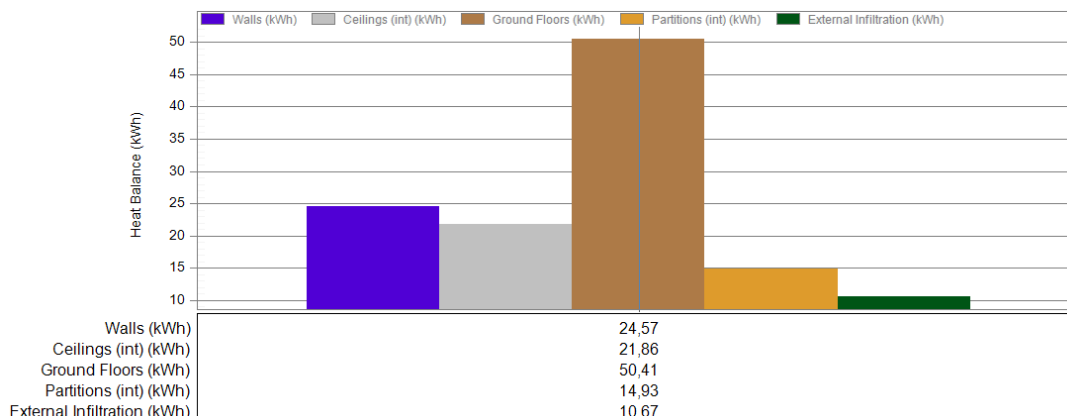


Figura 4.49 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2.

A segunda simulação consistiu no aumento do painel sandwich das paredes da câmara 2 que estão próximas às paredes do edifício, visto que estas estão orientadas a sul e a oeste. Para tal, substituiu-se o painel sandwich com 80 mm de espessura por painel sandwich com 100 mm de espessura ($U = 0,190 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Com esta alteração o consumo diminuiu em 0,3 %, ou seja, consumiram-se menos 4 kWh. Relativamente aos ganhos térmicos que ocorrem pelas paredes houve uma diminuição de 13,6 %, ou seja, menos 3,18 kWh.

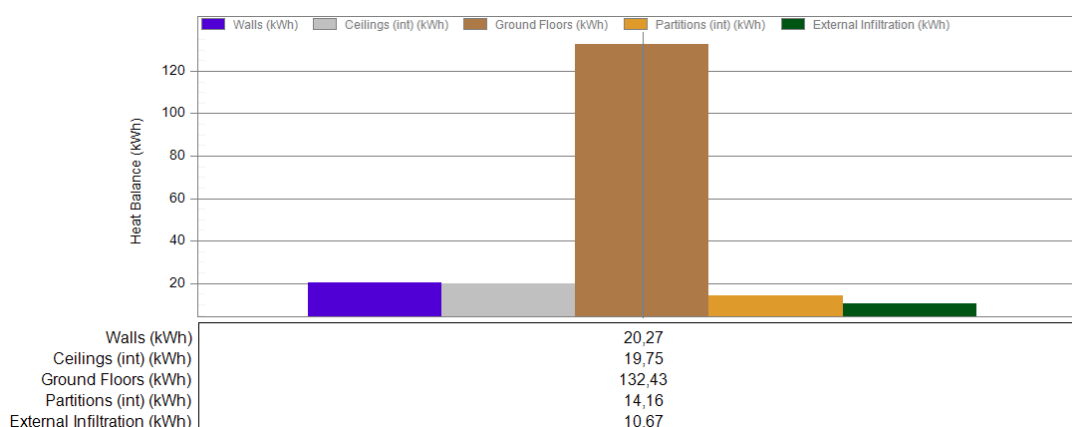


Figura 4.50 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes da câmara 2.

Por fim, realizou-se um estudo em que se considerou as duas melhorias acima referidas, ou seja, simulou-se o desempenho energético das câmaras quando melhorados os seus chãos e as paredes da câmara 2. Os resultados demonstram um decréscimo no consumo de energia elétrica de 8,8 %, comparativamente à simulação inicial, em termos quantitativos essa diferença foi de 116 kWh.

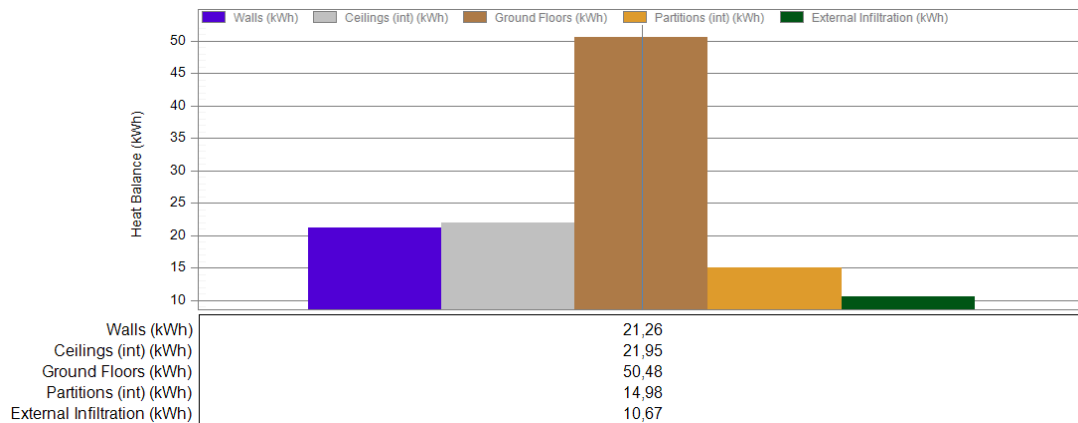


Figura 4.51 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão e das paredes da câmara 2.

4.3 Caso C

A empresa em estudo no caso C é uma microempresa que emprega 7 colaboradores fixos com um horário de funcionamento das 8 horas às 17 horas e 30 minutos, de segunda a sexta. Localizada no concelho da Castelo Branco, distrito de Castelo Branco, iniciou a sua atividade em 2007, e dedica-se à indústria do leite e derivados (CAE 10510).

O edifício abrange uma área coberta de aproximadamente 900 m², têm a fachada principal ligeiramente orientada a este, possui um pé-direito mínimo de 3,2 metros e um máximo é de 4,2 metros. Na sua envolvente não existem quaisquer edifícios ou arvoredos que provoquem sombreamento.



Figura 4.52 - Perspetiva da fachada da empresa C

4.3.1 Modelação do caso C

Com auxílio de uma planta cedida pelos funcionários da empresa em questão, modelou-se o edifício da empresa do caso C no DesignBuilder, Figura 4.53.

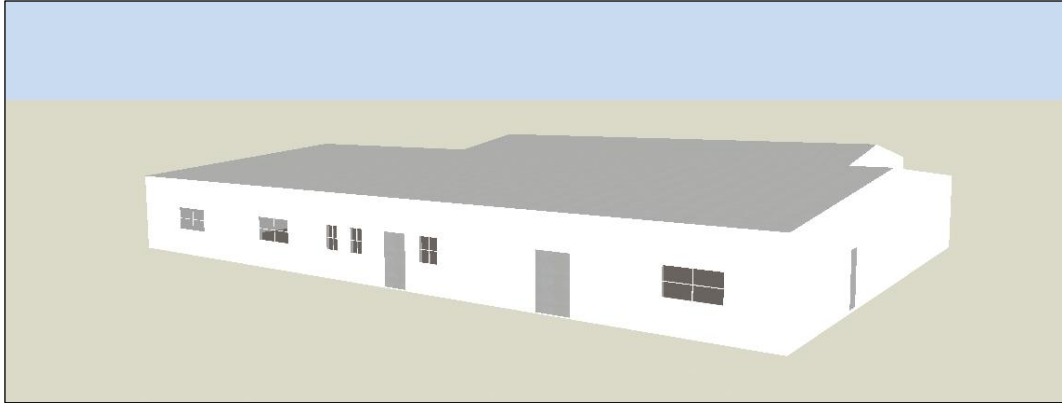


Figura 4.53 - Perspetiva da fachada da empresa C modelada no DesignBuilder

Por questões de simplicidade, o edifício está dividido em duas zonas: “diversos” e “zona das câmaras”. As câmaras 1, 2 e 3 têm 153 m^3 ($10 \text{ m} \times 5,1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$), 153 m^3 ($10 \text{ m} \times 5,1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) e 124 m^3 ($7,4 \text{ m} \times 5,6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) de volume, respetivamente.

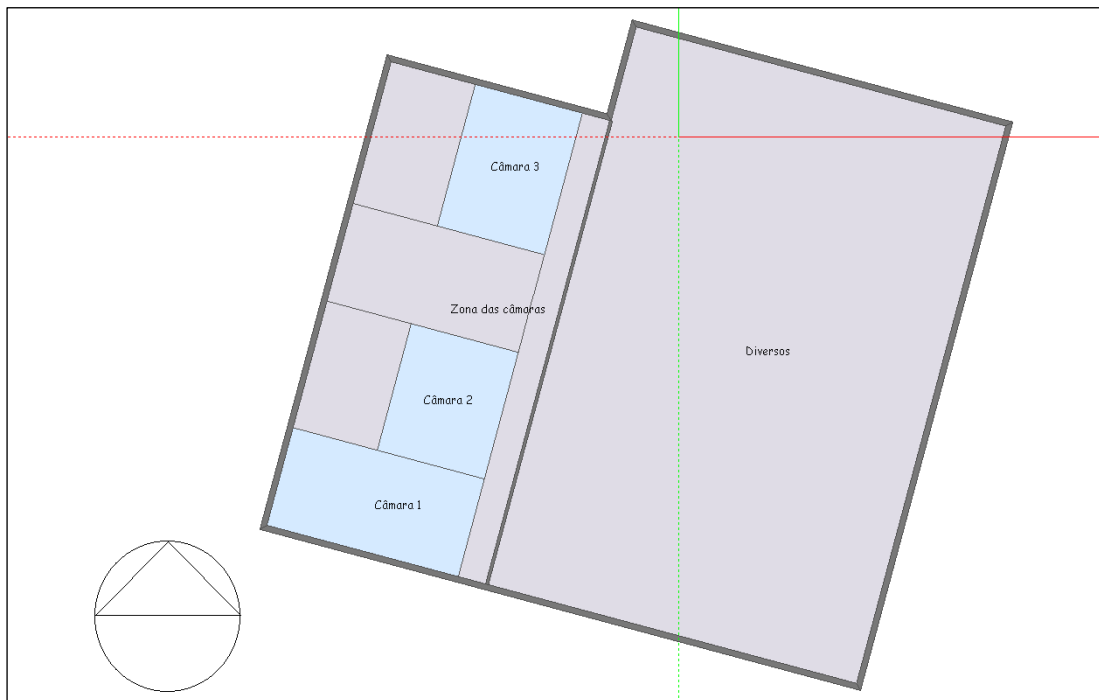


Figura 4.54 - Planta da modelação da empresa do caso C

À semelhança do que foi realizado para os casos anteriores, apresenta-se em seguida, a constituição dos elementos construtivos do edifício e das câmaras 1, 2 e 3.

4.3.1.1 Elementos construtivos

Em termos estruturais, o edifício apresenta-se em bom estado de preservação, devidamente isolado termicamente. Os elementos construtivos do edifício e das câmaras 1, 2 e 3 são descritos nas Tabelas 4.12 e 4.13, respetivamente.

Tabela 4.12 - Elementos construtivos do edifício da empresa C

	Materiais constituintes	Espessura (mm)	U (W/m ² ·K)
Paredes exteriores	Chapa de aço	2	0,562
	Caixa-de-ar	20	
	Chapa de aço	1	
	Poliuretano expandido	40	
	Chapa de aço	1	
Cobertura	Chapa de aço	2	7,141
Chão	Resina epóxi	2	0,680
	Betão	200	
Paredes, teto e portas (interiores)	Chapa de aço	1	0,626
	Poliuretano expandido	40	
	Chapa de aço	1	
Portas (exteriores)	Chapa de aço	3	2,438
	Caixa-de-ar	10	
	Chapa de aço	3	
Janelas	Vidro simples	4	5,871

Tabela 4.13 - Elementos construtivos das câmaras 1, 2 e 3 da empresa C

	Materiais constituintes	Espessura (mm)	U (W/m ² ·K)
Paredes e teto	Chapa de aço	1	0,330
	Poliuretano expandido	80	
	Chapa de aço	1	
Chão	Resina epóxi	2	0,680
	Betão	200	
Portas	Chapa de aço	1	0,432
	Poliuretano expandido	60	
	Chapa de aço	1	

Depois de descritos os elementos construtivos referentes ao edifício e às câmaras, descreve-se, em seguida, os parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras da empresa C.

4.3.1.2 Parâmetros de caracterização das diferentes zonas

Os parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras da empresa do caso C, são descritos na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Parâmetros de caracterização das diferentes zonas da empresa do caso C.

	Densidade de Ocupação (pessoas/m ²)	Ganhos de equipamentos (W/m ²)	Ganhos da iluminação (W/m ²)	Atividade metabólica (W/pessoa)	Temperatura (°C)
Diversos	0,015	7	1	180	-
Zona das câmaras	0,040	5	1	180	-
Câmara 1	0,020	0	2	180	5
Câmara 2	0,020	0	2	180	12
Câmara 3	0,020	0	2	180	6

As lâmpadas utilizadas na empresa C são do tipo fluorescente, deste modo, o tipo de luminária definida foi “*Surface Mount*” referida na Tabela 3.2. Por sua vez, a atividade metabólica considerada para cada uma das zonas definidas e das câmaras é “trabalho manual (ligeiro)”, sendo que o valor que lhe é atribuído foi anteriormente mencionado na Tabela 3.1. As temperaturas verificadas na zona “Diversos” e na “Zona das câmaras” não são controladas, e oscilam em função das condições climáticas exteriores. Por outro lado, como as câmaras 1, 2 e 3 são utilizadas para a secagem, cura e conservação dos produtos lácteos e seus derivados, respetivamente, é necessário que haja um controlo rigoroso da temperatura no interior das mesmas.

À semelhança do que foi realizado nos casos anteriores foram utilizadas as equações 2.6 e 2.8 para calcular a carga térmica e latente dos produtos. Na Tabela 4.15 são apresentados os dados necessários para o cálculo da carga térmica e latente dos mesmos, assim como, os valores obtidos.

Tabela 4.15 - Dados utilizados no cálculo da carga térmica e latente dos produtos, para as câmaras 1, 2 e 3, caso C.

	c (kJ/kg · K)	m (kg)	\dot{m} (kg/s)	ΔT (K)	h_1 (kJ/kg)	\dot{Q}_{prod} (W)	\dot{Q}_L (W)	\dot{Q}_{total} (W)	\dot{Q}_{total}/A (W/m ²)
Câmara 1	3160	250.000	0,008	5	180	125	1400	1525	30
Câmara 2	3160	250.000	0,008	-5	180	-125	1400	1275	26
Câmara 3	3160	250.000	0,008	6	180	125	1400	1525	38

O calor específico e a entalpia de vaporização do queijo foram retirados de ASHRAE (2006c). A produção de queijo anual foi de sensivelmente 250.000 kg. A taxa de produto refrigerado foi obtida através do quociente entre a quantidade de queijo produzido anualmente, pelo

respetivo tempo (em segundos). A diferença entre a temperatura de entrada do produto e a temperatura pretendida foi indicada pelos colaboradores, sendo que para a câmara 2 o produto entra com uma temperatura inferior à pretendida. Os valores de \dot{Q}_{total} foram arredondados à unidade e resultam do somatório da carga dos produtos com a carga latente dos mesmos. A carga térmica e latente dos produtos foram considerados no DesignBuilder como um equipamento que utiliza calor rejeitado, para tal, no menu “Activity”, selecionou “miscellaneous” com os ganhos totalmente convectivos e o valor dos ganhos considerados para a câmara 1, 2 e 3 foi 30, 26 e 38 W/m² respetivamente.

Por outro lado, o cálculo da carga térmicas por infiltrações carece de dados que nem sempre são precisos e totalmente corretos. Parte dos valores apresentados na Tabela 4.6 foram indicados pelos colaboradores da empresa sendo que estes são uma estimativa do que de facto acontece. O cálculo da carga térmica das infiltrações teve por base as equações 2.12, 2.13 e 2.14, assim como, alguns dados retirados da Figura 2.5 e Tabela 2.4.

Tabela 4.16 - Dados utilizados para o cálculo da carga térmica por infiltrações (\dot{Q}_{inf}), das câmara 1 e 2.

	L (m)	H (m)	\dot{Q}_s/A (W/m ²)	R_s	P	θ_p (s)	θ_o (min)	\dot{Q} (kW)	D_t	D_f	ϵ	\dot{Q}_{inf} (kW)	\dot{Q}_{inf}/A (W/m ²)
Câmara 1	2	2	2500	0,87	1	5	1	9,5	0,43	0,80	0	1,6	31
Câmara 2	2	2	500	0,87	1	5	1	2,0	0,43	0,80	0	0,5	10
Câmara 3	2	2	2000	0,87	1	5	1	7,5	0,43	0,80	0	1,3	32

Para o cálculo das infiltrações através da abertura da porta assumiu-se uma passagem por hora, com um tempo de abertura de cinco segundos. O tempo estimado que a porta esteve aberta é de sessenta segundos. O fator de caudal de ar na porta (D_f) selecionado foi de 0,80 segundo ASHRAE (2006b). A eficácia dos dispositivos de proteção (ϵ) é zero porque não existe proteção contra as trocas de ar.

Relativamente aos períodos de ocupação diária e aos horários de ocupação anual, definidos para a zona “Diversos”, “Zona das câmaras” e para as câmaras 1 e 2 são apresentados nas Figuras 4.32 a 4.37. Do mesmo modo dos casos anteriores, estes gráficos foram definidos em função das indicações dos colaboradores da empresa, tentado recriar os períodos de ocupação e as taxas de ocupação que ocorrem com maior frequência, contudo, existe sempre uma diferença entre os períodos definidos para a simulação e o que ocorre na realidade.

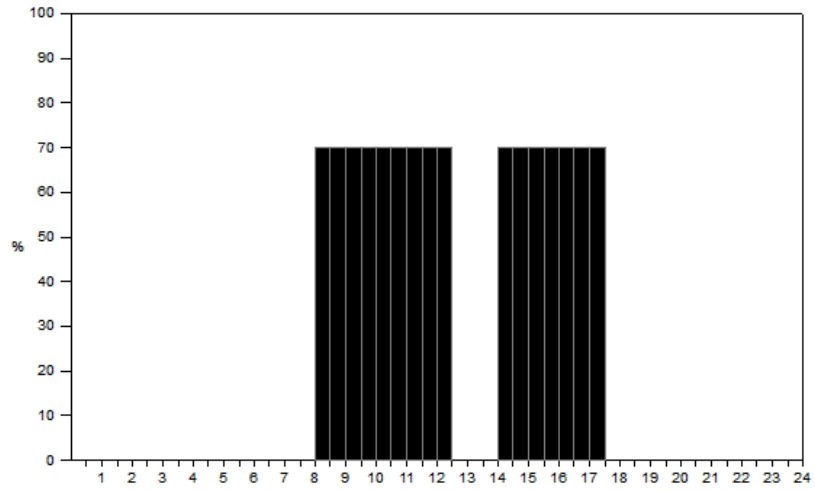


Figura 4.55 - Período de ocupação diária definido da zona “Diversos”

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Feb	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Mar	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Apr	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
May	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Jun	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Jul	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Aug	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Sep	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Oct	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Nov	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off
Dec	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Diversos	Off	Off

Figura 4.56 - Horário de ocupação anual definido para a zona “Diversos”

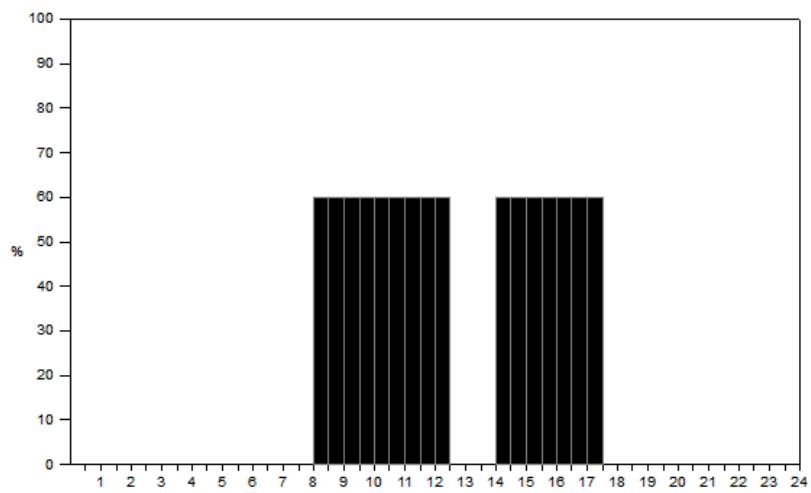


Figura 4.57 - Período de ocupação diária definido da “Zona das câmaras”

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Feb	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Mar	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Apr	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
May	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Jun	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Jul	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Aug	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Sep	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Oct	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Nov	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off
Dec	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Zona das câmaras	Off	Off

Figura 4.58 - Horário de ocupação anual definido para a “Zona das câmaras”

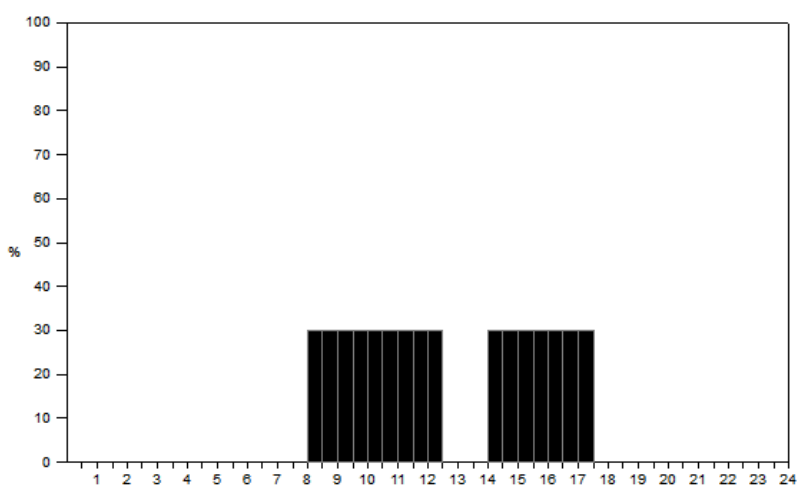


Figura 4.59 - Período de ocupação diária definido para as câmaras 1, 2 e 3

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Feb	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Mar	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Apr	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
May	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Jun	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Jul	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Aug	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Sep	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Oct	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Nov	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off
Dec	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Câmaras	Off	Off

Figura 4.60 - Horário de ocupação anual definido para as câmaras 1, 2 e 3

Quanto ao período de funcionamento dos equipamentos, este obedece ao período de ocupação dessa zona, com exceção do sistema de refrigeração que opera constantemente.

Após a descrição dos parâmetros que caracterizam as diferentes zonas e as câmaras da empresa do caso C, estão descritos todos os dados necessários para a simulação da empresa em questão. No subcapítulo seguinte, são apresentados os resultados da simulação feita para um intervalo de tempo entre 1 de janeiro e 31 de dezembro.

4.3.2 Análise e discussão dos resultados

À semelhança dos subcapítulos anteriores, 4.1.2 e 4.2.2, este subcapítulo apresenta a análise e a discussão dos resultados obtidos na simulação realizada para o caso descrito no subcapítulo anterior.

O consumo de energia real da empresa do caso C registado durante o período da auditoria energética foi de 47,8 MWh, enquanto o consumo de energia segundo a simulação foi de 50,6 MWh, uma diferença de 5,9 %. Quer para o caso real, quer para a simulação, o consumo por parte da refrigeração vai de encontro ao que é referido por Lekov *et al.* (2009), ou seja, no caso real e na simulação o consumo de energia pelo sistema de refrigeração foi de 85,6 % e 83,8 %, respetivamente.

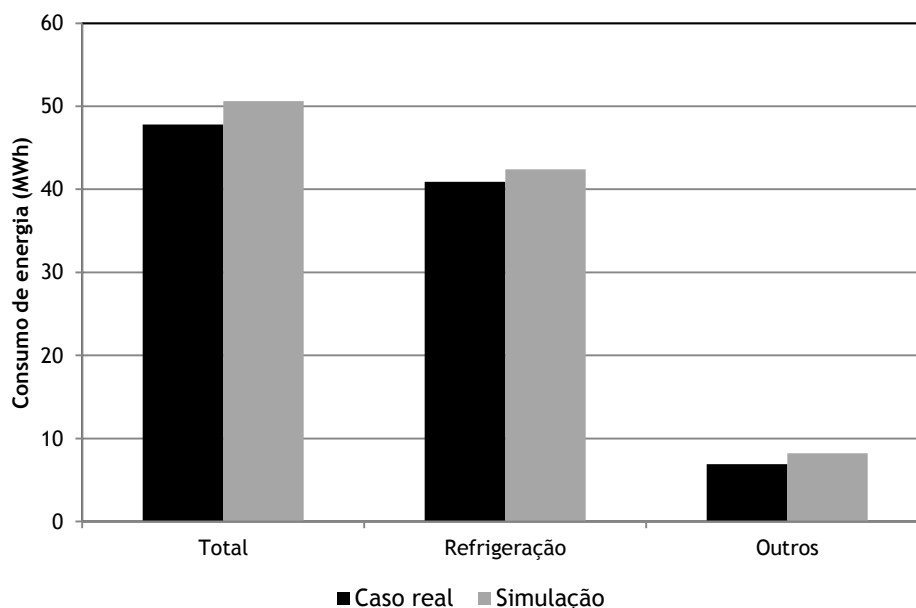


Figura 4.61 - Comparação do consumo de energia, total e parcial, do caso real e da simulação, durante a auditoria.

Por outro lado, as temperaturas verificadas no interior das câmaras 1, 2 e 3 durante a simulação são apresentados nas Figuras 4.62, 4.63 e 4.64, respetivamente.

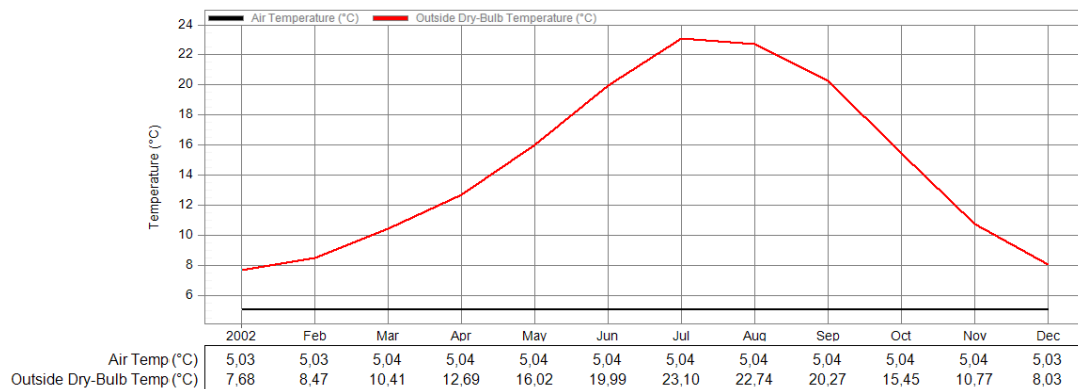


Figura 4.62 - Valores médios mensais da temperatura da câmara 1 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.

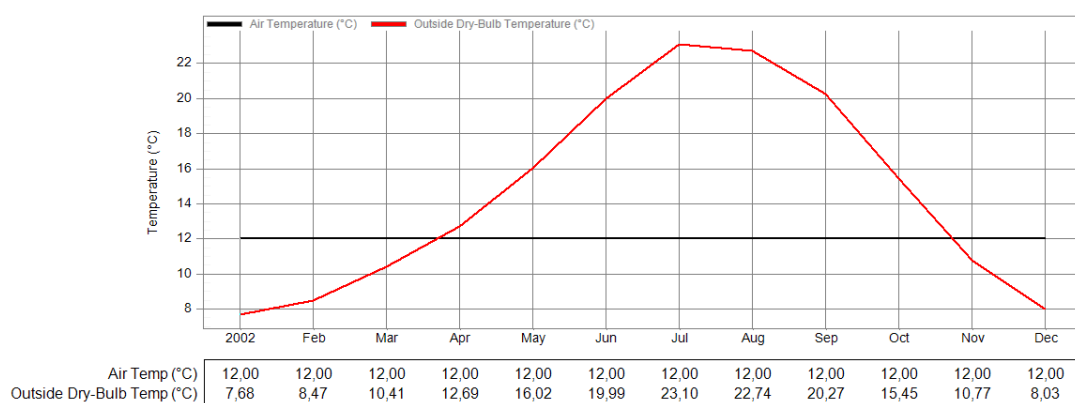


Figura 4.63 - Valores médios mensais da temperatura da câmara 2 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.

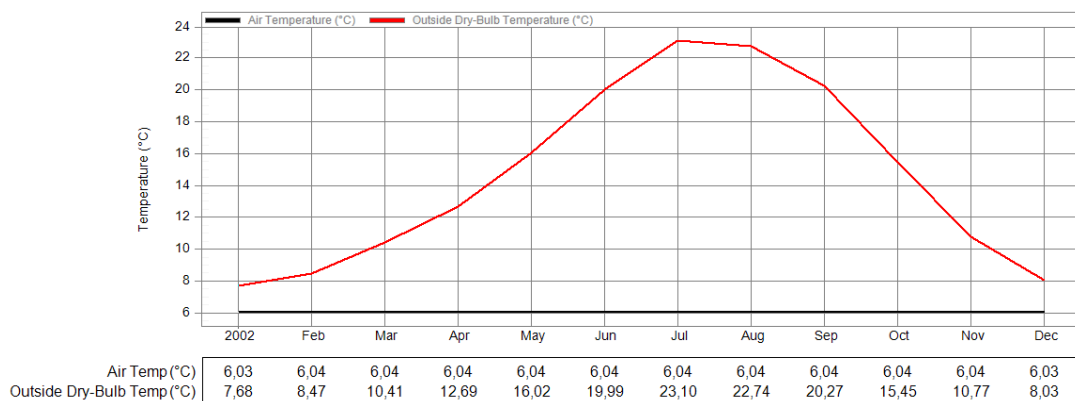


Figura 4.64 - Valores médios mensais da temperatura da câmara 3 (preto) e de bolbo seco do exterior (vermelho) no DB.

O balanço energético no interior da câmara 1, câmara 2 e câmara 3 são apresentados nas Figuras 4.65, 4.66 e 4.67, respetivamente, verificando que nas câmaras 1, 2 e 3 as cargas térmicas relativas à iluminação, carga térmica e latente dos produtos e ocupação representam 3,2 %, 7,6 % e 3,4 %, respetivamente, da energia utilizada em refrigeração para suprimir estes ganhos térmicos. A restante quantidade de energia da refrigeração serve para anular os ganhos térmicos por transmissão de calor pelos elementos construtivos das câmaras

e das infiltrações. Na câmara 2 existe a necessidade de em alguns dias aquecer a câmara para garantir a temperatura pretendida.

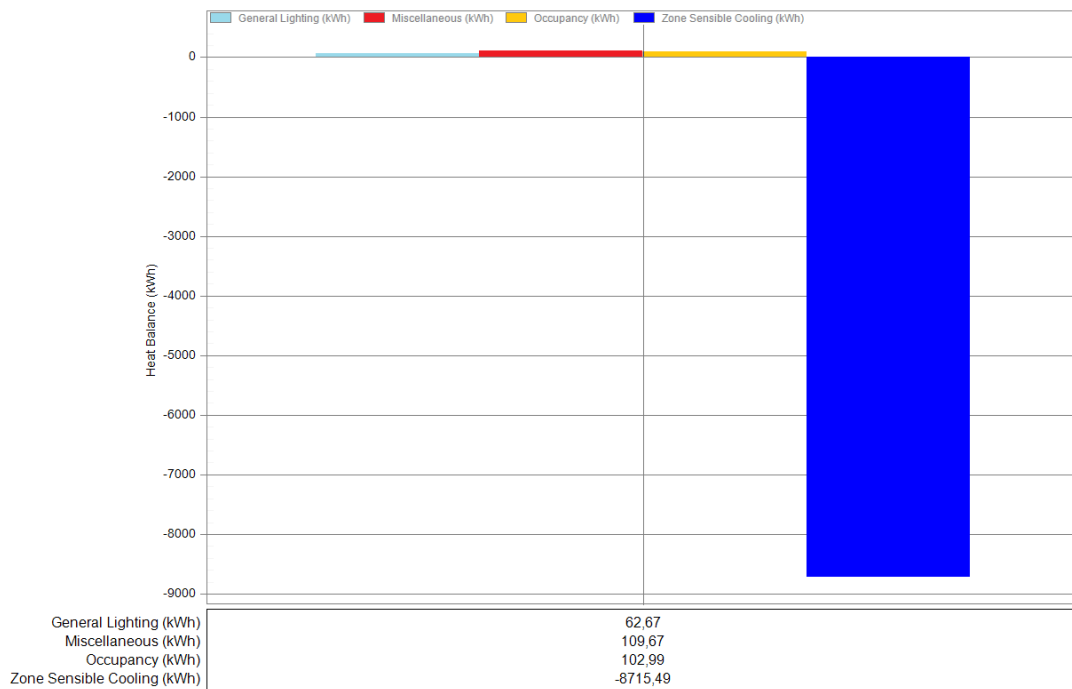


Figura 4.65 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 1, num ano.

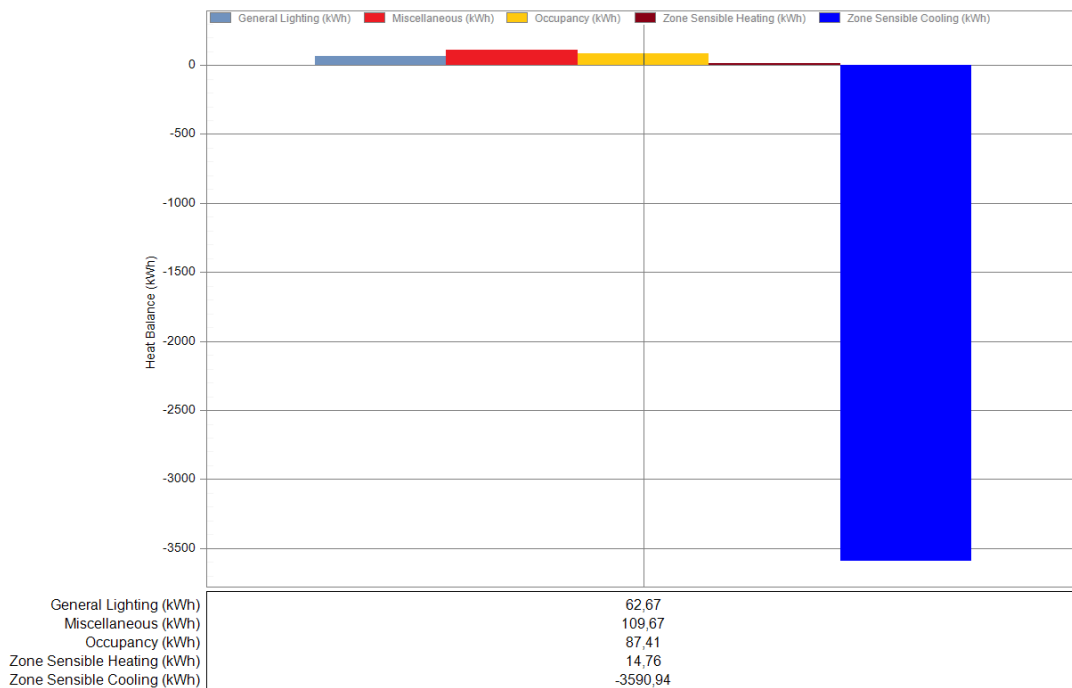


Figura 4.66 - Cargas internas registados pelo DesignBuilder para a câmara 2, num ano.

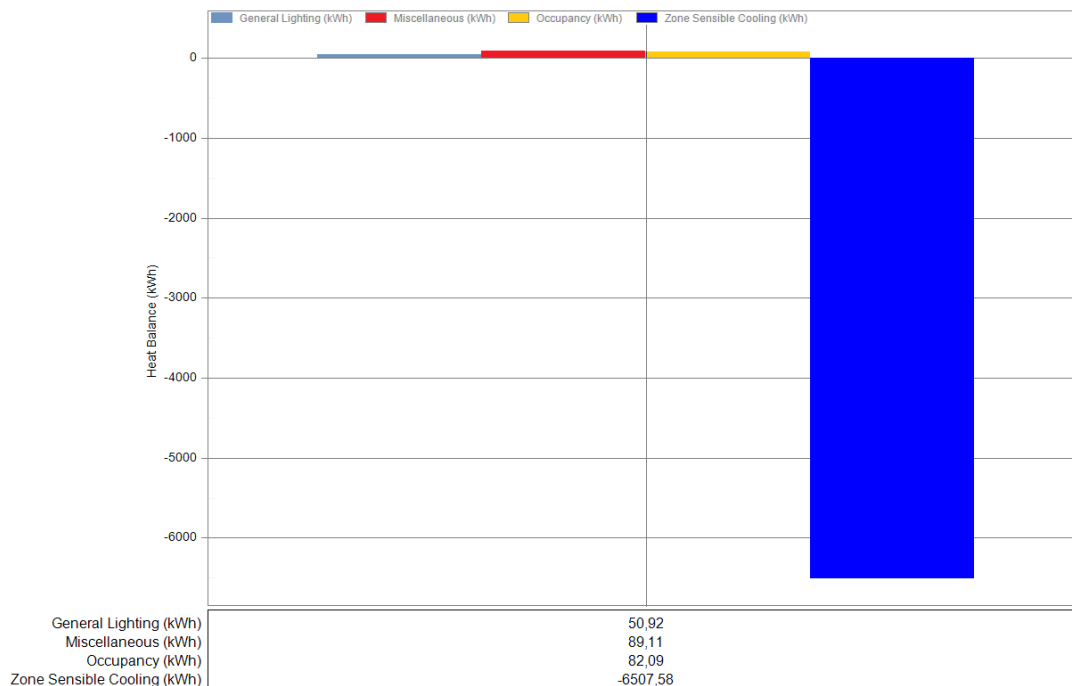


Figura 4.67 - Cargas internas registrados pelo DesignBuilder para a câmara 3, num ano.

As Figuras 4.68, 4.69 e 4.70 apresentam os ganhos térmicos anuais por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações na câmara 1, 2 e 3, respetivamente, e revelam um perfil semelhante dos ganhos térmicos nas três câmaras, contudo, os valores diferem devido à diferença da área das câmaras e das temperaturas impostas nas mesmas. Para as três câmaras o chão é o elemento por onde ocorrem os maiores ganhos térmicos, 3547,50 kWh na câmara 1, 1599,47 kWh na câmara 2 e 2654,74 kWh na câmara 3. Apesar de a câmara 1 e a câmara 2 terem a mesma área, 51 m², os ganhos térmicos na câmara 1 são maiores que na câmara 2, uma vez que a câmara 1 apresenta um maior gradiente térmico entre a temperatura da câmara e a temperatura no solo, que a câmara 2.

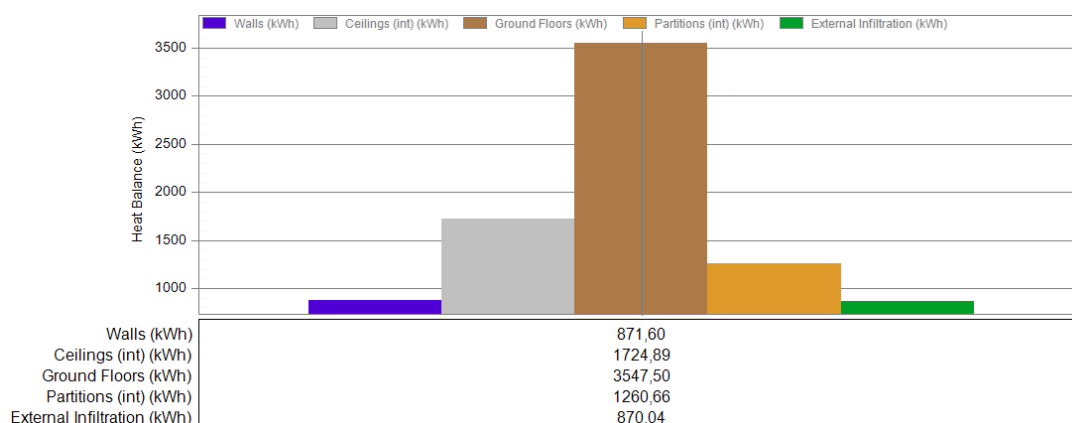


Figura 4.68 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 1, num ano.

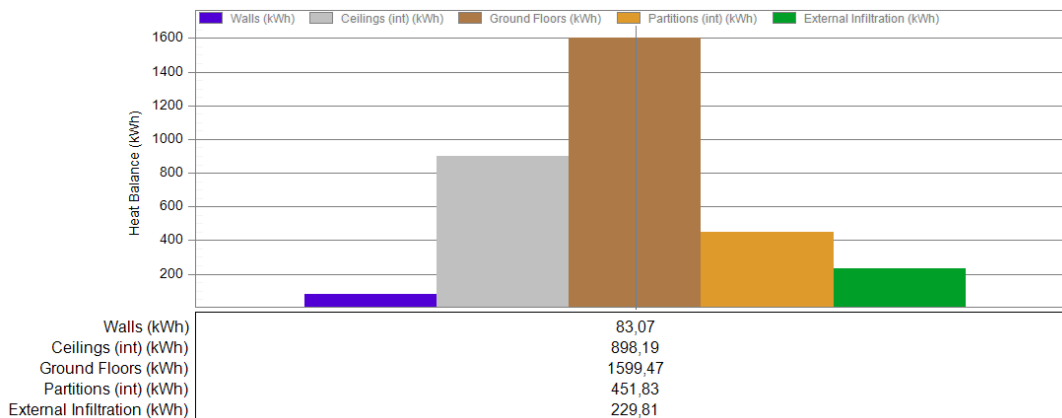


Figura 4.69 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 2, num ano.

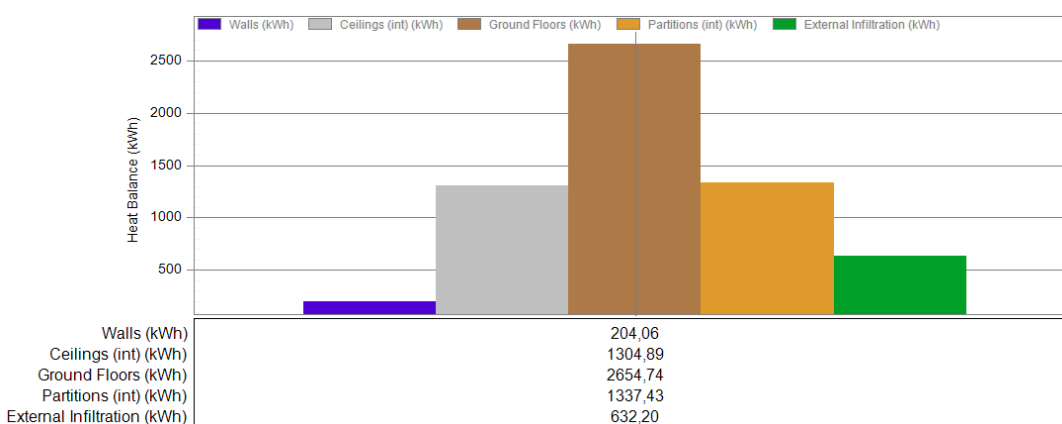


Figura 4.70 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, na câmara 3, num ano.

Por outro lado, a temperatura na zona do desvão por cima das câmaras é um critério a ter atenção, visto que este espaço é por norma um espaço confinado e, como tal, verificam-se temperaturas bastante superiores às temperaturas das câmaras e à temperatura exterior. A Figura 4.71 revela que na empresa do caso C as temperaturas no desvão na época de verão chega a atingir diferenças de temperatura superiores a 6 °C.

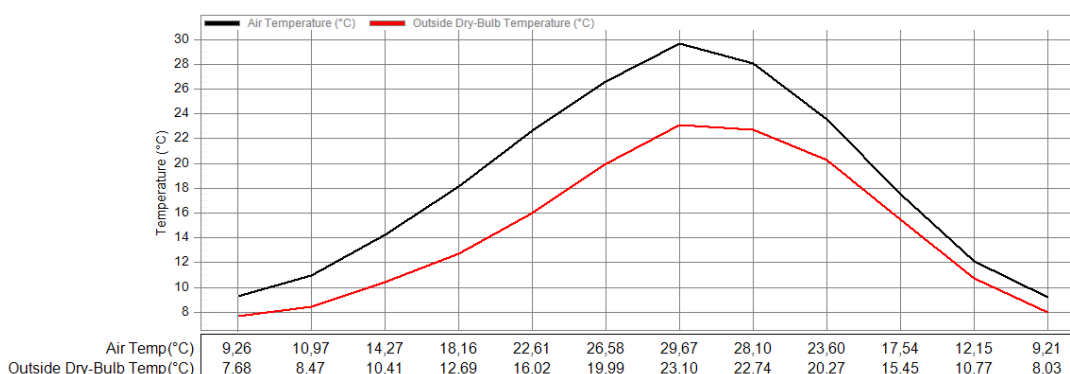


Figura 4.71 - Temperatura médias mensais no desvão na “Zona das câmaras” (preto) e de bolbo seco do ar exterior (vermelho)

Após a simulação do desempenho energético das câmaras da empresa do caso C e o levantamento dos resultados obtidos, vão-se implementar algumas alterações nos elementos construtivos da empresa e analisar os resultados obtidos com as alterações face aos resultados da simulação com os dados reais.

4.3.3 Potencial de melhoria

À semelhança dos dois casos anteriores, o chão das câmaras é o elemento construtivo por onde ocorrem maiores trocas de calor, por isso vai ser colocada uma placa de poliestireno extrudido com 80 mm de espessura ($U = 0,254 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Com esta alteração, os resultados apresentam uma diminuição no consumo total de energia de 9,9 % face ao valor obtido na simulação, ou seja, para o mesmo período de tempo consumiram-se menos 5 MWh. Com esta melhoria deste elemento construtivo, verificou-se uma diminuição nos ganhos térmicos na câmara 1, 2 e 3 de 61,8 %, 61,1 % e 61,7 %, respetivamente

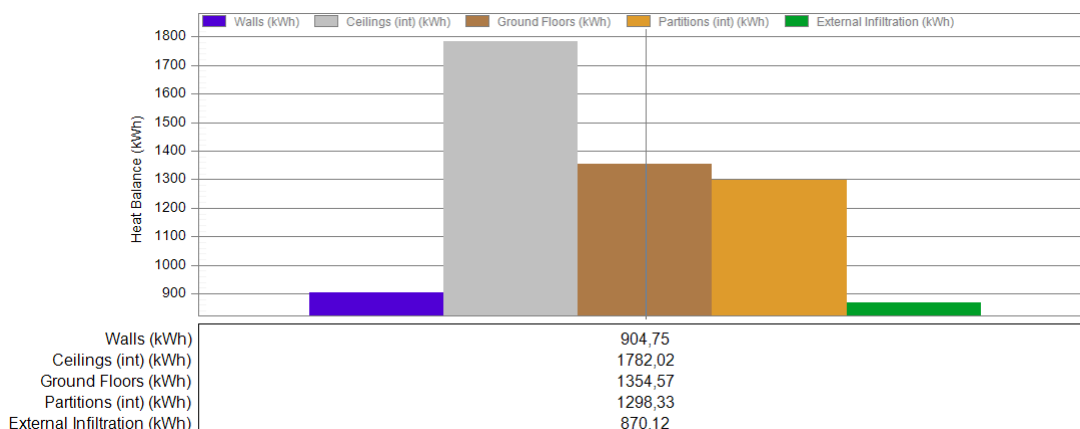


Figura 4.72 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 1, num ano.

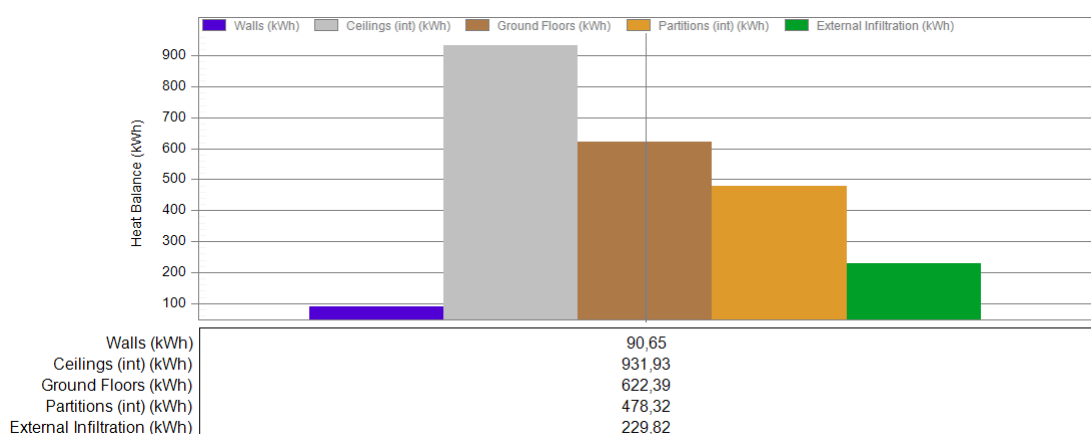


Figura 4.73 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2, num ano.

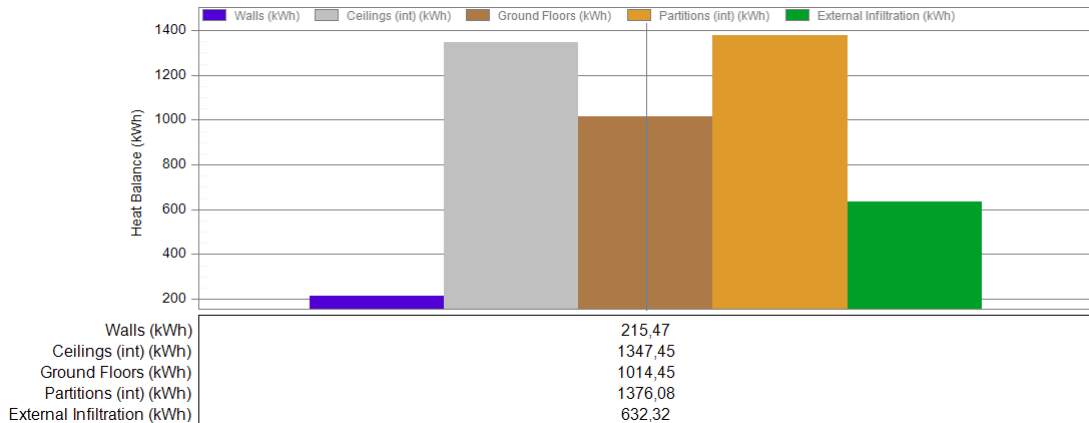


Figura 4.74 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria do chão da câmara 2, num ano.

A segunda simulação consistiu em aumentar a espessura das paredes e do teto das câmaras, para tal, substituiu-se o painel sandwich com 80 mm por um com 100 mm de espessura ($U = 0,267 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Com esta alteração consumiram-se menos 1,1 MWh, o que representa uma diminuição do consumo de energia de 2,2 %. Relativamente aos ganhos térmicos que ocorrem pelas paredes das câmaras 1, 2 e 3 houve uma diminuição de 19,3 %, 21,1 % e 18,9 %, respetivamente.

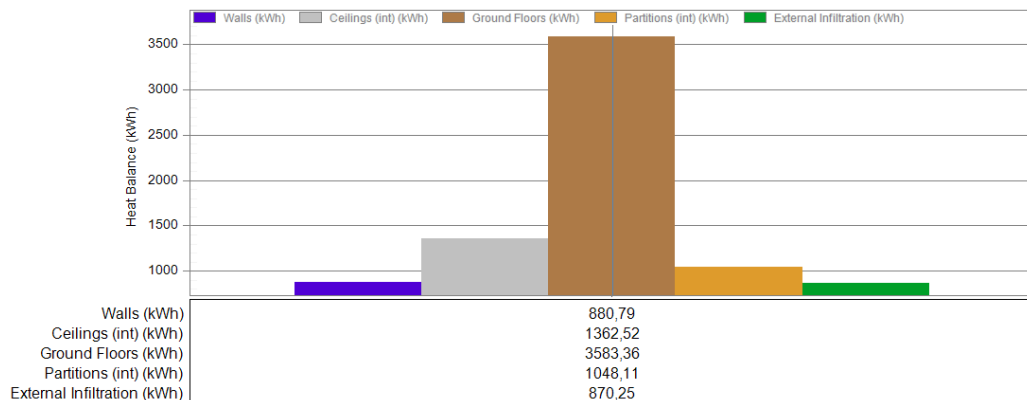


Figura 4.75 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes e do teto da câmara 1.

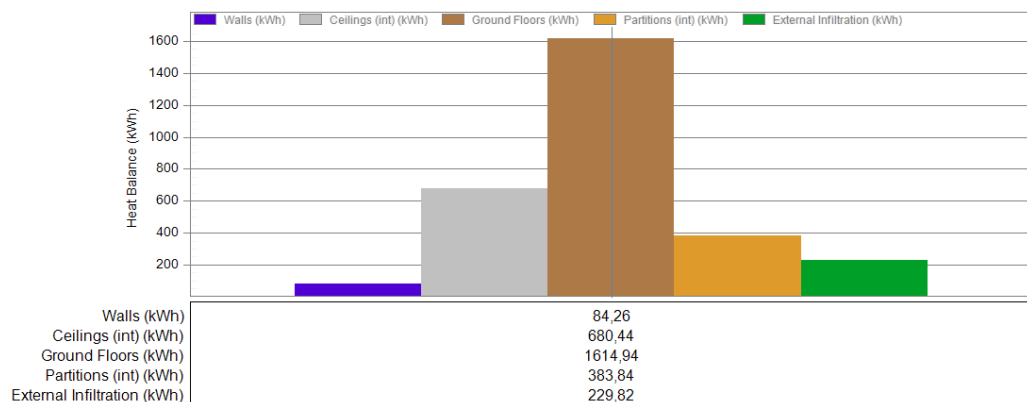


Figura 4.76 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes e do teto da câmara 2.

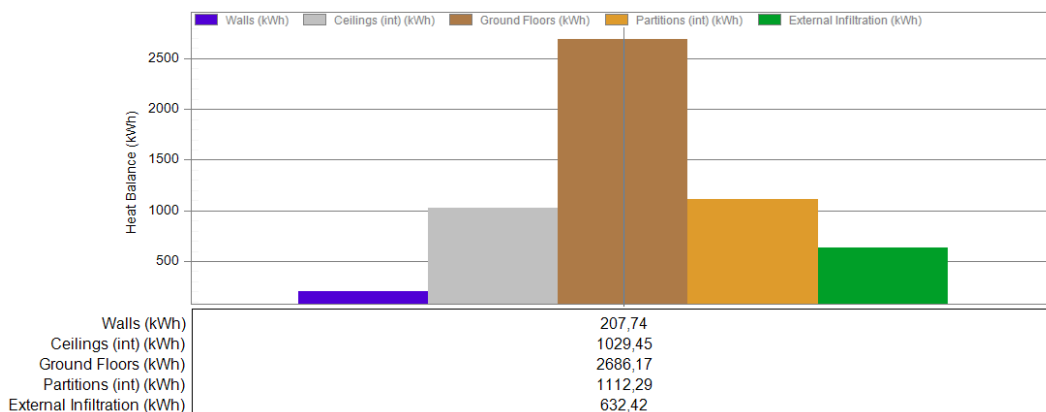


Figura 4.77 - Ganhos térmicos por transmissão de calor através dos elementos construtivos e infiltrações, após a melhoria das paredes e do teto da câmara 3.

A terceira simulação de melhoria consistiu na substituição da cobertura da “Zona das câmaras” por um painel sandwich com 40 mm de espessura ($U = 0,628 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Os resultados revelaram uma diminuição no consumo de 4,7 % face ao valor obtido na primeira simulação, ou seja, para o mesmo período de tempo consumiram-se menos 2,4 MWh. A Figura 4.78 demonstra uma diminuição significativa da temperatura no desvão, sendo que, com esta melhoria as duas temperatura ficam com valores relativamente semelhantes.

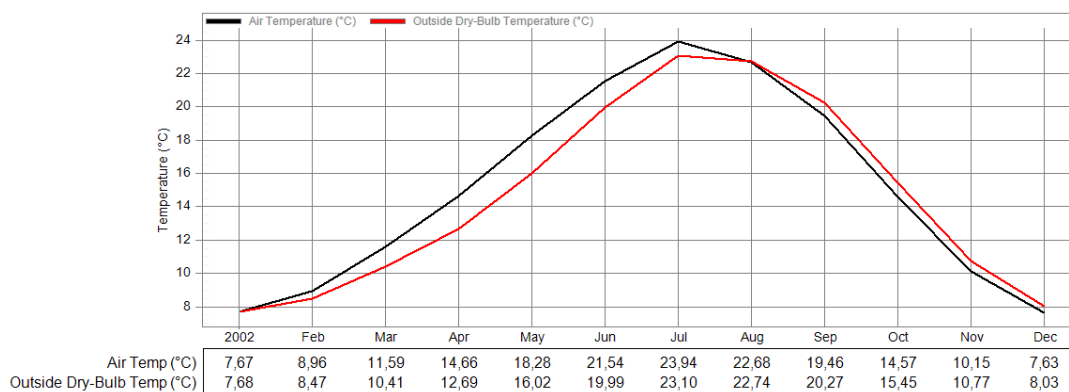


Figura 4.78 - Temperaturas médias mensais no desvão na “Zona das câmaras” após a melhoria na cobertura (preto).

Por fim, realizou-se um estudo em que se considerou todas as melhorias acima referidas, ou seja, simulou-se o desempenho energético das câmaras quando melhorados os seus chãos, as paredes e os tetos e a cobertura na “Zona das câmaras”. Os resultados demonstram um decréscimo no consumo de 15,8 % comparativamente à simulação inicial, em termos quantitativos essa diferença foi de 12,0 MWh.

4.4 Nota conclusiva

O objetivo deste capítulo foi o estudo de três casos reais e a análise e identificar dos elementos construtivos por onde se verificam as maiores cargas térmicas, bem como, apontar potenciais melhorias para a diminuição das mesmas.

Capítulo 5

Conclusão

O presente capítulo tem como objetivo recapitular os aspetos mais importantes a reter com o desenvolvimento desta dissertação e, para terminar, apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Recapitulação

Nesta dissertação foi realçada a importância dos sistemas de frio industrial, uma vez que estes ajudam a prevenir e retardar a deterioração dos produtos alimentares que consumimos diariamente, porém, é necessário atender que estes sistemas são grandes consumidores de energia, como foi comprovado para dois dos casos estudados (A e C). Como tal, é imperativo minimizar o consumo destes equipamentos, sendo que a melhoria dos elementos construtivos das câmaras é uma das melhores maneiras para atingir esse objetivo.

A utilização de ferramentas computacionais para analisar a solução que minimize os consumos de energia e ao mesmo tempo represente um baixo custo no investimento dos materiais é área com futuro em termos de engenharia. Contudo, é necessário garantir que o modelo retrate com veracidade o caso real, sendo que a validação empírica é uma forma simples e plausível de validar o modelo. Mesmo que ocorram variações entre os resultados obtidos nas simulações e os resultados reais, é de salientar que as melhorias verificadas na simulação verificar-se-ão na realidade, sendo que, em termos quantitativos, essas melhorias serão maiores ou menores consoante a discrepância entre o modelo e a realidade.

Com esta dissertação foi, também, testemunhado que a utilização de dados climáticos corretos influencia, com certo grau de significância, a precisão dos resultados obtidos na simulação face ao verificado na realidade, e que uma utilização incorreta destes, pode conduzir ao dimensionamento incorreto dos elementos construtivos.

Relativamente aos resultados obtidos na simulação, verifica-se que cargas por transmissão são as que mais afetam o desempenho energético das câmaras, sendo responsáveis por mais de 77 % (caso A), 66 % (caso B) e 85 % (caso C) da necessidade de refrigeração das empresas. O chão apresenta-se como o elemento construtivo que merece maior atenção para cada um dos três casos, sendo que, esta dissertação sugere que um correto investimento na melhoria deste elemento poderá trazer ganhos económicos para a administração destas empresas.

O desvão por cima das câmaras é outro ponto que merece algum cuidado, dado a proximidade desta zona com as câmaras e a amplitude térmica sentida entre a câmara e o desvão. A

solução que apresenta melhores resultados na diminuição da temperatura desta zona é utilizar materiais com um reduzido coeficiente de transferência de calor na cobertura por cima das câmaras, assim, será menor a carga térmica que atravessa a cobertura.

5.2 Sugestões para trabalho futuros

Como se identificou que as cargas térmicas por transmissão de calor eram as que mais influenciavam o desempenho energético das câmaras, esta dissertação focou-se, sobretudo, em apresentar alternativas para os casos atuais, assim como as consequências que essas alternativas iriam representar se fossem implantadas. Como tal, não foi prestada tanta atenção à influência de outras cargas, mais concretamente as cargas por infiltrações e as cargas dos produtos, porém o cálculo correto destas cargas advém de variáveis difíceis de mensurar. Uma sugestão para trabalho futuro passa por uma análise minuciosa das infiltrações de ar têm no desempenho energéticos das câmaras, assim como da utilização de vários dispositivos de proteção (cortinas de PVC, cortinas de ar, portas de enrolamento rápido).

Outra sugestão para trabalho futuro é a realização de um estudo semelhante, mas aplicado a câmaras de congelação e analisar as diminuições no consumo de energia com o melhoramento dos elementos construtivos. É espectável que essas diminuições sejam maiores uma vez que as amplitudes térmicas entre as câmaras de congelação e a envolvente exterior são maiores que as amplitudes térmicas verificadas para as câmaras de refrigeração.

Referências bibliográficas

- Afonso, J. F., 2009. *Estudo do comportamento térmico de edifícios antigos*. Lisboa: UNL.
- Altwies, J. E. e Reindl, D. T., 2001. Passive thermal energy storage in refrigerated warehouses. *International Journal of Refrigeration*, Volume 24, pp. 149-157.
- Ambiente Gelado, 2009. <http://www.ambientegegado.com.br>. [Online]
[Acedido em 9 Setembro 2014].
- APCER, 2013. <http://www.apcer.pt/>. [Online]
[Acedido em 1 Julho 2014].
- AREAM, 2008. <http://www.aream.pt/>. [Online]
[Acedido em 1 Julho 2014].
- ASHRAE, 2006a. Refrigerated-facility design. In: *ASHRAE Handbook-Refrigeration.*, pp. 14 (1-16).
- ASHRAE, 2006b. Refrigeration load. In: *ASHRAE Handbook-Refrigeration.*, pp. 13 (1-8).
- ASHRAE, 2006c. Thermal properties of foods. In: *ASHRAE Handbook-Refrigeration.*, pp. 9 (1-31).
- ASHRAE, 2009. Nonresidential cooling and heating load calculations. In: *ASHRAE Handbook-Fundamentals.*, pp. 18 (1-62).
- Baptista, P., Gaspar, P. D. e Oliveira, J., 2007. *Higiene e Segurança Alimentar na Distribuição de Produtos Alimentares*. Guimarães: Forvisão.
- Bastos, E. C., 2013. *Estudo paramétrico por DFC da influência da capacidade e disposição do armazenamento de carcaças cárneas no desempenho térmico de câmaras de refrigeração*. Covilhã: UBI.
- Bhandari, M., Shrestha, S. e New, J., 2012. Evaluation of weather datasets for building energy simulation. *Energy and Buildings*, Volume 49, pp. 109-118.
- Câmara Municipal de Ourique, 2010. <http://www.agenda21-ourique.com/pt/go/desenvolvimento-sustentavel>. [Online]
[Acedido em 17 Junho 2014].

CCE, 2006. Livro Verde - Estratégias para uma energia sustentável, competitiva e segura. In: Bruxelas.

Chagas, J. A. C., 2006. *Projeto e construção de câmaras frigoríficas*.

Chan, A. L. S., 2011. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong. *Energy and Buildings*, Volume 43, pp. 2860-2868.

CITEVE, 2012. *Plano setorial de melhoria da eficiência energética em PME - Setor Agroalimentar.*, IAPMEI.

Comunidade Europeia, 2002. Directiva 2002/91/CE - Desempenho energético dos edifícios. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, Volume 1, pp. 65-71.

Coulomb, D., 2008. Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment. *Food Science & Technology*, Volume 19, pp. 413-417.

Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M. e Griffith, B. T., 2008. Constrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, Volume 43, pp. 661-673.

Cúmano, G. N., 2009. *Análise técnico-económica de diferentes estratégias passivas de eficiência energética em edifícios*. Lisboa: IST.

DesignBuilder, 2014. <http://www.designbuilder.co.uk/>. [Online] [Acedido em Agosto 2014].

Direção-Geral de Energia e Geologia, 2014. *Fatura energética portuguesa 2013*, Lisboa: Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.

Duarte, M., 2013. *Estudo da bomba de calor - Fluido de trabalho e eficiência energética*. Covilhã: UBI.

ENERGYPLUS, 2013a. *EnergyPlus Engineering Reference*. California: LBNL.

ENERGYPLUS, 2013b. *Getting Started with EnergyPlus*. California: LBNL.

Foster, A. M., Barrett, R., James, S. J. e Swain, M. J., 2002. Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International Journal of Refrigeration*, Volume 25, pp. 1102-1109.

International Institute of Refrigeration, 2009. *The Role of Refrigeration in Worldwide Nutrition*. Paris.

James, S. J. e James, C., 2010. The food cold-chain and climate change. *Elsevier*, Volume Food Research International 43, pp. 1944-1956.

Judkoff, R. e Neymark, J., 2006. *Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140*. Quebec City, NREL.

Lekov, A. et al., 2009. *Opportunities for Energy Efficiency and Automated Demand Response in Industrial Refrigerated Warehouses in California*. California: LBNL.

Li, Y. M. e Wu, J. Y., 2010. Energy simulation and analysis of the heat recovery variable refrigerant flow system in winter. *Energy and Buildings*, Volume 42, pp. 1093-1099.

Li, Y., Wu, J. e Shiochi, S., 2009. Modeling and energy simulation of the variable refrigerant flow air conditioning system with water-cooled condenser under cooling conditions. *Energy and Buildings*, Volume 41, pp. 949-957.

Martins, P. J., 2012. *Modelação numérica do desempenho energético de unidades de refrigeração para conservação de produtos alimentares*. Covilhã: UBI.

Mattarolo, L., 1990. *Refrigeration and food processing to ensure the nutrition of the growing world population*. Dresden.

Ministério da Economia e da Inovação, 2006. *Diário da República*, Volume 67, pp. 2411-2512.

Oliveira, I., 2007. *Poupar energia e proteger o ambiente*. Lisboa: DECO PROTESTE, Lda..

Oliveira, P. J. S. P., 2001. *Mecânica computacional - Notas didáticas*. Covilhã: UBI.

PERFILNORTE, 2014. <http://www.perfilnorte.com/>. [Online]
[Acedido em 18 Setembro 2014].

PORDATA, 2014. <http://www.pordata.pt/>. [Online]
[Acedido em 10 Setembro 2014].

Sá, E. S. e Alexandre, J. L., 2007. *Auditorias energéticas no sector de frio industrial. Medidas de poupança e de eficiência energética*. Cusco.

Santos, C. A. e Matias, L., 2006. *Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. 2ª ed. Lisboa: LNEC.

Silva, P. D., 2010. *Apontamentos de Transmissão de Calor*. Covilhã: UBI.

Tsikaloudaki, K., Laskos, K., Theodosiou, T. e Bikas, D., 2012. Assessing cooling energy performance of windows for office buildings in the Mediterranean zone. *Energy and Buildings*, Volume 49, pp. 192-199.

Tzempelikos, A. e Athienitis, A. K., 2007. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, Volume 81, pp. 369-382.

Utage, A. S., Mali, K. V. e Kadam, A. D., 2013. Performance simulation of cold storage using EnergyPlus. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Volume 5, pp. 286-297.

Zhou, Y. P., Wu, J. Y., Wang, R. Z. e Shiochi, S., 2007. Energy simulation in the variable refrigerant flow air-conditioning system under cooling conditions. *Energy and Buildings*, Volume 39, pp. 212-220.